

Arnold Hanslmeier

# Den Nachthimmel erleben

Sonne, Mond und Sterne –  
Praktische Astronomie zum Anfassen

SACHBUCH



Springer Spektrum

Den Nachthimmel erleben

**Professor Arnold Hanslmeier** ist Astrophysiker am Institut für Physik an der Universität Graz. Neben mehr als 400 wissenschaftlichen Veröffentlichungen und mehreren Fachbüchern widmet er sich auch sehr gerne der verständlichen Verbreitung der faszinierenden Erkenntnisse der modernen Astrophysik. Er hält Vorlesungen an der Universität Graz und ist oft Gastprofessor an den Universitäten Wien, Innsbruck, Toulouse, La Laguna, Teneriffa sowie dem Kiepenheuer Institut in Freiburg. Wegen seiner besonderen didaktischen Fähigkeiten komplizierte Dinge einfach und anschaulich darzustellen ist er ein international sehr gefragter Referent.

Arnold Hanslmeier

# Den Nachthimmel erleben

Sonne, Mond und Sterne – Praktische Astronomie  
zum Anfassen



Springer Spektrum

Prof. Arnold Hansmeier  
Astrophysik und Meteorologie  
Universität Graz Institut für Physik / IGAM  
Graz, Österreich

ISBN 978-3-662-46031-3  
DOI 10.1007/978-3-662-46032-0

ISBN 978-3-662-46032-0 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

*Redaktion:* Bernhard Gerl

*Planung:* Margit Maly

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media  
([www.springer.com](http://www.springer.com))

# Vorwort

Astronomie erleben, das bedeutet sicher mehr als nur Sonne, Mond, Planeten und Sterne zu beobachten. Es geht um das Wissen, welche Geheimnisse sich hinter diesen Objekten verbergen. Was sind Planeten, was sind schwarze Löcher, gibt es Leben auf anderen Planeten, was ist dunkle Materie ...

Astronomie erleben bedeutet, dass wir bereits aus einfachen Beobachtungen, teils mit bloßem Auge, einiges über das Universum aussagen können. Beispielsweise genügt ein Blick zum Nachthimmel, um festzustellen, dass es Materie zwischen den Sternen gibt, oder dass das Universum nicht unendlich sein kann und eine Entwicklungsgeschichte haben muss. Aber mit einem Fernglas oder noch besser einem Teleskop wird unser Blick in die Tiefen des Universums natürlich schärfer. Wir erkennen Stürme auf dem Mars, riesige Ausbrüche auf der Sonne und weit entfernte Galaxien, deren Licht zu uns ausgesendet worden ist, als es noch gar keine Menschen auf der Erde gab.

In diesem Buch wollen wir zu solchen Beobachtungen anregen. Aber Vorsicht: Sie können davon süchtig werden und brauchen auch teilweise viel Geduld. Wir geben Tipps, wie man den Mond am besten fotografiert oder die Planeten beobachtet und was man bei Aufnahmen von lichtschwachen Objekten wie fernen Nebeln oder Galaxien berücksichtigen muss.

Die Astronomie zählt sicher zu den sich am raschesten entwickelnden Naturwissenschaften. Durch neue Techniken, wie computergesteuerte Teleskope oder CCDs, ist es auch Amateurastronomen möglich tiefe Einblicke in das Universum zu erhalten. Das Buch gibt einen ausführlichen Überblick über die moderne Astronomie, ohne dass man die empfohlenen Beobachtungen und Experimente selbst durchführt. Für besonders Interessierte sind auch ein paar einfache Berechnungen angeführt. Es richtet sich an interessierte Laien, Amateurastronomen, Schüler und Schulen mit Schulsternwarten und kann auch im Unterricht sehr gut verwendet werden.

Das Buch enthält zahlreiche Bilder aus eigenen Beobachtungen auch wenn diese nicht immer perfekt sind.

Der Autor wünscht den Leserinnen und Lesern viel Spaß beim Erkunden des Universums.

Ich bedanke mich bei meiner Lebensgefährtin Anita für die Hilfe beim Beobachten, bei Springer-Spektrum für die ausgezeichnete Zusammenarbeit, bei

**VI** Den Nachthimmel erleben

Frau Bettina Saglio und Frau Margit Maly für die Planung und Lektorat, sowie  
Herrn Bernhard Gerl für die Redaktion.

Graz, April 2015

Arnold Hanslmeier

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Teleskope</b>	<b>1</b>
1.1	Was sollte ein Teleskop leisten?	1
1.1.1	Vergrößerung	1
1.1.2	Auflösungsvermögen	3
1.1.3	Mehr Details ...	4
1.1.4	Vergrößern ja – aber sinnvoll	7
1.1.5	Der Abbildungsmaßstab	8
1.2	Teleskope und Abbildungsfehler	9
1.2.1	Linsen- und Spiegelteleskope	9
1.2.2	Chromatische Aberration	10
1.2.3	Weitere Abbildungsfehler	11
1.3	Auf den Unterbau kommt es an: Teleskopmontierungen	12
1.3.1	Azimutale Montierung	12
1.3.2	Parallaktische Montierung	13
1.3.3	Autoguiding	14
1.3.4	Fernglas	15
1.4	Bilder aufnehmen	16
1.4.1	Astrokameras	17
1.4.2	Bildverarbeitung	18
<b>2</b>	<b>Der Ursprung des Universums oder warum es nachts dunkel wird</b>	<b>25</b>
2.1	Tag und Nacht	25
2.1.1	Wann ist eigentlich Mittag?	25
2.1.2	Was ist eigentlich ein Tag genau?	27
2.1.3	Der Lauf des Mondes	29
2.1.4	Die schiefe Erdachse	30
2.1.5	Wieso dauert der Sommer länger als der Winter?	32
2.1.6	Die veränderliche Sonnenmasse	34
2.2	Gravitation – alles dreht sich	35
2.2.1	Die Gravitation gilt überall	35
2.2.2	Zwei Arten von Kräften	36
2.3	Der Anblick des Sternenhimmels	39
2.3.1	Erste Beobachtung: Es ist nachts dunkel	39
2.3.2	Beobachtung Nummer 2: Alles dreht sich um den Polarstern	41
2.3.3	Beobachtung Nummer 3: Staub zwischen den Sternen	41
2.3.4	Beobachtung Nummer 4: Planeten am Himmel	42

2.3.5	Wann sieht man die Planeten am besten? .....	45
2.3.6	Beobachtung für Spezialisten: Das Problem der Planetenschleifen .....	47

**3 Der Mond – Begleiter der Erde .....** 51

3.1	Die Bahn des Mondes .....	51
3.1.1	Mondumlauf und Erdachse .....	51
3.1.2	Sonnen- und Mondfinsternisse .....	52
3.1.3	Finsternisse und die Relativitätstheorie .....	53
3.1.4	Alles ist relativ .....	57
3.1.5	Allgemeine Relativitätstheorie .....	58
3.2	Den Mond beobachten .....	60
3.2.1	Rotiert der Mond? .....	60
3.2.2	Den Mond mit bloßem Auge beobachten .....	61
3.2.3	Den Mond mit einem Fernglas beobachten .....	61
3.2.4	Der Mond im Teleskop .....	61
3.3	Eine Reise durch die Geschichte des Mondes .....	63
3.3.1	Die Gegend um das Mare Nectaris .....	63
3.3.2	Das Mare Imbrium .....	64
3.3.3	Oceanus Procellarum .....	65
3.4	Der Mond physikalisch .....	66
3.4.1	Ein Doppelplanet am Venushimmel .....	66
3.4.2	Vergleich Erde und Mond .....	67
3.4.3	Wir berechnen die Masse des Mondes .....	67
3.4.4	Hat der Mond eine Atmosphäre? .....	69
3.4.5	Beben auf dem Mond .....	70
3.4.6	Der Einfluss des Mondes auf die Erde .....	71
3.4.7	Die Erde dreht sich langsamer .....	73
3.5	Die Entstehung des Mondes .....	74
3.5.1	Wir bestimmen das Alter der Mondoberfläche .....	74
3.5.2	Woher stammt der Mond? .....	74
3.6	Den Mond fotografieren .....	75
3.6.1	Fotografie des Vollmondes .....	76
3.6.2	Fotografie der Mondkrater und Mondgebirge .....	77
3.6.3	Der Mond bewegt sich ... .....	79

**4 Die Planeten .....** 83

4.1	Einteilung der Planeten .....	83
4.1.1	Erdähnliche Planeten .....	83
4.1.2	Die Riesenplaneten .....	84
4.1.3	Wir machen ein Modell des Sonnensystems .....	84
4.1.4	Die astronomische Einheit .....	85
4.2	Wir beobachten die Planeten .....	87
4.2.1	Merkur .....	87
4.2.2	Venus .....	88
4.2.3	Zusammenfassung: Beobachtung der inneren Planeten .....	89

4.2.4	Mars	89
4.2.5	Fotografieren der erdähnlichen Planeten	91
4.2.6	Jupiter	92
4.2.7	Saturn	94
4.2.8	Uranus und Neptun	94
4.3	Das Innere der Planeten	95
4.3.1	Aufbau der Erde	95
4.3.2	Seismologie	96
4.3.3	Der Aufbau anderer erdähnlicher Planeten	97
4.3.4	Weshalb sind Planeten eigentlich rund?	98
4.3.5	Wieso ist es im Inneren der Planeten heiß?	98
4.3.6	Planeten und Magnetfelder	99
4.4	Die Oberflächen der terrestrischen Planeten	99
4.4.1	Was wir aus der Form von Kratern lernen können	100
4.4.2	Vulkanismus	100
4.5	Geologische Geschichte der Planeten	103
4.5.1	Mars	105
4.5.2	Venus	108
4.6	Die Atmosphären der erdähnlichen Planeten	111
4.6.1	Grundlegendes über Atmosphären	111
4.6.2	Wechselwirkung zwischen Strahlung und Atmosphäre	113
4.6.3	Sonnenwind und Magnetosphäre	115
4.6.4	Wetter und Klima	115
4.6.5	Woher kommt das Gas in der Atmosphäre eines Planeten?	118
4.6.6	Die Atmosphären von Mond und Merkur	119
4.6.7	Die Atmosphäre des Mars	120
4.6.8	Warum ist Venus so heiß?	122
4.6.9	Die Atmosphäre der Erde	123
4.6.10	Überlegen Sie doch mal ...	125
4.7	Die Gasplaneten	125
4.7.1	Die jovianischen Planeten	125
4.7.2	Uranus und Neptun	128
4.8	Planetenmonde und Planetenringe	131
4.8.1	Die Ringe der großen Planeten	131
4.8.2	Die Roche-Grenze, oder wann Monde auseinanderbrechen	132
4.8.3	Die Monde des Mars	133
4.8.4	Die Monde des Jupiter	135
4.8.5	Saturnmonde	139
4.8.6	Die Monde des Uranus	141
4.8.7	Die Monde des Neptun	142
<b>5</b>	<b>Zwergplaneten und andere Kleinkörper</b>	<b>145</b>
5.1	Zwergplaneten	145
5.1.1	Pluto – vom Planeten zum Zwergplaneten	145
5.1.2	Ceres – vom Asteroiden zum Zwergplaneten	146
5.1.3	Was ist der Unterschied zwischen Planeten und Zwergplaneten?	147

## X Den Nachthimmel erleben

5.2	Asteroiden	148
5.2.1	Allgemeine Eigenschaften	148
5.2.2	Asteroiden beobachten	149
5.2.3	Asteroiden – Gefahr für die Erde?	149
5.2.4	Gefahr eines Asteroideneinschlages	151
5.2.5	Trojaner	152
5.3	Kometen	153
5.3.1	Kurz- und langperiodische Kometen	153
5.3.2	Aufbau der Kometen	153
5.3.3	Herkunft der Kometen	154
5.3.4	Wir beobachten Kometen	156
5.4	Kleinkörper und Staub im Sonnensystem	157
5.4.1	Meteoroiden	157
5.4.2	Sternschnuppenströme beobachten	158

## 6 Die Sonne – unser Stern

6.1	Wir beobachten die Sonne	161
6.1.1	Achtung: Niemals direkt!!	161
6.1.2	Flecken, die nicht sein durften	162
6.1.3	Die brodelnde Oberfläche der Sonne	166
6.1.4	Wird es im Inneren der Sonne heißer?	166
6.1.5	Wir zeigen, dass die Erdbahn elliptisch ist	166
6.1.6	Moderne Sonnentelkope	167
6.2	Der Aufbau der Sonne	171
6.2.1	Die Kernfusion im Inneren der Sonne	171
6.2.2	Die Photosphäre	173
6.2.3	Chromosphäre und Korona	174
6.2.4	Die Korona	177
6.3	Sonnenaktivität und Weltraumwetter	180
6.3.1	Wie man berühmt wird	180
6.3.2	Wir messen die Sonnenaktivität	181
6.3.3	Der Sonnendynamo	182
6.3.4	Sonnenaktivität und Erdklima	184
6.3.5	Weltraumwetter – Gefahr für Astronauten?	184
6.3.6	Die Heliosphäre	186
6.3.7	Eine Reise an den Rand des Sonnensystems	187

## 7 Die Sterne – Aufbau und Entwicklung

7.1	Der Sternenhimmel	189
7.1.1	Sternbilder und Beobachtungen mit bloßem Auge	189
7.1.2	Sternhaufen	191
7.1.3	Gebiete der Sternentstehung	192
7.2	Zustandsgrößen der Sterne	193
7.2.1	Entfernung der Sterne	193
7.2.2	Massen der Sterne	194

7.2.3	Wie groß sind Sterne	195
7.2.4	Wie heiß sind Sterne?	196
7.2.5	Sternhelligkeiten	196
7.3	Das wichtigste Diagramm der Astrophysik	197
7.3.1	Was ist ein Spektrum?	197
7.3.2	Das Hertzsprung-Russell-Diagramm	199
7.3.3	Riesen und Zwerge: Leuchtkraftklassen	201
7.4	Wie entstehen Sterne?	201
7.4.1	Gasnebel und junge Sternhaufen	202
7.4.2	Eine Wolke kollabiert	202
7.4.3	Sterne auf der Hauptreihe	205
7.5	Sterne am Ende ihrer Entwicklung	208
7.5.1	Weißer Zwerge, das Schicksal unserer Sonne	208
7.5.2	Neutronensterne	211
7.5.3	Schwarze Löcher	214
<b>8</b>	<b>Galaxien</b>	<b>217</b>
8.1	Unsere kosmische Heimat – die Milchstraße	217
8.1.1	Wir beobachten die Milchstraße	217
8.1.2	Die Masse der Milchstraße – dunkle Materie?	219
8.1.3	Eine Spiralgalaxie ...	221
8.1.4	Das supermassive schwarze Loch im Zentrum	223
8.2	Galaxien	224
8.2.1	Wir beobachten Galaxien	224
8.2.2	Entfernungsbestimmungen	226
8.2.3	Typen von Galaxien	229
8.2.4	Besondere Galaxien	230
8.3	Galaxienhaufen	231
8.3.1	Wir beobachten Galaxienhaufen	231
8.3.2	Die lokale Gruppe	232
8.3.3	Der Virgohaufen	233
8.3.4	Superhaufen	234
<b>9</b>	<b>Wie alles entstanden ist</b>	<b>237</b>
9.1	Das Universum und der Urknall	237
9.1.1	Warum die Nacht dunkel ist	237
9.1.2	Welteninseln	238
9.1.3	Das Universum dehnt sich aus	239
9.1.4	Das Alter des Universums	241
9.1.5	Das kühle Universum war früher heiß	242
9.1.6	Das Universum wird undurchsichtig	242
9.1.7	Woher kommen die chemischen Elemente	244
9.2	Urknall und Teilchenphysik	246
9.2.1	Teilchen und Energie	246
9.2.2	Vereinigung der Kräfte	246

**XII** Den Nachthimmel erleben

9.2.3	Dunkle Materie und dunkle Energie	248
9.2.4	Raum-Zeit	249
9.3	Leben im Universum	251
9.3.1	Entstehung des Lebens auf der Erde	251
9.3.2	Die Entdeckung von Exoplaneten	253
9.3.3	Habitable Zonen	256
9.3.4	Kontaktaufnahme?	257
	<b>Weiterführende Literatur</b>	<b>259</b>
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>261</b>

# Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1	Helligkeitsgewinn: Je größer der Objektivdurchmesser, desto schwächere Sterne sieht man	7
Tab. 2.1	Venus: Zeitpunkte ihrer größten westlichen und größten östlichen Elongation sowie deren Betrag. Um die größte westliche Elongation erscheint Venus als strahlender Morgenstern, um den Zeitpunkt ihrer größten östlichen Elongation als strahlender Abendstern	45
Tab. 2.2	Merkur: Zeitpunkte seiner größten westlichen und größten östlichen Elongation sowie deren Betrag. Um die größte westliche Elongation ist eine Morgensichtbarkeit des Planeten möglich, um die größte östliche Elongation eine Abendsichtbarkeit	46
Tab. 2.3	Äußere Planeten, Daten ihrer Opposition	47
Tab. 3.1	Astronomische Instrumente, und was man damit auf dem Mond sehen kann	63
Tab. 4.1	Die großen Planeten. $D$ : Äquatordurchmesser, $v_e$ : Fluchtgeschwindigkeit	84
Tab. 4.2	Modell des Sonnensystems, Maßstab $1:10^9$	85
Tab. 4.3	Die wichtigsten Eigenschaften der Planeten und von Pluto; $d$ : Entfernung von der Sonne	85
Tab. 4.4	Terrestrische Planeten und Treibhauseffekt. $d$ Distanz von der Sonne, $a$ Albedo, $T_1$ mittlere Temperatur ohne Treibhauseffekt, $T_{\text{Oberfl.}}$ tatsächliche Oberflächentemperatur, Differenz = Unterschied zwischen tatsächlicher Temperatur und Temperatur ohne Treibhauseffekt	112
Tab. 5.1	Bekannte Sternschnuppenschwärme	158
Tab. 7.1	Scheinbare Helligkeiten einiger Objekte	197
Tab. 7.2	Zeitskalen der Sternentwicklung für Sterne unterschiedlicher Masse	207
Tab. 9.1	Liste der bis März 2014 gefundenen Exoplaneten	255

# 1

## Teleskope

Astronomie erlebt man erst wirklich durch eigene Beobachtungen, egal ob mit bloßem Auge, Fernglas oder einem Teleskop. Zwar sind die Bilder, die im Internet zu finden sind, wunderschön, aber die Beobachtung mit eigenem Auge ist ungleich spannender, und natürlich lernt man auch mehr über das Universum.

In diesem Kapitel beschreiben wir Teleskope und geben nützliche Tipps für deren Einkauf und den Einsatz für eigene Beobachtungen.

### 1.1 Was sollte ein Teleskop leisten?

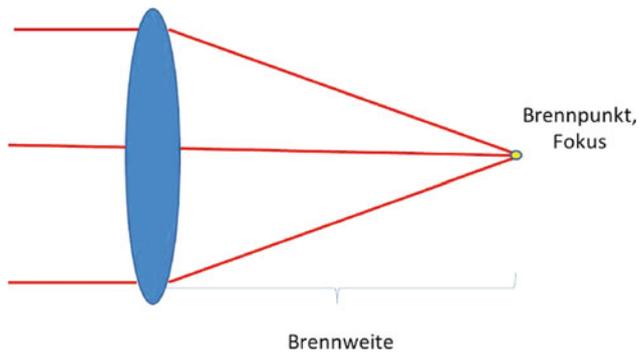
Wozu benötigen wir überhaupt ein Teleskop? Es hilft uns:

1. weit entfernte Dinge nah zu sehen. Dazu ist eine ausreichende Vergrößerung notwendig,
2. auf weit entfernten Dingen viele Details zu erkennen; diese Eigenschaft eines Teleskops wird durch sein Auflösungsvermögen bestimmt;
3. In der Astronomie kommt noch hinzu, dass wir auch nach Möglichkeit Dinge, also Sterne, Galaxien usw. beobachten möchten, die wegen ihrer Lichtschwäche mit bloßem Auge nicht erkennbar sind.

Aus diesen Anforderungen ergeben sich die wichtigsten Kenngrößen eines Teleskops: Vergrößerung, Auflösungsvermögen, Lichtstärke.

#### 1.1.1 Vergrößerung

Wir beschreiben diese Eigenschaft zuerst, weisen aber jetzt schon darauf hin, dass die Vergrößerung nicht so wesentlich ist, wie viele Laien meinen. Oft lautet bei einer Führung auf einer Sternwarte die erste Frage: Wie hoch ist denn die Vergrößerung dieses Fernrohres? Die Besucher sind dann enttäuscht, wenn sie beispielsweise erfahren, dass man nur mit einer relativ geringen Vergrößerung arbeitet (z. B. 100- oder 200-fach).



**Abb. 1.1** Prinzip einer Sammellinse. Die Strahlen vereinigen sich am Brennpunkt, Fokus

Bevor wir die Vergrößerung angeben, sehen wir uns kurz den Aufbau eines Teleskops an. Teleskope bestehen aus einer Linse oder einem Spiegel als Objektiv und einem Okular, durch welches das Objekt betrachtet wird. Wie alle optischen Elemente besitzen Linsen oder Spiegel eine Brennweite. Sie sammeln das Licht und vereinigen es im sogenannten Brennpunkt. Der Abstand zwischen Linse (oder Spiegel) und Brennpunkt wird als Brennweite bezeichnet. In Abb. 1.1 ist das Prinzip einer Linse dargestellt (Sammellinse). Strahlen, die durch den Mittelpunkt gehen, bleiben unverändert, alle anderen Strahlen werden gebrochen. Am Brennpunkt beobachtet man ein reelles Bild.

Die Brennweite einer Sammellinse (Lupe) kann man sehr einfach bestimmen, indem man das Bild auf einen Schirm projiziert, und dann den Abstand Lupe-Schirm misst, bei dem das Bild scharf erscheint.

Auch Okulare besitzen eine Brennweite, die meist sehr gering ist. Die Vergrößerung  $V$  berechnet sich nun ganz einfach aus dem Verhältnis Objektivbrennweite  $f_{\text{Obj}}$  dividiert durch die Brennweite des Okulars  $f_{\text{Ok}}$ :

$$V = \frac{f_{\text{Obj}}}{f_{\text{Ok}}}$$

**Beispiel** Sei die Brennweite des Objektivs  $f_{\text{Obj}} = 1000$  mm. Wir möchten mit diesem Teleskop eine 100-fache Vergrößerung erzielen. Dann brauchen wir dazu ein Okular der Brennweite von  $f_{\text{Ok}} = 10$  mm wegen:

$$100 = \frac{1000}{f_{\text{Ok}}} \quad f_{\text{Ok}} = \frac{1000 \text{ mm}}{100} = 10 \text{ mm}$$

Oft werden sogenannte Barlowlinsen angeboten. Diese schraubt man vor das eigentliche Okular. Sie bewirken z. B. eine Verdoppelung der Brennweite des Objektivs. Die Kombination einer 2-fach Barlowlinse mit unserem Teleskop der Brennweite  $f_{\text{Obj}} = 1000$  ergibt also mit dem Okular der Brennweite 10 mm eine 200-fache Vergrößerung.

### 1.1.2 Auflösungsvermögen

Das Auflösungsvermögen eines Teleskops gibt an, welche Details man damit auf Objekten wie Sonne, Mond und Planeten erkennen kann. Für die Beobachtung der Sterne ist das Auflösungsvermögen ausschlaggebend, ob man zwei eng beieinander stehende Sterne (beispielsweise Doppelsterne) getrennt sehen kann. Das Auflösungsvermögen  $A$  hängt ab vom Verhältnis der Wellenlänge des Lichts  $\lambda$ , bei der beobachtet wird, und von dem Durchmesser des Objektivs  $D$  (Linse oder Spiegel):

$$A = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

Je kleiner der Wert von  $A$ , desto feinere Details kann man erkennen (Abb. 1.1). Eine einfache Näherung für diese Formel ist:

$$A[\text{''}] = \frac{13}{D[\text{cm}]}$$

Diese Formel gilt näherungsweise für die Beobachtung im sichtbaren Licht und wird als Dawes-Formel bezeichnet. Das Auflösungsvermögen wird in Bogensekunden  $\text{''}$  angegeben<sup>1</sup>.

Generell hängt das Auflösungsvermögen auch von der Wellenlänge ab, ist also bei langen Wellen, z. B. Radiowellen, viel schlechter als im sichtbaren Bereich! Radioteleskope haben deshalb riesige Dimensionen und bestehen oft aus vielen zusammenschalteten Radiospiegeln. Abbildung 1.2 zeigt das Very Large Array in New Mexico, USA.

Wir kaufen uns ein Teleskop mit einer Öffnung von 10 cm. Wie groß ist sein Auflösungsvermögen? Welche Details können wir damit auf den Planeten erkennen? Aus der Dawes-Formel bekommen wir  $A = 1,3\text{''}$ . Wir können also Objekte, die unter einem Winkel von  $1,3\text{''}$  erscheinen, noch als getrennt sehen, bzw. Details bis zu dieser Größe. Nehmen wir an, Mars hätte einen scheinbaren Durchmesser von 13 Bogensekunden, also  $13\text{''}$ . Der wahre Durchmesser des Mars beträgt etwa 6000 km, dann sieht man Details auf der Marsoberfläche bis etwa 600 km Größe mit diesem Teleskop.

<sup>1</sup> Eine Bogensekunde entspricht  $1/3600$  Grad.



**Abb. 1.2** Das Auflösungsvermögen eines Teleskops hängt von der Wellenlänge ab, bei der beobachtet wird. Deshalb müssen Radioteleskope wesentlich größer gebaut oder zusammenschaltet werden (Interferometrie), um bei den langen Radiowellen ein gutes Auflösungsvermögen zu erreichen

### 1.1.3 Mehr Details ...

Das obige Beispiel mag ernüchternd sein. Mit einem Teleskop von 10 cm Öffnung sieht man maximal 600 km große Details auf der Marsoberfläche, wenn dessen Scheibchen 13 Bogensekunden misst. Was also tun, um mehr Details erkennen zu können? Eine Möglichkeit: sich in Geduld üben. Alle, die sich ernsthaft mit Astronomie und der Beobachtung des Himmels beschäftigen, die also das Weltall erleben möchten, müssen diese Eigenschaft besitzen oder sich aneignen. Ein nur flüchtiger Blick zum Sternenhimmel besagt gar nichts. Bei sehr günstigen Oppositionen<sup>2</sup> kommt uns Mars so nahe, dass der Durchmesser seines Scheibchens bis 24'' betragen kann. Dann wird man mehr Details auf seiner Oberfläche wahrnehmen können. Die andere Möglichkeit ist, ein Teleskop mit einer größeren Öffnung zu kaufen. Ein Teleskop mit 20 cm Öffnung zeigt wesentlich mehr Details als ein Teleskop mit 10 cm Öffnung. Erkennen wir also 600 km große Strukturen auf dem Mars

<sup>2</sup> Wenn der Mars der Erde am nächsten steht.



**Abb. 1.3** Der Einfluss der Größe der Teleskopöffnung auf die Bildqualität. *Links*: 10-cm-Newton-Teleskop, *rechts* dieselbe Aufnahme der Galaxie M51 mit einem 25-cm-Teleskop. A. Hanslmeier, Privatsternwarte

mit einem Teleskop von 10 cm Öffnung, so sieht man mit 20 cm Öffnung Details bis 300 km Größe. Allerdings kosten Teleskope mit größerer Öffnung auch deutlich mehr als kleinere.

Der Einfluss der Größe des Teleskopobjektivs (Spiegel) auf das Auflösungsvermögen und die Lichtstärke ist in Abb. 1.3 verdeutlicht. Sie zeigt Aufnahmen der Galaxie M51 mit einer Digitalkamera (Belichtung 5 min). Das linke Bild entstand mit einem 10-cm-Teleskop, das rechte mit einem 25-cm-Teleskop. Man erkennt deutlich mehr Details auf dem rechten Bild, und das linke Bild ist auch lichtschwächer.

Ist das also der Grund, weshalb Astronomen Riesenteleskope mit Durchmessern von mehr als 5 m bauen? Immerhin: Ein Teleskop mit 10 m Durchmesser würde nach obigem Beispiel 6 km große Details auf dem Mars erkennen lassen. Die Antwort ist ja und nein. Wie so oft in der Physik, gelten unsere Überlegungen nur für den Idealfall: perfekte Optik und keine störenden Einflüsse durch die Erdatmosphäre. Die Luftturbulenzen in der Erdatmosphäre begrenzen das Auflösungsvermögen deutlich. Meist ist das sogenannte Seeing größer als eine Bogensekunde, man sieht also mit einem Teleskop von 20 cm keine feineren Strukturen als mit einem Teleskop von 10 cm. Das Seeing hängt sehr stark von lokalen Gegebenheiten ab. Auf hohen Bergen ist es meist deutlich besser als auf Ebenen, wo sich die Luft am Tage erhitzt und warme Luft aufsteigt, was sich eben als Turbulenzen bemerkbar macht. Auch das mit freiem Auge zu sehende „Zittern“ oder „Blinken“ der Sterne entsteht durch Luftturbulenzen. Je weniger stark die Sterne blinken, desto ruhiger ist die Luft,

man erkennt mehr im Teleskop. Unter sehr guten Umständen kann das Seeing bis zu  $0,2''$  betragen.

### Beispiel

Auf dem 4200 m hohen Mauna Kea, Hawaii, wurde ein internationales Observatorium errichtet. In Abb. 1.4 sind vier wichtige Teleskope dieses Großobservatoriums abgebildet. Die beiden 10-m-Keck-Teleskope können sowohl einzeln betrieben werden als auch im Interferometerbetrieb. Bei Letzterem wird das Licht beider Teleskope vereinigt (Interferometrie), und der Abstand der beiden Teleskope voneinander bestimmt das Gesamt-Auflösungsvermögen. Insgesamt sind elf Nationen an den Teleskopen beteiligt. Die Keck-Teleskope wurden durch eine Spende der Keck-Foundation ermöglicht.

Welche Vorteile bietet ein derartiges Observatorium? Mehrere Teleskope an einem Platz, durch die Höhe ist die Luft sehr klar und transparent, das Seeing gering, auch Aufnahmen im nahen Infrarot sind möglich (dieser Wellenlängenbereich wird in bodennahen Schichten durch Wasserdampf unbeobachtbar).

Es ist immer noch kostengünstiger, Großteleskope auf der Erdoberfläche zu installieren als im Weltraum, da vor allem die Wartung wesentlich einfacher ist.

## Teleskope sammeln Licht

Eine sehr wichtige Eigenschaft von Teleskopen ist es, möglichst viel Licht zu sammeln. Je mehr Licht gesammelt wird, d. h., je größer die Öffnung ist, desto schwächere Objekte können damit beobachtet werden. Bedingt durch die Turbulenzen in der Erdatmosphäre steigt das Auflösungsvermögen kaum noch ab einer Öffnung von etwa 50 cm, jedoch sieht man schwächere Objekte. Bei den hell leuchtenden Nebeln ist sogar das „Farbensehen“ mit dem Auge möglich. Sonst erkennt man in kleineren Teleskopen die auf Fotografien wunderschön leuchtenden Nebel nur als schwarz-weiße zarte Wölkchen, was bei Besuchern oft große Enttäuschung hervorruft.

In Tab. 1.1 ist der Helligkeitsgewinn dargestellt, der sich gegenüber der Beobachtung mit bloßem Auge ergibt. Man hat die Helligkeiten der Sterne auf einer logarithmischen Skala in Größenklassen eingeteilt. Je höher der Zahlenwert, desto schwächer der Stern. Die hellsten unter idealen Bedingungen gerade noch mit freiem Auge sichtbaren Sterne haben 6. Größe, der Unterschied zwischen zwei Größenklassen beträgt an Intensität  $2,512$ . Ein Stern 4. Größe ist um  $2,512^2$  mal heller als ein Stern 6. Größe.

Man sieht aus der Tabelle, dass der Helligkeitsgewinn bei einem bestimmten Verhältnis der Öffnungen derselbe ist. Zwischen freiem Auge mit einem



**Abb. 1.4** Die wichtigsten Teleskope des Hawaii-Observatoriums: *Links*: Subaru-Teleskop (Japan, Durchmesser 8 m), *Mitte*: die beiden Keck-Teleskope (USA, jeweils 10 m Durchmesser), *Rechts*: das IRTF (Infrared Telescope Facility, NASA, 3 m)

**Tab. 1.1** Helligkeitsgewinn: Je größer der Objektivdurchmesser, desto schwächere Sterne sieht man

Durchmesser in cm	Grenzgröße in Größenklasse (m)
freies Auge 0,5	6
Fernglas 5	9,5
Teleskop 6	10,2
10	11,7
15	12,9
20	13,4
30	14
50	14,5
60	15
150	16,5

Pupillendurchmesser von ca. 0,5 cm und einem 5-cm-Fernglas, also dem 10-fachen Durchmesser der Augenpupille, entspricht einem Gewinn von 3,5 Größenklassen. Zwischen einem 15-cm-Teleskop und einem 150-cm-Teleskop (wieder ein Faktor 10 in der Öffnung) beträgt der Gewinn ebenfalls 3,5 Größenklassen.

### 1.1.4 Vergrößern ja – aber sinnvoll

Wie wir gesehen haben, lässt sich die Vergrößerung eines Teleskops durch Verwendung von Okularen unterschiedlicher Brennweite steuern. Je kürzer

die Brennweite des Okulars, desto höher ist die Vergrößerung. Aber die Physik setzt hier zwei Grenzen. Erstens das Auflösungsvermögen eines Teleskops. Man sieht also trotz sehr hoher Vergrößerung ab einer gewissen Grenze nicht mehr Details. Zweitens die Turbulenzen in der Erdatmosphäre. Bei hohen Vergrößerungen entsteht der Eindruck eines unscharfen, mitunter etwas fahlen Bildes. Man vergrößert dann nur mehr die Luftunruhe. Es gibt Faustregeln für sinnvolle Vergrößerungen eines Teleskops.

Zunächst hängt die Wahl der richtigen Vergrößerung vom Objekt selbst ab, welches man beobachten möchte. Ein offener Sternhaufen durch ein Teleskop beobachtet sieht bei hohen Vergrößerungen weit weniger eindrucksvoll aus, als bei Verwendung geringer Vergrößerungen. Bei Planeten dagegen wird man mit geringen Vergrößerungen kaum Details erkennen. Um das Auflösungsvermögen eines Teleskops mit Objektiv- oder Spiegeldurchmesser  $D$  auszunutzen, empfiehlt sich als Faustregel, eine Vergrößerung wie folgt zu verwenden:

$$V_{\text{mind}} = 5 \times D[\text{cm}]$$

Am besten sieht man die Details bei Verwendung der „förderlichen“ Vergrößerung von:

$$V_f = 10 \times D[\text{cm}]$$

Diese Formel leitet sich aus der Überlegung ab, dass unser Auge Details bis etwa eine Bogenminute ( $60''$ ) erkennen kann.

Wenn  $V > V_f$  gewählt wird, sieht man nicht mehr Details und vergrößert nur die Luftunruhe.

Für ein Teleskop mit einer Objektivöffnung von 10 cm ergibt sich also:

- Um das volle Auflösungsvermögen bei Planeten- und Mondbeobachtung zu erreichen:  $V_{\text{mind}} = 5 \times 1050$ -fach.
- Bei sehr guten Beobachtungsbedingungen kann man bis zu  $V_f = 10 \times 10 = 100$ -fach gehen. Bei höheren Vergrößerungen sieht man zwar ein größeres Bild, das aber unschärfer wird, und keine weiteren Details zeigt.

### 1.1.5 Der Abbildungsmaßstab

Sie wollen wissen, wie groß die Abbildung der Sonne, des Mondes oder eines Planeten durch ein Teleskop betrachtet erscheint? Der Abbildungsmaßstab gibt an, wie groß z. B. Sonne, Mond und Planeten bei Verwendung eines Teleskops mit einer gegebenen Objektivbrennweite abgebildet werden, z. B. auf dem Chip der Kamera. Dieser Wert hängt von der Brennweite und der Größe

des Objekts in Graden ab:

$$b = \frac{\rho f}{50}$$

Als einfache Faustregel gilt: die Brennweite in Metern ergibt den Durchmesser des Sonnen- oder Mondbildes in Zentimetern. Sonne und Mond haben am Himmel eine Ausdehnung von etwa 1/2 Grad.

Wenn Sie also mit einem Teleobjektiv von 300 mm Brennweite den Mond abbilden, dann beträgt die Größe des Mondbildes nur etwa 0,3 cm.

Sonnenteleskope sollen möglichst feine Details auf der Sonne abbilden, deshalb verwendet man sehr lange Brennweiten. Ein Sonnenteleskop mit  $f = 45$  m erzeugt eine Abbildung der Sonne von 45 cm Durchmesser.

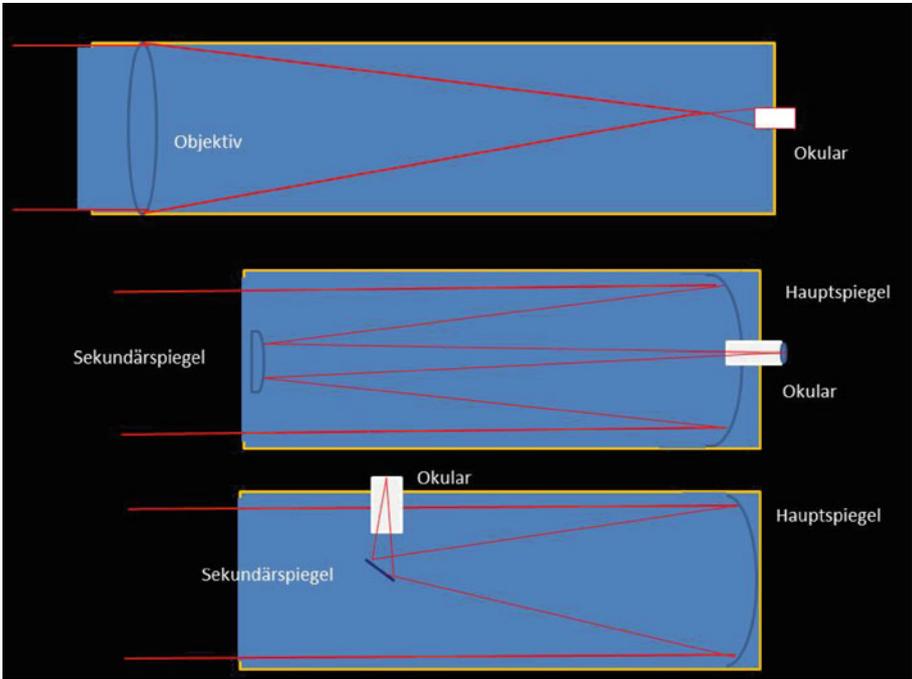
## 1.2 Teleskope und Abbildungsfehler

Der Preis eines Teleskops hängt davon ab, wie gut die optische Qualität ist, d. h., wie gut Abbildungsfehler korrigiert werden.

### 1.2.1 Linsen- und Spiegelteleskope

Man unterscheidet generell zwischen Linsen- und Spiegelteleskopen. Bei Linsenteleskopen oder Refraktoren ist das Objektiv vorn am Teleskoptubus angebracht und eine Linse; bei Spiegelteleskopen oder Reflektoren dient ein Spiegel, der sich am hinteren Rand des Tubus befindet, als Objektiv. Linsenteleskope sind im Prinzip einfacher als Spiegelteleskope, bei denen das Licht durch weitere Spiegel entweder seitlich ausgeleitet wird (Newton-Teleskop) oder durch eine Bohrung des Hauptspiegels hinter dem Tubus (Cassegrain-Teleskop). Nachteile der Linsenteleskope (Refraktoren) gegenüber den Spiegelteleskopen (Reflektoren) sind folgende:

- Die Baulänge des Teleskops ist durch die Brennweite der Objektivlinse bestimmt. Refraktoren großer Brennweite sind daher sehr lang, und entsprechend wird der Tubus schwer bzw. instabil.
- Die Linse des Objektivs muss perfekte optische Eigenschaften aufweisen. Bei einem Reflektor kommt es nur auf die Reflexion an, bei einem Refraktor auch auf die Durchlässigkeit der Linse.
- Große Glaslinsen werden sehr schwer, deshalb wird ein langer Teleskoptubus instabil und kann sich leicht durchbiegen.



**Abb. 1.5** Strahlengang in einem Refraktor (*oben*), Cassegrain-Teleskop (*Mitte*) und Newton-Teleskop (*unten*)

Wegen dieser Nachteile werden größere Teleskope immer als Spiegelteleskope gebaut, die größten Refraktoren besitzen eine Objektivöffnung um einen Meter (Yerkes-Observatorium).

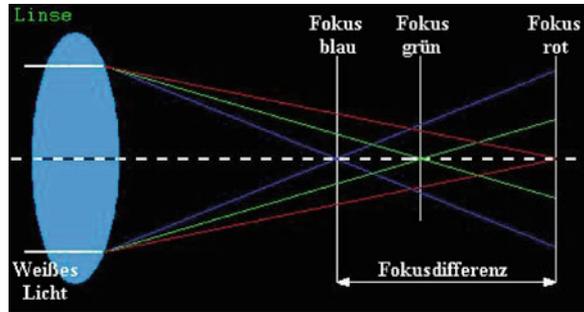
In Abb. 1.5 sind diese Typen skizziert.

Am billigsten lassen sich Newton-Teleskope herstellen. Für den Anfänger ist es jedoch mitunter schwierig Objekte damit zu finden, da der Einblick seitlich am Tubus erfolgt. Auch gewisse gymnastische Verrenkungen beim Beobachten sind notwendig. Cassegrain-Teleskope sind sehr kompakt, da das Licht mehrfach reflektiert wird, und das Teleskop trotz hoher Brennweite kompakt bleibt.

### 1.2.2 Chromatische Aberration

Der Preis eines Teleskops richtet sich nach der Güte der Optik, d. h., wie gut Abbildungsfehler behoben werden. Die chromatische Aberration entsteht dadurch, dass der Brennpunkt für Strahlung kleinerer Wellenlänge vor dem Brennpunkt für Strahlung größerer Wellenlänge liegt. Die Brennweite der

**Abb. 1.6** Chromatische Aberration bei einem Refraktor



Linse im Blauen ist daher geringer als im Roten (da rotes Licht eine größere Wellenlänge als blaues besitzt). Dies ist in der Abb. 1.6 dargestellt.

Ein billiges Teleskop lässt sich leicht herstellen, wenn man zwei Linsen unterschiedlicher Brennweite kombiniert, z. B. eine Vergrößerungslupe als Objektiv und eine Linse kleiner Brennweite als Okular. Man hält die beiden Linsen hintereinander und variiert den Abstand Lupe-Okularlinse so lange, bis das Bild scharf erscheint.

Man kann diesen Effekt bei Refraktoren durch Verwendung mehrerer Linsen korrigieren (sog. achromatisches Objektiv). Dies erhöht natürlich den Preis des Objektivs. Bei Reflektoren tritt dieser Fehler nicht auf, da das Licht am Spiegel reflektiert wird, und die Reflexion unabhängig von der Wellenlänge ist.

### 1.2.3 Weitere Abbildungsfehler

Lichtstrahlen, die am Rand der Linse gebrochen bzw. am Rande eines Spiegels reflektiert werden, haben eine andere Brennweite als Lichtstrahlen, die nahe der Mitte gebrochen werden. Diesen Effekt nennt man sphärische Aberration. Darüber hinaus gibt es den Effekt der Verzeichnung. Ein Rechteck wird dabei nicht als Rechteck abgebildet, sondern als kissen- oder tonnenförmiges Gebilde. Durch speziellen Schliff der Linse bzw. des Spiegels (parabolisch) kann man diesen Effekt gering halten.

Generell gilt also: Je besser diese Abbildungsfehler korrigiert sind, desto teurer wird die Optik. Eine schlecht korrigierte Optik bereitet auf Dauer keine große Freude, und man sollte daher beim Kauf eines Teleskops nach der Qualität der Optik fragen. Erscheinen Sterne mit einem farbigem Saum, ist

die chromatische Aberration schlecht korrigiert. Bei Spiegelteleskopen kann es an den Randbereichen zu kometenartigen Sternabbildungen kommen, was natürlich ebenso ein Fehler des optischen Systems ist.

Oft wird man gefragt, ob sich der Fangspiegel, der sich im Strahlengang beim Newton- oder Cassegrain-Teleskop befindet, nicht negativ auf die Abbildungsqualität auswirkt. Bis zu einem gewissen Grad ist dies durchaus der Fall, aber bei guten Systemen merkt man davon fast nichts.

### 1.3 Auf den Unterbau kommt es an: Teleskopmontierungen

Teleskope müssen sich möglichst exakt an jeden Punkt des Himmels ausrichten lassen. Außerdem ist eine automatische Nachführung des Teleskops von Vorteil, um die Drehung der Erde zu kompensieren. Auch hier gilt wieder eine Faustregel: Eine gute Montierung eines Teleskops kostet mindestens soviel wie die Optik selbst, denn sie muss stabil sein. Sonst würde das Teleskop nach jeder neuen Einstellung „nachzittern“, und man verliert rasch die Freude am Beobachten.

Sobald man ein Objekt eingestellt hat, merkt man, wie es nach wenigen Sekunden langsam aus dem Bild wandert. Man „sieht“ also die Drehung der Erde. Deshalb gibt es eine Nachführung des Teleskops mit kleinen Motoren.

#### 1.3.1 Azimutale Montierung

Die einfachste Art, ein Teleskop zu montieren, um es an jeden Punkt des Himmels auszurichten, ist die azimutale Montierung. Das Teleskop ist dann in zwei Ebenen bewegbar:

- Azimutebene: diese ist parallel zum Horizont. Der Azimutwinkel wird meist von Süden in Richtung Westen gezählt.
- Höhe, sie ist senkrecht zur Horizontebene.

Da die tägliche Bewegung der Sterne am Himmel ein geneigter Kreis ist, muss man im Lauf der Zeit sowohl den Azimut als auch die Höhe korrigieren. Bei mit Motoren nachgeführten Teleskopen errechnet dies ein Computer automatisch. Technisch gesehen ist die azimutale Montierung einfach. Allerdings kommt es im Laufe der Zeit zu einer Drehung des Bildfeldes. Diese Drehung spielt für die Beobachtung mit dem Auge keine Rolle, aber sobald man mit einer Kamera länger als 1 min (je nach Brennweite des Teleskops) belichtet, scheinen die Sterne kleine Kreisbögen zu machen. Die einzige Abhilfe sind

kürzere Belichtungszeiten oder ein relativ teurer Bildfeldrotator, der vor dem Okular angebracht wird und die Bilddrehung kompensiert. Aber Vorsicht! Nicht alle Teleskophersteller bieten einen solchen Rotator an.

### 1.3.2 Parallaktische Montierung

Wenn Sie also vorhaben, mit ihrem Teleskop Himmelsaufnahmen zu machen, dann empfiehlt es sich auf alle Fälle, eine parallaktische Montierung zu wählen. Dabei ist eine Achse parallel zur Erdachse, und deshalb beschreibt das Teleskop einen Kreisbogen, wie es die Sterne auch tun. Der Motor muss das Teleskop nur mehr in einer Ebene nachführen, es gibt keine Bildfelddrehung.

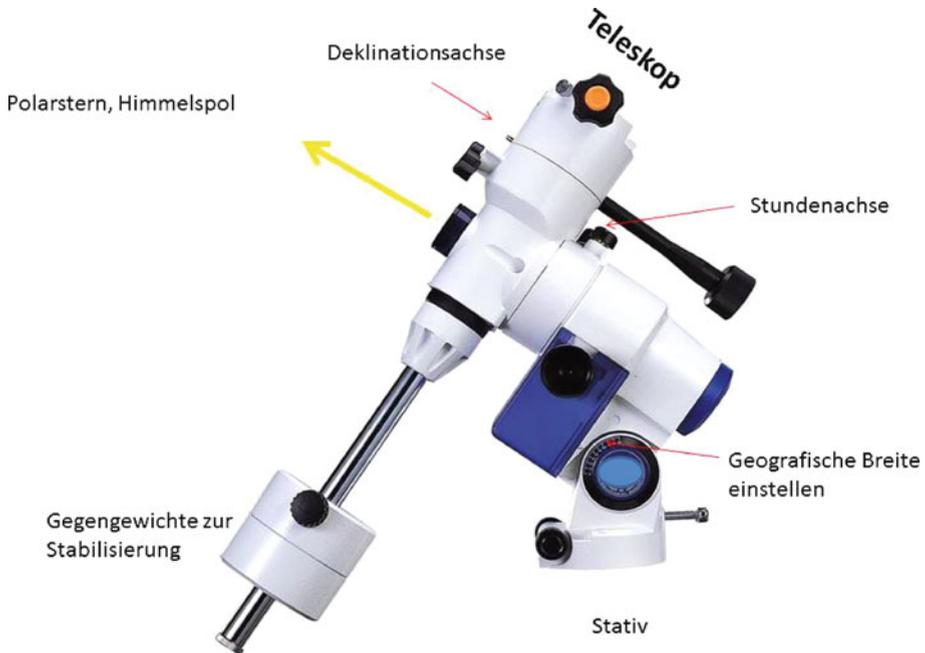
Will man zu guten Aufnahmen kommen, ist eine sehr genaue Ausrichtung des Teleskops notwendig. Es muss genau Nord-Süd aufgestellt werden, wobei eine Achse zum Himmelsnordpol zeigt. Dazu kann man meist in guter Näherung den leicht zu findenden Polarstern wählen.

Die parallel zur Erdachse stehende Achse einer parallaktischen Montierung nennt man auch Stundenachse. Die Nachführung des Teleskops ist nur mehr um die Stundenachse notwendig. Die zweite Achse nennt man Deklinationsachse. Die entsprechenden Koordinaten eines Himmelsobjektes nennt man dann Stundenwinkel und Deklination. Eine Skizze ist in Abb. 1.7 gezeigt. Die Stundenachse zeigt in Richtung Himmelspol (Polarstern).

Mit welcher Geschwindigkeit muss das Teleskop nachgeführt werden? Wir können das leicht ausrechnen. In 24 Stunden dreht sich die Himmelskugel um 360 Grad, d. h., in einer Stunde muss um 15 Grad nachgeführt werden.

Nehmen wir an, wir beobachten ein Objekt ohne Nachführung. Wie lange ist dieses Objekt in unserem Gesichtsfeld zu sehen? Ein Stern legt pro Minute  $1/4$  Grad zurück. Nehmen wir an, das Gesichtsfeld beträgt  $1/4$  Grad Durchmesser. Dem entspricht die halbe Vollmondscheibe. Dies ist eine z. B. für Mondbeobachtungen durchaus sinnvolle Vergrößerung. Dann ergibt sich aus den Angaben, dass ein Objekt, das anfangs in der Mitte des Gesichtsfeldes war, sich bereits nach 30 s am Rand befindet. Aus diesem Beispiel sehen wir auch, dass bereits bei kurzen Belichtungszeiten Sterne ohne Nachführung bzw. bei schlechter Nachführung nicht mehr punktförmig abgebildet werden.

Der Preis einer guten parallaktischen Montierung ist entsprechend hoch, die Nachführgenauigkeit bei teuren Montierungen meist deutlich besser. Sobald aber länger als eine Minute belichtet wird, benötigt man meist eine weitere Korrektur der Nachführung.



**Abb. 1.7** Skizze: Eine parallaktische Montierung. Das Teleskop wird wie oben skizziert auf die Montierung befestigt

### 1.3.3 Autoguiding

Die Nachführung eines Teleskops ist selbst bei teuren Montierungen nicht optimal. Nochmals sei betont, dass für alle, die an Fotografie von Himmelsobjekten interessiert sind, die parallaktische Montierung zu bevorzugen ist. Der Motor der Montierung treibt das Teleskop über Zahnräder und Schneckengetriebe an. Diese besitzen ein Spiel, daher gibt es einen periodisch auftretenden Fehler in der Nachführung. Außerdem sind Teleskope selten wirklich exakt aufgestellt, zeigen also genau nach Süden bzw. sind auf den Himmelsnordpol ausgerichtet. Dies alles führt zu kleinen Nachführfehlern, die bei Beobachtung mit dem Auge kaum bemerkt werden, aber zu verzerrten Sternabbildungen auf Fotografien führen. Deshalb korrigiert diese Fehler das sogenannte Guiding.

Es gibt zwei Methoden für Guiding.

Man bringt vor dem Okular ein Off-Axis-System an, in welchem sich ein kleiner Spiegel befindet, der einen Bruchteil des Lichtes beispielsweise zu einem weiteren Okular ablenkt. Mit diesem Okular, das am besten mit einem beleuchtbaren Fadenkreuz ausgestattet ist, versucht man einen geeigneten Stern zu finden und dann durch ständiges Betätigen der Feinbewegung in Deklinationss- und Stundenachse, den Stern genau im Zentrum des Fa-