# II. Der Weg zum Größten

## 9. Wie man Sternpositionen misst

### 9.1 Festlegung eines Ortes auf einer Kugel

Wenn man einem Fremden den Weg zu einer Arztpraxis erklären will, könnte das in etwa so lauten: "Gehen Sie 500 m in Richtung dieser Strasse, dann biegen Sie nach rechts und folgen der neuen Strasse 200 m bis zu einem roten Haus, dort im zweiten Stock finden Sie die Praxis!" Es sind also drei Angaben nötig, um die Lage der Praxis genau zu beschreiben. Das gilt allgemein: Da unser Raum dreidimensional ist, ist in einem gewählten Koordinatensystem jeder Punkt dieses Raumes durch die Angabe von drei Werten eindeutig festgelegt. Dies können drei Längen sein, aber auch zwei Winkel und eine Länge. Die Position eines Flugzeugs gibt man z.B. durch zwei Winkel, die geographische Länge und Breite des Ortes, über dem es sich gerade befindet, und durch die Höhe über der Erdoberfläche an.

Möchte man einen Ort auf der Erdoberfläche angeben, genügen die beiden Winkel, die geographische Länge $\ell$ ($-180^{o} \leq \ell \leq 180^{o}$) und die geographische Breite b ($-90^{o} \leq b \leq 90^{o}$). Diese sind auf folgende Weise festgelegt. b ist derjenige Winkel, den die Verbindungsgerade zwischen dem betrachteten Ort und dem Erdmittelpunkt mit der Äquatorebene bildet, während $\ell$ der Winkel zwischen den beiden Meridiankreisen durch den betrachteten Ort und durch Greenwich, einem Vorort von London, ist. Hierbei ist die Wahl von Greenwich willkürlich und historisch bedingt.

Auf analoge Weise ist jede Sternposition an der Himmelskugel durch zwei Winkel festgelegt. Aufgrund der Bewegung der Erde hängen diese Winkel jedoch im allgemeinen von der Zeit ab, doch lässt sich ein Koordinatensystem für die Himmelskugel finden, in dem jeder Fixstern - zumindest angenähert - zeitunabhängige Winkelkoordinaten besitzt, das sog. rotierende Äquatorsystem. In diesem System entspricht die Deklination $\delta$ der geographischen Breite. Analog zur geographischen Länge hat man die Rektaszension $\alpha$ definiert, die jedoch nicht in Grad, sondern in Stunden angegeben wird ($360^{o}$ entsprechen 24 h). Der Nullpunkt für $\alpha$ ist der sog. Frühlingspunkt, das ist die Stelle des Himmelsäquators, an der die Sonne zu Frühlingsanfang von der südlichen in die nördliche Hemisphäre übertritt.

Durch die Drehung der Erde verändert sich allerdings die Position der Himmelskörper am Himmel dauernd. Die Astronomen gleichen diesen bei der Beobachtung störenden Effekt dadurch aus, dass das Fernrohr entsprechend montiert und nachgeführt wird.

### 9.2 Einheiten in der Astronomie

Ist man ferner am Abstand eines Sterns von der Erde bzw. Sonne interessiert, so ist zusätzlich eine Längeangabe notwendig.

Zunächst wollen wir aber die Einheiten besprechen, in denen Entfernungen und Winkel gemessen werden. Die Angabe einer physikalischen Größe besteht aus einer Maßzahl und einer Einheit. Ist z.B. eine Entfernung 123 m, dann ist in dieser Angabe m (Meter) die Einheit und 123 die Maßzahl. Man könnte dieselbe Größe auch durch die Angabe

0,123 km oder 123 000 mm ausdrücken. In der Physik versucht man möglichst solche Einheiten zu wählen, bei denen die Maßzahl weder zu groß noch zu klein ist. Da im Weltraum die Abstände sehr groß sind, sind Meter oder Kilometer keine brauchbaren Einheiten. Besser geeignet sind:

| | |
|---|---|
| der Durchmesser der Erde | $D_E$ = 12740 km |
| die Entfernung Erde-Sonne | $R_{ES}$ = 150.000.000 km |
| | = 1 AE ("astronomische Einheit") |
| das Lichtjahr | 1 Lj = 9.500.000.000.000 km = $9{,}5 \cdot 10^{12}$ km |
| das Parsec | 1 pc = 3,26 Lj |

Das Lichtjahr ist eine für die Astronomie interessante Längeneinheit: Es ist diejenige Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt. Man kann auch diese Einheit unterteilen, dann ergeben sich z.B. 1 Lichtmonat, 1 Lichttag, 1 Lichtstunde, 1 Lichtminute, 1 Lichtsekunde usw. So sagt man auch, dass die Erde von der Sonne gerade 500 Lichtsekunden oder etwa 8 Lichtminuten entfernt ist. Das Parsec ist eine in der Astronomie häufig benutzte Längeneinheit.

Winkel misst man meist in Grad. Der Kreisumfang wird in 360 Grad (360°) eingeteilt, jedes Grad in 60 Bogenminuten (60') und jede Minute in 60 Bogensekunden (60") unterteilt.

Zwei Beispiele: Für die Position der Heidelberger Sternwarte findet man die Koordinaten 49° 23,9' nördlicher Breite, 8° 43,3' östlicher Länge und 570 m über dem Meeresspiegel. Aus einer Tabelle der Sternpositionen entnehmen wir für den Polarstern eine Deklination von 89° 2', eine Rektaszension von 1h 48,8m und einen Abstand von 1100 Lj.

## 9.3 Winkelmessung, Genauigkeitsbegrenzung durch Beugung und Luftbewegung

Die Winkelpositionen der Himmelskörper hat man schon im Altertum (zur Zeit des Hellenismus) mit Sextanten vermessen; sie dienten u.a. zur Orientierung in der Seefahrt. Der erste Fixsternkatalog, in dem die Positionen und Helligkeiten von über 1000 Sternen aufgeführt sind, wurde um 150 v. Chr. von dem griechischen Astronomen und Geographen Hipparch zusammengestellt. Dieser Katalog wurde später von Ptolemäus und auch von Kopernikus im wesentlichen übernommen.

Gegen Ende des 16. Jahrhunderts bestimmte der dänische Astronom Tycho Brahe mit einem Mauerquadranten (siehe Abb. 9.1) die Sternpositionen mit einer für die damalige Zeit hervorragenden Genauigkeit von 2'. Galilei hatte dann um 1610 das Linsenfernrohr zur Verfügung, allerdings benutzte er es hauptsächlich für qua-

Abb. 9.1:
Mauerquadrant mit T. Brahe in der Mitte und zwei Assistenten, die ablesen und notieren.

litative Beobachtungen (Struktur der Mondoberfläche, Jupitermonde, Venusphasen). Von Newton stammt das Prinzip des Spiegelteleskops, das auch noch heute der Konstruktion der meisten Fernrohre zugrunde liegt. Beim Spiegelteleskop trifft das einfallende Licht auf einen Hohlspiegel, der in einem Rohr montiert ist und ein Bild des sehr weit entfernten Objekts in der Brennebene entwirft. Dieses wird mit einem Okular visuell beobachtet oder von einer Photoplatte oder CCD Kamera registriert. Es ist wünschenswert, den Durchmesser D der Eintrittsöffnung so groß wie möglich zu machen, da die Helligkeit des Bildes mit $D^2$ zunimmt. Allerdings begrenzen mechanische Probleme die Größe D der Teleskope auf 5 bis 10 m. (Hubble Teleskop im Weltraum: D = 2.4 m, Teleskope der Europäischen Südsternwarte in Chile: D = 8.2 m).
Die Bildschärfe oder das Auflösungsvermögen eines Teleskops wird durch "Beugung" des Lichtes an der Eingangöffnung des Teleskops begrenzt. Man kann sagen, der Lichtstrahl "stößt" sich an der Eingangsöffnung des Rohres und wird in seiner Richtung um einen Winkel $\Delta\varphi \sim \lambda/D$ abgelenkt, worin $\lambda$ die Wellenlänge das Lichtes ist. (Genauer $\Delta\varphi = 0.14''/ D[m]$ für Licht mit $\lambda = 550$ nm). Die prinzipielle Begrenzung der Bildschärfe durch Beugung kann man nur dadurch reduzieren, dass man den Teleskopdurchmesser vergrößert. Turbulenzen in der Luft, die das Licht auf seinem Weg aus dem Weltraum in das Teleskop durchläuft, führen zu einer zusätzlichen Unschärfe des Bildes von etwa 1". Diese Quelle der Unschärfe kann heute beherrscht werden, indem man eine sog. adaptive Optik einsetzt (auf der Südsternwarte) oder das Teleskop im Weltraum (Hubble) positioniert.

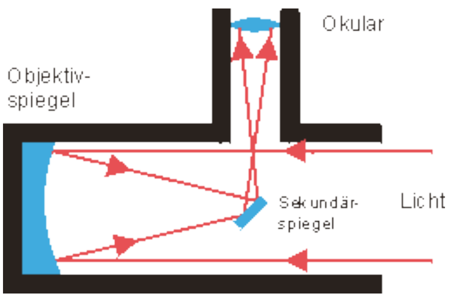


Abb 9.2: Spiegelteleskop. Links: Schematischer Strahlengang, rechts: Foto des Hubble-Teleskops, das nach rechts mit einer Klappe geöffnet ist.

## 9.4 Messung von Abständen durch Triangulation und Radarecho

Wie misst man üblicherweise einen Abstand bzw. eine Entfernung? Man nimmt ein Maßband, legt es an die Strecke und liest die Distanz ab. Ganz offensichtlich ist dieses Verfahren für Abstände im Weltall nicht zu gebrauchen. Auch auf der Erde arbeiten die Landvermesser nicht so, wenn sie z.B. den Abstand zweier Bergspitzen bestimmen wollen. Sie benutzen die Gesetze der Geometrie, in der alle Stücke eines Dreiecks bestimmt sind, wenn man z.B. zwei Winkel und eine Seite kennt: An den beiden Enden einer "Standlinie", die auf dem einem Berg gewählt wird und deren Länge z.B. mit einem Metermass bestimmt werden kann, peilt man die zweite Bergspitze an und bestimmt die beiden Winkel, unter denen die Spitze erscheint. Damit hat man alle Bestimmungstücke für das Dreieck, dessen eine Seite die Standlinie und deren gegenüber liegende Ecke die Spitze des Berges ist, dessen Abstand man messen will. Mit diesem Verfahren, der sog. Triangulation, lässt sich die Entfernung der beiden Bergspitzen berechnen.

Wir haben oben gesehen, dass sich mit Teleskopen Winkel bis auf eine Genauigkeit von einer Bogensekunde messen lassen. Was wählt man nun als Standlinie bei astronomischen Messungen? Pauschal gilt: Je länger die Standlinie desto genauer die Abstandsmessung. Auf der Erde ist die längste Standlinie der Erddurchmesser von etwa 12.000. km. Diese reicht aus, um z.B. die Entfernung zum Planeten Venus durch Triangulation zu messen. Mit Hilfe der Keplerschen Gesetze lässt sich dann auch der Abstand Erde – Sonne, die sogenannte astronomische Einheit (AE) berechnen: ca. 150.000.000 km oder etwa 8 Lichtminuten.

Inzwischen ist es auch gelungen, die Zeit zu messen, die ein Radarimpuls braucht, um bis zur Venus und zurück zu fliegen (Radarecho). Da man die Geschwindigkeit des Radarsignals kennt, nämlich die Lichtgeschwindigkeit, kann man aus der Laufzeit den Abstand Erde-Venus bestimmen. Diese Methode ist deutlich genauer als die Triangulation, jedoch auf die nächsten Planeten begrenzt.

Für größere Abstände benutzt man den Durchmesser der jährlich durchlaufenen Erdbahn als Standlinie. Ein der Erde relativ naher Stern sollte im Verlauf eines Jahres seine Position vor dem Hintergrund der weiter entfernten Sterne periodisch ändern. Eine derartige jährliche "Wanderung" der näheren Fixsterne ist ein Beweis für die Bewegung der Erde um die Sonne und wurde zur Zeit des Kopernikus lange vergeblich gesucht. Erst im Jahre 1838 gelang es Friedrich Wilhelm Bessel, diese jährliche Bewegung eines Fixsterns (61 Cygni) zu messen. Er erhielt für den Winkel p, unter dem vom Stern aus gesehen der Erdbahnhalbmesser erscheint, einen Wert von ca. 1/3 Bogensekunde, was einer Entfernung von ca. 10 Lj entspricht. (Der Abstand der Sonne zum nächsten Fixstern beträgt ca. 4 Lj.)

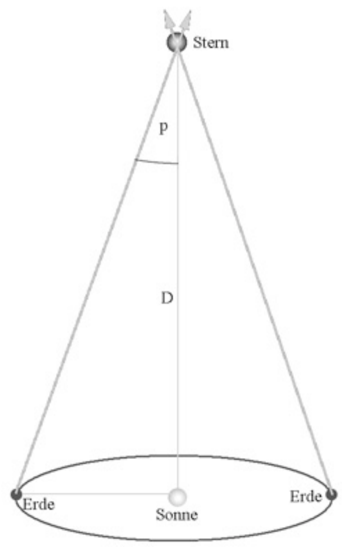


Abb. 9.3:
Bestimmung des Abstandes eines Sterns von der Sonne durch Triangulation mit der Standlinie Erde-Sonne

Man nennt den Winkel p auch Parallaxe und hat hieraus in der Astronomie eine weitere Längeneinheit abgeleitet, das Parsec, abgekürzt pc. Ein Stern hat die Entfernung von d = 1 pc, wenn von ihm aus gesehen der Erdbahnhalbmesser unter einem Winkel von 1" erscheint. Da d und p zueinander umgekehrt proportional sind, gehört zu p = 0,5" eine Entfernung von 2 pc. Heute kann man von der Erde aus eine Genauigkeit von 0,01" erreichen und so durch Triangulation Entfernungen bis zu 100 pc bestimmen. Vom Satelliten Hipparcos aus konnte die Genauigkeit um einen Faktor 10 gesteigert werden, so dass heute durch geometrische Methoden Entfernungen bis zu 1000 pc, das sind ca. 3.300 Lichtjahre bestimmt werden können. Da der Durchmesser der Milchstrasse etwa 60 000 Lj beträgt, ist man mit dieser Methode auf Entfernungsmessungen innerhalb unserer Galaxie beschränkt

## 9.5 Der Stern von Bethlehem

Da dies die letzte Vorlesung vor Weihnachten ist, wollen wir noch kurz berichten, was die Astronomie zu dem Stern von Bethlehem sagen kann. In Matthäus 2.1-2 wird von Weisen aus dem Morgenlande erzählt, die zu Herodes gekommen waren. Sie hatten einen Stern gesehen, aus dessen Erscheinung sie auf die Geburt eines neuen Königs im jüdischen Lande geschlossen hatten. Heute glaubt man, dass es sich bei der erwähnten Himmelserscheinung nicht um einen neuen Stern (z.B. eine Supernova-Explosion) oder einen Kometen, sondern um eine Konjunktion der Planeten Jupiter und Saturn gehandelt hat. Bei einer Konjunktion sieht es von der Erde so aus, dass sich zwei Planeten ganz nahe kommen. Da sich die Planeten aber auf ganz verschiedenen Bahnen bewegen, heißt Konjunktion allerdings nur, dass sie - von der Erde aus gesehen - fast hintereinander stehen. Konjunktionen kommen häufiger vor. Im Jahr 7 v. Chr., so hat man berechnet, standen Jupiter und Saturn dreimal in Konjunktion. Die Konjunktion des Jahres 7 v. Chr. ist auch in dem Almanach des assyrischen Hofes, in dem alle bemerkenswerten Himmelserscheinungen festgehalten worden sind, aufgezeichnet. Die entsprechenden Tontafeln wurden gefunden und übersetzt (A.J. Sachs u. C.B.F. Walker in der Zeitschrift Iraq, Band 46, Jahrgang 1984, Seite 43). In der Hofastrologie wurden die Himmelserscheinungen analysiert, um etwas über die zukünftigen Vorgänge auf der Erde zu erfahren. Jupiter entsprach dem Gott Marduk und Saturn dem Gott Kaimanu. Da die Konjunktion der beiden Sterne in dem Sternbild der Fische stattfand und dieses Sternbild mit dem Westland (heute Syrien und Palästina) in den astrologischen Vorstellungen identifiziert wurde, haben die Hofastrologen sicherlich auf ein wichtiges Ereignis in diesen Ländern geschlossen. Allerdings haben wir über ihre Überlegungen keine Aufzeichnungen. Hat der assyrische Hof auf Grund einer solchen Erscheinung eine Delegation nach dem Westland geschickt? Das sei unüblich gewesen, so erfuhren wir von dem Heidelberger Assyriologen Prof. S. Maul. Deshalb stehen die Weisen aus dem Morgenlande vielleicht für die Information, die vom assyrischen Hof aus dem Morgenlande nach Palästina kam. Übrigens ist das Datum der Geburt Christi unsicher. Da Herodes schon um 4 v.Chr. gestorben ist, muss man Christi Geburt auf die Zeit vor 4 v.Chr. datieren, wenn die biblischen Angaben über den König Herodes stimmen. Das würde dann auch mit der astronomischen Information besser übereinstimmen.

### Umrechnungsfaktoren zwischen den Längeneinheiten der Astronomie

Lichtgeschwindigkeit c = 300.000 km/s

1 Lj = 365·24·3600 s ·300.000 km/s = 9,5 $10^{12}$ km
1 AE = 150.000.000 km = 500 Ls = 8,3 Lm
1 pc = 1 AE/(tan 1") = 206.000 AE = 3,3 Lj = 3,1 $10^{13}$ km