

1. Einführung

Die Astronomie, die Stern- oder Himmelskunde, ist eine exakte Naturwissenschaft. Sie befaßt sich mit dem quantitativen Studium des Kosmos und der in ihm herrschenden Gesetze, mit den Bewegungen, der physikalischen Beschaffenheit, der Entstehung und der Entwicklung der verschiedenartigen Himmelskörper.

Die Astronomie zählt zu den ältesten Wissenschaften. Bereits bei den alten Kulturvölkern, deren frühe Astronomie noch eng verwoben ist mit magischen, mythologischen, religiösen und philosophischen Vorstellungen, wird das Wissen um die Himmelserscheinungen und die Sammlung astronomischer Daten angewendet bei der Aufstellung des Kalenders, bei der Zeitberechnung und bei der Navigation.

Die Erforschung des Kosmos im modernen Sinne geht jedoch erst auf die Griechen der Antike zurück: Die Messung von Entfernungen auf der Erde und von Positionen am Himmel führt in Verbindung mit den Gesetzen der Geometrie zu einer ersten Vorstellung von Größen und Entfernungen im Weltraum. Die komplizierten Bahnen von Sonne, Mond und Planeten erhalten eine mathematisch-kinematische Deutung, die auch die Vorausberechnung der Planetenpositionen gestattet. Die griechische Astronomie findet ihre krönende Zusammenfassung – und ihren Ausklang – in dem eindrucksvollen Werk des Ptolemäus um 150 n.Chr. Zu Recht leitet sich die Bezeichnung der Wissenschaft von den Sternen, Astronomie, vom griechischen *ἀστήρ* = Stern bzw. *ἄστρον* = Sternbild, Gestirn ab.

Mit dem Beginn der Neuzeit setzt sich das kopernikanische Weltbild im 16./17. Jahrhundert durch. Die Himmelsmechanik erhält durch Newtons Gravitationstheorie im 17. Jahrhundert ihre physikalische Begründung und erreicht in der nachfolgenden Zeit ihre mathematische Vollendung. Bedeutende Fortschritte in der astronomischen Forschung werden zum einen durch neue Begriffe und theoretische Ansätze erreicht, zum anderen durch die Beobachtung neuartiger Phänomene im Kosmos. Dazu trägt die Entwicklung neuer Instrumente entscheidend bei. So führt die Erfindung des Fernrohrs zu Beginn des 17. Jahrhunderts zu einer ungeahnten Erweiterung der astronomischen Kenntnis. Später leiten u. a. die photographische Platte, der Spektrophotograph, das Radioteleskop und die Raumfahrt, welche

der astronomischen Beobachtung den ganzen elektromagnetischen Spektralbereich erschließt, neue Epochen der Forschung ein.

Im 19. und vor allem im 20. Jahrhundert übernimmt die Physik die entscheidende Rolle bei der Deutung der astronomischen Phänomene, die Astrophysik tritt in steigendem Maße gegenüber der „klassischen Astronomie“ in den Vordergrund. Zwischen Astronomie bzw. Astrophysik und Physik besteht eine enge fruchtbare Wechselwirkung. Einerseits ist die Astronomie auf den Kosmos angewandte Physik, wobei es kaum eine physikalische Disziplin gibt, die nicht in der heutigen Astronomie ihre Anwendung findet; andererseits bietet der Kosmos mit oft extremen Zuständen die Gelegenheit, physikalische Prozesse unter Bedingungen zu studieren, die in irdischen Laboratorien nicht erreicht werden können. Neben der Physik – und natürlich der Mathematik – spielen in geringerem Umfang auch Anwendungen der Chemie sowie der Geo- und Biowissenschaften in der Astronomie eine Rolle.

Unter den Naturwissenschaften zeichnet sich die Astronomie durch eine charakteristische Besonderheit aus: Mit den fernen Himmelskörpern können keine Experimente durchgeführt werden, der Astronom muß sich mit dem *Beobachten* begnügen. Die „Ferndiagnose“ und besonders die quantitative Analyse der Strahlung aus dem Kosmos in einem möglichst weiten Spektralbereich nimmt daher einen zentralen Platz in der Astronomie ein.

Die steile Entwicklung in vielen verschiedenen Bereichen astronomischer Forschung hält bis in die jüngste Zeit weiter an. Mit der vorliegenden Neubearbeitung des „Neuen Kosmos“ soll dieser Vermehrung astronomischer Kenntnis Rechnung getragen werden und nach wie vor – in überschaubarem Umfang – eine zusammenhängende Einführung in das *Gesamtgebiet* der Astronomie gegeben werden. Hierbei stellen wir die Beobachtung der vielfältigen Objekte und Vorgänge im Kosmos sowie die Grundgedanken aus den verschiedenen Bereichen mit ihren Zusammenhängen in den Vordergrund; wir verbinden die Beschreibung der Beobachtungen möglichst gleich mit den theoretischen Ansätzen zu ihrer Deutung. Einzelergebnisse wie auch Ergebnisse aus der Physik und anderen Naturwis-

senschaften, die zum Verständnis der astronomischen Phänomene benötigt werden, sind hingegen häufig ohne ausführliche Begründung einfach aufgeführt. Ein umfangreiches Literaturverzeichnis zusammen mit einer Aufstellung wichtiger Nachschlagewerke, Fachzeitschriften usw. soll den Einstieg in die weiterführende, speziellere Literatur erleichtern.

Wir beginnen das Studium des Kosmos, seiner Strukturen und Gesetze bei uns „zu Hause“ und befassen uns in Teil I mit der *klassischen Astronomie* und mit unserem *Planetensystem*. Dieser Teil und die weiteren drei Teile werden jeweils durch einen historischen Abriss eingeleitet, welcher die Übersicht erleichtern soll. Wir machen uns zunächst mit der Beobachtung an der Himmelskugel und mit den Bewegungen von Erde, Sonne und Mond vertraut und führen Himmelskoordinaten und die astronomische Zeitmessung ein. Die scheinbaren Bewegungen der Planeten und anderen Himmelskörper finden dann ihre Deutung im Rahmen der Newtonschen Gravitationstheorie. Bevor wir uns den Körpern im Planetensystem im einzelnen zuwenden, geben wir noch einen Überblick über die Entwicklung der Weltraumforschung, durch die gerade die Kenntnis unseres Planetensystems eine starke Erweiterung erfahren hat. Teil I endet mit der Diskussion der einzelnen Planeten, ihrer Monde und weiterer Kleinkörper wie Planetoiden, Kometen und Meteorite.

Vor dem Studium der Sonne und der Sterne scheint es angebracht, in Teil II zunächst einige *Grundlagen* zur Beschreibung der *Materie* und der *Strahlung* und ihrer Wechselwirkung aufzuführen und dann die Grundprinzipien der astronomischen *Beobachtungsmethoden* im Zusammenhang darzustellen. Dem heutigen Astronomen steht eine eindrucksvolle Vielfalt von Teleskopen und Detektoren zur Verfügung, mit denen er – erdgebunden und vom Weltraum aus – unterstützt von Computern die Strahlung der Himmelskörper im gesamten Spektrum, von der Radiofrequenzstrahlung über den infraroten, den optischen und den ultravioletten Bereich zu den hochenergetischen Röntgen- und Gammastrahlen, erforschen kann.

Teil III ist dann den *Sternen* gewidmet, welche hier zunächst als Individuen behandelt werden. Wir verschaffen uns eine Übersicht über die verschiedenen Sterntypen, wie Hauptreihensterne, Riesen- und Überriesen, Braune Zwerge, Weiße Zwerge und

Neutronensterne, sowie die Mannigfaltigkeit der veränderlichen Sterne (Cepheiden, magnetische Sterne, Novae, Supernovae, Pulsare, Gammaquellen, . . .) und deren stellare Aktivität und lernen deren Entfernungen, Helligkeiten, Farben, Temperaturen, Leuchtkräfte und Massen kennen. Eine besondere Rolle nimmt hierbei die *Sonne* ein: zum einen bietet sie als der uns nächste Stern die Möglichkeit, unvergleichbar mehr Einzelheiten zu beobachten als bei jedem anderen Stern, zum anderen ist sie nach ihren Eigenschaften ein „durchschnittlicher“ Stern und gibt uns daher wichtige Aufschlüsse über den physikalischen Zustand aller Sterne. Die Behandlung der *Physik des Einzelsterns* nimmt einen wesentlichen Teil des Teil III ein. Neben der Strahlungstheorie bildet insbesondere die Atomspektroskopie die Grundlage, um die Strahlung bzw. die Spektren von Sonne und Sternen quantitativ zu deuten und die physikalisch-chemische Struktur ihrer äußeren Schichten, der Sternatmosphären, zu ermitteln. Für das Sterninnere, seinen Aufbau und dessen zeitliche Änderung oder Entwicklung ist die Kenntnis der Energieerzeugung durch thermische Kernreaktionen sowie der Gravitationsenergie von entscheidender Bedeutung.

Wir diskutieren anschließend die Entwicklung der Sterne von der Hauptreihe, der Phase des zentralen Wasserstoffbrennens, bis hin zu ihren Endstadien (Weißer Zwerg, Neutronenstern oder Schwarzes Loch). Ihre Entstehung und die frühesten Entwicklungsphasen besprechen wir erst im folgenden Teil im Zusammenhang mit dem interstellaren Medium in unserer Milchstraße. Am Ende des Teil III befassen wir uns noch mit starken Gravitationsfeldern, die wir im Rahmen von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie beschreiben, und lernen insbesondere Schwarze Löcher, Gravitationslinsen und Gravitationswellen kennen.

In Teil IV befassen wir uns mit den *Sternsystemen* und dem großräumigen Aufbau des *Kosmos*. Mit unserer Kenntnis der Einzelsterne und ihrer Entfernungen behandeln wir zunächst die Sternhaufen und Sternassoziationen. Dann besprechen wir die dünne, gas- und staubförmige interstellare Materie und die Sternbildung. Schließlich gewinnen wir ein Bild von unserem eigenen Milchstraßensystem, dem die Sonne mit etwa 100 Milliarden Sternen angehört, mit der Verteilung und den Bewegungen seiner Sterne und des interstellaren Gases.

Nachdem wir die Methoden zur Bestimmung der riesigen Entfernungen im Kosmos kennengelernt haben, wenden wir uns anderen Milchstraßensystemen oder Galaxien zu, unter welchen wir sehr unterschiedliche Typen finden: Spiralförmige und Elliptische Galaxien, Infrarot- und Starburst-Galaxien, Radiogalaxien und die fernen Quasare. In den Zentren vieler Galaxien beobachten wir eine „Aktivität“ von gewaltigen zutage tretenden Energiebeträgen, deren Ursprung im einzelnen noch rätselhaft ist.

Galaxien gehören in der Regel größeren Systemen an, den Galaxienhaufen. Diese ordnen sich wiederum zu Haufen von Galaxienhaufen, den Superhaufen, welche schließlich als großräumige Struktur des Kosmos ein „netzartiges Gerüst“, das große galaxienfreie Räume umschließt, bilden. Wie die einzelnen Sterne, so verändern sich auch die Galaxien und Galaxienhaufen mit

der Zeit. Bei ihrer Entwicklung spielt die gegenseitige gravitative Beeinflussung der Galaxien eine wichtige Rolle.

Nachdem wir die verschiedenen Sternsysteme kennengelernt haben, betrachten wir den *Kosmos als Ganzes*, seinen Materie-, Strahlungs- und Energieinhalt, seinen Aufbau und seine Entwicklung während der Expansion vom Urknall vor 10 bis 20 Milliarden Jahren bis heute.

Schließlich kehren wir – nachdem wir bis in die Weite des Kosmos vorgedrungen sind – am Ende des Teil IV zurück zu unserem Sonnensystem und befassen uns mit den Problemen der *Entstehung* und *Entwicklung* der *Sonne* und der *Planeten* sowie auch die Existenz von Planetensystemen bei anderen Sternen. Hierbei interessieren wir uns besonders für die Entwicklung der Erde und des Lebens.



**Klassische
Astronomie
und das
Planetensystem**

Sterne und Menschen: Beobachten und Denken

Historische Einleitung in die klassische Astronomie

Unbeeinflusst vom Menschen ziehen die Gestirne seit Jahrtausenden ihre Bahnen. Der gestirnte Himmel bildete deshalb seit jeher ein Symbol für das „Andere“ – die Natur, die Gottheit – den Gegenpol des „Ich“ mit seiner Welt des inneren Erlebens, Wünschens und Schaffens. Die Geschichte der Astronomie bildet gleichzeitig eines der erregendsten Kapitel in der Geschichte des menschlichen Geistes. Immer wieder greifen ineinander einerseits die Entstehung neuer *Denkformen* und andererseits die Entdeckung neuer *Phänomene*, oft mittels neuartiger *Instrumente*.

Wir können hier nicht die großen Leistungen der Völker des alten Orients besprechen, der Sumerer, Babylonier, Assyrer und Ägypter. Auch auf eine Darstellung der – in ihrem Sinne – hochentwickelten Astronomie der Völker des fernen Ostens, der Chinesen, Japaner und Inder müssen wir verzichten.

Der Begriff des *Kosmos* und seine Erforschung in unserem Sinne gehen zurück auf die *Griechen*, die es als erste wagten, alle dumpfe Magie abzuschüteln und – unterstützt von einer unglaublich wendigen Sprache – gedankliche Formen zu prägen, die es erlaubten, Stück für Stück die kosmischen Erscheinungen zu „verstehen“.

Wie kühn sind die Gedanken der Vorsokratiker! Thales von Milet war sich um 600 v. Chr. offenbar schon im klaren darüber, daß die Erde rund sei, daß der Mond von der Sonne beleuchtet würde, und er hat die Sonnenfinsternis des Jahres 585 v. Chr. vorhergesagt. Aber ist es nicht ebenso wichtig, daß er versuchte, das gesamte Weltall auf *ein* Prinzip, nämlich „das Wasser“, zurückzuführen?

Das wenige, was wir von Pythagoras (um die Mitte des 6. Jahrhunderts v. Chr.) und seiner Schule wissen, mutet erstaunlich modern an. Hier ist schon von der Kugelgestalt der Erde, des Mondes und der Sonne, von der Drehung der Erde und vom Umlauf zumindest der beiden inneren Planeten Merkur und Venus um die Sonne die Rede.

Als nach dem Zerfall der griechischen Staaten die Wissenschaft in Alexandria eine neue Heimat gefunden hatte, machte dort die quantitative Erforschung

der Himmelsräume anhand systematischer Messungen rasche Fortschritte. Wir sollten dabei weniger auf die zahlenmäßigen Ergebnisse sehen, als mit Freude vermerken, daß die großen griechischen Astronomen es überhaupt wagten, *geometrische Sätze* auf den Kosmos anzuwenden! Aristarch von Samos, der in der ersten Hälfte des 3. Jahrhunderts v. Chr. lebte, versuchte die *Entfernungen* Sonne–Erde und Mond–Erde sowie die *Durchmesser* der drei Himmelskörper zahlenmäßig miteinander zu vergleichen, indem er davon ausging, daß im ersten und dritten Mondviertel das Dreieck Sonne–Mond–Erde am Mond einen rechten Winkel hat. Neben diesen ersten Messungen *im* Weltraum hat Aristarch als erster das *heliocentrische Weltsystem* gelehrt und dessen schwerwiegende Konsequenz durchschaut, daß die Entfernungen der Fixsterne ungeheuer viel größer sein müßten als die von der Sonne und der Erde. Wie weit er damit seiner Zeit voraus war, sieht man am besten daran, daß schon die folgende Generation seine große Entdeckung wieder vergaß. Bald nach Aristarchs bedeutenden Arbeiten hat Eratosthenes zwischen Alexandria und Syene die erste Gradmessung ausgeführt: Er verglich den Breitenunterschied der beiden Orte mit ihrer Entfernung längs einer viel benutzten Karawanenstraße und bestimmte so schon ziemlich genau Umfang und Durchmesser der Erde. Der größte Beobachter des Altertums aber war Hipparch (um 150 v. Chr.), dessen *Sternkatalog* noch im 16. Jahrhundert an Genauigkeit kaum übertroffen war. Wenn auch seine Hilfsmittel naturgemäß nicht ausreichten, um die fundamentalen Größen des Planetensystems entscheidend zu verbessern, so gelang ihm doch die wichtige Entdeckung der *Präzession*, d. h. des Vorrückens der Tagundnachtgleichen und damit des Unterschiedes von tropischem und siderischem Jahr.

Die Theorie der *Planetenbewegung*, von der wir nun sprechen wollen, mußte im Rahmen der griechischen Astronomie naturgemäß ein *geometrisch-kinematisches* Problem bleiben. Allmähliche Verbesserung und Erweiterung der Beobachtungen auf der einen Seite und die Herausbildung neuer mathematischer An-

sätze auf der anderen Seite bilden die Grundelemente, aus denen Philolaus, Eudoxus, Heraklid, Apollonius und andere eine Darstellung der beobachteten Planetenbewegungen durch Ineinanderfügen immer komplizierterer Kreisbewegungen anstrebten. Ihre abschließende Form erhielten die antike Astronomie und Planetentheorie erst viel später durch Claudius Ptolemäus, der um 150 n. Chr. in Alexandria sein Handbuch der Astronomie (Mathematik) in 13 Büchern *Μαθηματικῆς Συναξέως* schrieb. Später erhielt die Syntaxis das Beiwort *μεγίστη* (größte), woraus der arabische Titel des *Almagest* entstand. Der Inhalt des *Almagest* beruht weitgehend auf den Beobachtungen und Forschungen des Hipparch, doch hat Ptolemäus insbesondere in der Theorie der Planetenbewegung auch Neues hinzugefügt. Das geozentrische Weltsystem des Ptolemäus brauchen wir vorerst nur in Umrissen zu skizzieren: Die Erde ruht in der Mitte des Weltalls. Die Bewegungen von Mond und Sonne am Himmel lassen sich noch ziemlich einfach durch Kreisbahnen darstellen. Die Bewegungen der Planeten beschreibt Ptolemäus mit Hilfe der *Epizykel-Theorie*: Der Planet läuft auf einem Kreis um, dem Epizykel, dessen immaterieller Mittelpunkt auf einem zweiten Kreis, dem Deferenten, sich um die Erde bewegt. Die Verfeinerungen dieses Systems durch Einführung weiterer, auch exzentrischer Kreise usw. wollen wir hier nicht erörtern. Der *Almagest* zeigt in seiner geistigen Haltung deutlich den Einfluß der aristotelischen Philosophie oder – besser gesagt – des *Aristotelismus*. Dessen Denkschemata, die aus Werkzeugen lebendiger Forschung längst zu Dogmen einer erstarrten Lehre geworden waren, dürften zu der erstaunlichen historischen Dauerhaftigkeit des ptolemäischen Weltsystems nicht unwesentlich beigetragen haben.

Wir können hier nicht im einzelnen berichten, wie nach dem Verfall der Akademie in Alexandria zunächst die nestorianischen Christen in Syrien und dann die Araber in Bagdad das Werk des Ptolemäus übernahmen und weiterbildeten.

Übersetzungen und Kommentare des *Almagest* bildeten die wesentlichen Quellen des ersten abendländischen Lehrbuches der Astronomie, des *Tractatus de Sphaera* von Ioannes de Sacrobosco, einem gebürtigen Engländer, der bis zu seinem Tode im Jahre 1256 an der Universität Paris lehrte. Die *Sphaera* wurde immer wieder neu herausgegeben und kommentiert; noch

zu Galileis Zeiten war sie *der* „Text“ im akademischen Unterricht.

Die geistigen Hintergründe des neuen Denkens waren bestimmt zum Teil dadurch, daß nach der Eroberung von Konstantinopel durch die Türken (1453) viele wissenschaftliche Werke aus der Antike dem Abendlande durch byzantinische Gelehrte zugänglich gemacht wurden. Einige sehr bruchstückhafte Überlieferungen über die heliozentrischen Systeme der Antike haben Kopernikus offenbar stark beeindruckt. Sodann bemerken wir ein Abgehen von der erstarrten Doktrin der Aristoteliker und eine Hinwendung zu dem viel lebendigeren Denken im Sinne der Pythagoräer und Platos. Die „platonische“ Vorstellung, daß der Vorgang der Erkenntnis in einer fortschreitenden Anpassung unserer inneren Welt der Begriffe und Denkformen an die immer vollständiger durchforschte äußere Welt der Erscheinungen bestehe, ist seit Cusanus über Kepler bis Niels Bohr Gemeingut aller bedeutenden Forscher der Neuzeit gewesen. Endlich war mit dem Emporblühen des Handwerks die Frage nicht mehr „was sagt Aristoteles?“, sondern „wie macht man . . . ?“.

Im 15. Jahrhundert zeigt sich mit einem Mal – zunächst in Italien und bald auch im Norden – ein ganz neuer Geist in Wissenschaft und Leben. Die tiefsinnigen Meditationen des Kardinals Nicolaus Cusanus (1401 bis 1464) beginnen wir erst heute wieder zu würdigen. Es ist höchst interessant zu sehen, wie bei ihm Ideen über die Unendlichkeit der Welt und über quantitative Naturforschung aus dem religiösen bzw. theologischen Nachdenken entspringen. Gegen Ende des Jahrhunderts (1492) schon folgt die Entdeckung Amerikas durch Christoph Columbus, der dem neuen Weltgefühl den klassischen Ausdruck gab „il mondo e poco“. Wenige Jahre später begründete Nicolaus Kopernikus (1473–1543) das *heliozentrische Weltsystem*.

Kopernikus sandte um 1510 an mehrere namhafte Astronomen in Briefform den erst 1877 wieder aufgefundenen „Kleinen Kommentas“ *De Hypothesibus Motuum Caelestium A Se Constitutis*, *Commentariolus*, welcher schon die meisten Ergebnisse des erst 1543, im Todesjahr des Kopernikus, in Nürnberg gedruckten Hauptwerkes *De Revolutionibus Orbium Coelestium* enthält.

An der für die ganze Antike und das Mittelalter verbindlichen Idee von der „Vollkommenheit der Kreis-

bewegung“ hat Kopernikus zeitlebens festgehalten und andere Bewegungen nie in Betracht gezogen.

Erst Johannes Kepler (1571–1630) gelang es – ausgehend von pythagoräisch-platonischen Traditionen – sich zu einem allgemeineren Standpunkt „mathematisch-physikalischer Ästhetik“ aufzuschwingen. Ausgehend von den alles bisherige an Genauigkeit weit übertreffenden Beobachtungen Tycho Brahes (1546–1601) entdeckte er seine drei *Planetengesetze*. Die beiden ersten Gesetze hat Kepler durch eine ungeheuer mühevoll trigonometrische Durchrechnung der Marsbeobachtungen T. Brahes in der *Astronomia Nova* (Prag 1609) gefunden. Das dritte Keplersche Gesetz ist in den *Harmonices Mundi* (1619) mitgeteilt. Keplers grundlegende Schriften zur Optik, das Keplersche Fernrohr, die Rudolphinischen Tafeln (1627) u.v.a. können wir nur erwähnen.

Um dieselbe Zeit richtete in Italien Galileo Galilei (1564–1642) das 1609 von ihm erbaute *Fernrohr* an den Himmel und entdeckte kurz nacheinander: die „Maria“, die Krater und andere Gebirgsformationen auf dem Mond, die vielen Sterne in den Plejaden und Hyaden, die vier großen Jupitermonde und ihren freien Umlauf um den Planeten, die erste Andeutung des Saturnrings und die Sonnenflecken. Galileis *Sidereus Nuncius* (1610), in dem er seine Entdeckungen mit dem Fernrohr beschreibt, der *Dialogo Delli Due Massimi Sistemi Del Mondo, Tolemaico, e Copernicano* (1632) und die nach seiner Verurteilung durch die Inquisition entstandenen *Discorsi E Dimostrazioni Matematiche Intorno A Due Nuove Scienze* (1638), mit den Anfängen der theoretischen Mechanik, sind nicht nur wissenschaftliche, sondern in der Darstellung auch künstlerische Meisterwerke. Die Beobachtungen mit dem Fernrohr, die Beobachtungen der Supernovae von 1572 durch Tycho Brahe und von 1604 durch Kepler und Galilei, endlich die Erscheinungen mehrerer Kometen förderten die vielleicht wesentlichste Erkenntnis jener Zeit, daß nämlich – im Gegensatz zur Meinung der Aristoteliker – *kein* grundsätzlicher Unterschied bestehe zwischen himmlischer und irdischer Materie und daß *dieselben Naturgesetze* im Bereich der *Astronomie* und der *terrestrischen Physik* gelten (bezüglich der Geometrie hatten dies schon die Griechen erkannt). Dieser Gedanke – erst der Rückblick auf Kopernikus macht uns seine Schwierigkeit klar – beflügelte den enormen Aufschwung der Naturforschung im Anfang des 17. Jahrhunderts.

Auch W. Gilberts Untersuchungen über Magnetismus und Elektrizität, Otto v. Guericke's Versuche mit der Luftpumpe und der Elektrisiermaschine und vieles andere gehen aus von dem Wandel des astronomischen Weltbildes.

Wir können hier nicht die vielen Beobachter und Theoretiker würdigen, welche die neue Astronomie ausgebaut haben, unter denen so bedeutende Köpfe wie J. Hevelius, Chr. Huygens, E. Halley hervorrangen.

Eine ganz neue Epoche der Naturforschung beginnt mit Isaac Newton (1642–1727). Sein Hauptwerk *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687) stellt zunächst mit Hilfe der hierzu geschaffenen Infinitesimal-(Fluxions-)rechnung die theoretische *Mechanik* auf eine sichere Grundlage. Deren Verbindung mit dem *Gravitationsgesetz* erklärt die Keplerschen Gesetze und begründet mit einem Schläge die gesamte terrestrische und *Himmelsmechanik*. Im Bereich der Optik erfindet er das Spiegelteleskop und diskutiert die Interferenzerscheinungen der „Newtonschen Ringe“. Fast nebenbei entwickelt Newton die grundlegenden Ansätze für viele Zweige der theoretischen Physik.

Ihm vergleichen können wir nur den *Principes Mathematicorum*, Carl Friedrich Gauß (1777–1855), dem die Astronomie die Theorie der *Bahnbestimmung*, wichtige Beiträge zur *Himmelsmechanik* und höheren Geodäsie sowie die Methode der kleinsten Quadrate verdankt. Nie wieder hat ein Mathematiker eine solche Treffsicherheit im Entwurf neuer Forschungsgebiete mit einer so eminenten Geschicklichkeit in der Durchrechnung spezieller Probleme vereinigt.

Wir können hier auch nicht die Leistungen der großen Himmelsmechaniker von L. Euler über J. L. Lagrange und P.-S. Laplace bis H. Poincaré würdigen. Hingegen sollten wir zum Abschluß dieser Übersicht noch kurz auf die Entdeckungen der weiteren, über die Kenntnis der Antike hinausgehenden Planeten eingehen.

Völlig überraschend wurde 1781 *Uranus* von W. Herschel entdeckt. In der Lücke zwischen Mars und Jupiter (Abb. 2.15) vermutete schon Kepler einen Himmelskörper. G. Piazzi entdeckte dann am 1.1.1801 als ersten Planetoiden die *Ceres*; aber Mitte Februar ging sie in Sonnennähe „verloren“. Schon im Oktober desselben Jahres hatte der 24jährige C. F. Gauß ihre Bahn und Ephemeride berechnet, so daß F. Zach sie wieder auffinden konnte. Im Anschluß an diese mathematische Leistung löste Gauß das allgemeine Problem der

Bahnbestimmung eines Planeten usw. aus drei vollständigen Beobachtungen. Heute sind mehrere tausend Planetoiden, meist zwischen Mars und Jupiter bekannt (Abschn. 3.3).

Aus Störungen der Uranusbahn schlossen J. C. Adams und J. J. Leverrier auf einen Planeten noch längerer Umlaufzeit und berechneten seine Bahn und Ephemeride. Nahe der vorausberechneten Position fand J. G. Galle 1846 den *Neptun*.

Störungen der Bahnen von Uranus und Neptun führten zur Vermutung eines transneptunischen Planeten. Die langjährige Suche, an der P. Lowell († 1916) maß-

geblichen Anteil hatte, führte schließlich zum Erfolg: C. Tombaugh entdeckte 1930 am Lowell Observatory den *Pluto* als „Sternchen“ 15. Größe.

Ausgedehnte Suchprogramme nach einem „Planeten X“ jenseits von Pluto blieben erfolglos. Es gibt *keine* Anzeichen für einen weiteren „größeren“ Planeten. Jedoch gelang 1992 D. Jewitt und J. Luu die Entdeckung eines *kleinen* Körpers (von etwa 200 km Durchmesser) auf einer exzentrischen Bahn mit einer großen Halbachse von 44 AE. In rascher Folge konnten anschließend weitere „Planeten“ jenseits der Bahnen von Neptun und Pluto gefunden werden.

Himmelskugel. An der Himmelskugel (mathematisch gesprochen: der unendlich fernen Kugel, auf die wir die Sterne projiziert sehen) kennzeichnen wir noch (Abb. 2.2):

1. Den *Horizont* mit den Himmelsrichtungen Nord, West, Süd, Ost.
2. Senkrecht über uns den *Zenit*, unter uns den *Nadir*.
3. Durch Himmelspol, Zenit, Südpunkt, Nadir und Nordpunkt geht der *Meridian*.
4. Durch Zenit, West- und Ostpunkt (also senkrecht zum Horizont und Meridian) verläuft der *Erste Vertikal*.

In dem so festgelegten Koordinatensystem beschreiben wir die momentane Stellung eines Sternes durch Angabe zweier Winkel (Abb. 2.2): (a) Das *Azimuth* wird gerechnet längs des Horizontes in Richtung SWNO, die Zählung beginnt man teils am S-, teils am N-Punkt. (b) Die *Höhe* = $90^\circ - \text{Zenitdistanz}$.

Die Himmelskugel dreht sich scheinbar täglich mit allen Sternen um die *Himmelsachse* (durch den Nord- und Südpol des Himmels). Senkrecht zur Himmelsachse steht der *Himmelsäquator*. Die *Lage* (Position) eines Sternes (zum folgenden vgl. Abb. 2.3) auf der unendlich fern gedachten Himmelskugel beschreiben wir nun zu einem bestimmten Zeitpunkt durch

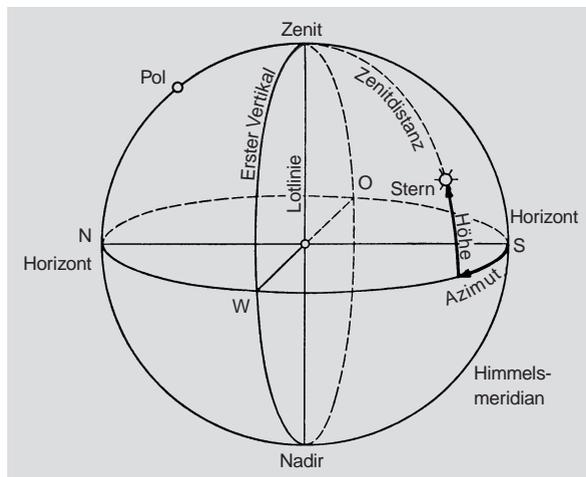


Abb. 2.2. Die Himmelskugel. Horizont mit Nord-, Ost-, Süd- und Westpunkt. Durch Nordpunkt, (Himmels-)Pol, Zenit, Südpunkt und Nadir geht der (Himmels-)Meridian. – Koordinaten: Höhe und Azimut

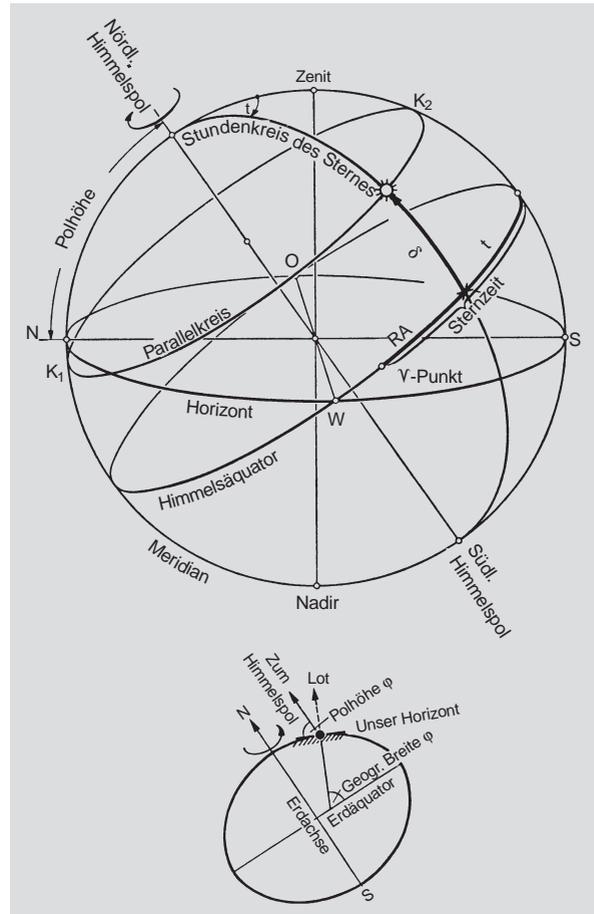


Abb. 2.3. Himmelskoordinaten: Rektaszension RA und Deklination δ . Stundenwinkel t = Sternzeit minus Rektaszension RA. K_1 = untere Kulmination, K_2 = obere Kulmination. Rechts unten: Die Erde (Abplattung übertrieben). Polhöhe = geographische Breite φ

die *Deklination* δ – vom Äquator aus positiv zum Nordpol und negativ zum Südpol hin gezählt – und den *Stundenwinkel* t – vom Meridian aus im Sinne der täglichen Bewegung, d. h. über W, gezählt.

Im Laufe eines Tages durchläuft also ein Stern an der Sphäre einen Parallelkreis; im Meridian erreicht ein Stern seine größte Höhe bei der *Oberen Kulmination*, die kleinste Höhe bei der *Unteren Kulmination*.

Sternzeit. Auf dem Himmelsäquator markieren wir ferner den Widderpunkt, den wir im folgenden Abschnitt erklären werden als den Ort der Sonne zur

Zeit der Frühlings-Tagundnachtgleiche, des Frühlings-äquinoktiums (21. März). Sein Stundenwinkel gibt die Sternzeit τ an.

Himmelskoordinaten. Nunmehr können wir die Stellung eines Gestirnes an der Himmelsphäre unabhängig von der Tageszeit kennzeichnen: Wir nennen den Bogen des Äquators vom Widderpunkt bis zum Stundenkreis eines Sternes dessen *Rektaszension* RA oder gerade Aufsteigung. Man rechnet sie in Stunden, Minuten und Sekunden. 24 h (hora) entsprechen 360° bzw.

$$1 \text{ h} = 15^\circ, \quad 1 \text{ min} = 15', \quad 1 \text{ s} = 15'', \\ 1^\circ = 4 \text{ min}, \quad 1' = 4 \text{ s}.$$

Aus Abb. 2.3 liest man leicht die Beziehung ab:

$$\text{Stundenwinkel } t = \text{Sternzeit } \tau \quad (2.1) \\ \text{minus Rektaszension } RA.$$

Die Deklination δ , unsere zweite Sternkoordinate, haben wir oben schon eingeführt.

Will man ein Teleskop auf einen bestimmten Stern oder einen Planeten usw. richten, so entnimmt man aus einem Sternkatalog Rektaszension RA und Deklination δ , liest von der Sternzeituhr die Sternzeit τ ab und stellt den nach (Abb. 2.1) berechneten Stundenwinkel t sowie die Deklination δ (+ nördlich, – südlich) ein. Die besonders genau bestimmten Positionen der *Fundamentalsterne* (insbesondere für die Zeitbestimmung, s. Abschn. 2.1.3) findet man, zusammen mit denen der Sonne, des Mondes, der Planeten usw., in den astronomischen Jahrbüchern oder Ephemeriden; deren wichtigste ist The Astronomical Almanac.

Geographische Koordinaten. Das kopernikanische Weltbild führt die scheinbare Drehung der Himmelskugel darauf zurück, daß die Erde sich in 24 h Sternzeit einmal um ihre Achse dreht. Der Horizont ist die Tangentialebene der Erde, genauer gesagt einer Wasserfläche, in unserem Wohnort. Der Zenit entspricht der Richtung des darauf senkrecht stehenden Lotes, also der lokalen Richtung der Schwerkraft (einschließlich der von der Erdrotation herrührenden Zentrifugalkraft). Die *Polhöhe* (= Höhe des Himmelspoles über dem Horizont) ist nach Abb. 2.3 gleich der geographischen *Breite* φ (Winkel zwischen Lot und Äquatorebene): Man mißt sie leicht als Mittelwert aus den Höhen des Pol-

sternes oder eines Zirkumpolarsternes in der oberen und unteren Kulmination.

Die geographische *Länge* l entspricht dem Stundenwinkel. Beobachtet man *gleichzeitig* den Stundenwinkel t eines und desselben Gestirnes in Greenwich (Nullmeridian, $l_G = 0^\circ$) und z. B. in Kiel (l_K), so gibt ihre Differenz die geographische Länge von Kiel l_K . Während die Bestimmung der geographischen Breite nur einfache Winkelmessungen erfordert, verlangt die Messung der geographischen Länge eine genaue Zeitübertragung. In alter Zeit bezog man die Zeitmarken aus der Bewegung des Mondes oder der Jupitermonde. Einen großen Fortschritt bedeutete die Erfindung des „seefesten“ Chronometers durch John Harrison ($\simeq 1760/65$) und später die Übertragung von Zeitsignalen, zunächst auf telegraphischem und dann auf drahtlosem Wege.

Wir bemerken noch: An einem Ort der Breite φ erreicht ein Stern der Deklination δ in der oberen Kulmination die Höhe $h_{\max} = 90^\circ - |\varphi - \delta|$, in der unteren Kulmination $h_{\min} = -90^\circ + |\varphi + \delta|$. Ständig über dem Horizont bleiben (auf der Nordhalbkugel) die Zirkumpolarsterne mit $\delta > 90^\circ - \varphi$, nie über den Horizont kommen die Sterne mit $\delta < -(90^\circ - \varphi)$.

Refraktion. Bei der Messung von Sternhöhen h ist die Strahlenbrechung in der Erdatmosphäre zu berücksichtigen. Die scheinbare Anhebung der Sterne (scheinbare minus wahre Höhe) bezeichnet man als die Refraktion. Bei mittleren Druck- und Temperaturverhältnissen in der Atmosphäre ist bei einer Sternhöhe h die Refraktion Δh :

$$h = \quad 0^\circ \quad 5^\circ \quad 10^\circ \quad 20^\circ \quad 40^\circ \quad 60^\circ \quad 90^\circ \\ \Delta h = 34'50'' \quad 9'45'' \quad 5'16'' \quad 2'37'' \quad 1'09'' \quad 33'' \quad 0''.$$

Die Refraktion nimmt ein wenig ab mit zunehmender Temperatur und mit abnehmendem Luftdruck, z. B. in einem Tiefdruckgebiet oder auf Bergen.

2.1.2 Die Bewegungen der Erde. Jahreszeiten und Tierkreis

Wir betrachten nunmehr im Sinne des Kopernikus die *Bahnbewegung* oder *Revolution* der Erde um die Sonne und sodann die tägliche *Drehung* oder *Rotation* der Erde um ihre Achse sowie die Bewegungen der Drehachse selbst. Dabei stellen wir uns zunächst