

GESCHICHTE DER ASTRONOMIE I + II

Prof. Dr. Dieter Schlüter

Vorlesung an der CAU Kiel
WS 1999/2000 und SS 2000

Einleitung	3
A. Astronomische Grundlagen	7
B. Astronomie der Antike	11
B1. Frühe Kulturen	12
a) Ägypten	12
b) China	13
c) Mesopotamien	15
Sumerer und Akkader (3000-900 BC)	15
Assyrer (900-500 BC)	16
Perser und Hellenen (500-100 BC)	18
B2. Griechenland	21
B3. Hellenismus und Spätantike	32
C. Astronomie des Mittelalters	41
C1. Arabische Astronomie	43
C2. Renaissance	46
C3. Nikolaus Kopernikus	50
C4. Tycho Brahe	55
C5. Johannes Kepler	60
C6. Galileo Galilei	66
D. Astronomie der Neuzeit	71
D1. Von Galilei bis Newton	73
a) Beobachtungen mit dem Fernrohr	74
b) Ausbreitung der Wissenschaft	77
D2. Isaac Newton	80
Die Newtonsche Dynamik	84
D3. Himmelsmechanik	89
a) Das N-Körper-Problem	90
b) Himmelsmechanik im 18. Jahrhundert	91
D4. Astronomie und Navigation	97
a) Sternwarten	98
b) Astronomische Expeditionen	102
D5. Stellarastronomie	105
Friedrich Wilhelm Herschel	105
D6. Astronomie im 19. Jahrhundert	111
a) Positionsanstronomie	113
b) Himmelsmechanik	117
c) Astrophysik	119
Verzeichnis der Abbildungen	121

Einleitung

Die Astronomie ist neben der Medizin die älteste Wissenschaft überhaupt, älter sogar als der heutige Wissenschaftsbegriff selbst. Heute bildet sie einen Teil der Physik und gehört, obwohl eigentlich ein kleines Fach, wegen des hohen Aufwandes für ihre Beobachtungsinstrumente (erd- und satellitengebundene Teleskope im weitesten Sinn), zur "big science". Anders als ihre Mutterwissenschaft erfreut sie sich beim Laienpublikum recht großer Beliebtheit und wirkt darauf ähnlich wie ein Feuerwerk: dekorativ, ohne unmittelbaren Nutzen und nicht ganz billig. Sogar engagierte Ökologen können sich mit ihr befreunden, da sie ihre Objekte, manchmal zum Leidwesen der Astronomen und Astrophysiker selbst, in keiner Weise beeinflusst.

Das war nicht immer so. Lange Zeit war die Astronomie von großer weltanschaulicher, aber auch unmittelbarer wirtschaftlicher Bedeutung, in gewissem Sinne sogar überlebenswichtig. Würde ich mich auf die Gegenstände beschränken, die Teil des heutigen Faches geblieben sind, so würden wesentliche Aspekte verlorengehen. Das will ich nicht, aber dadurch entsteht ein gewisses Problem.

Der sächsische Amtmann Georg Paul Hönn hat 1724 ein

Betrugslexikon, worinnen die meisten Betrügereyen in allen Ständen nebst denen dawider guten Theils dienenden Mitteln entdeckt

herausgegeben, in dem die wichtigsten Arten angegeben werden, in der die Angehörigen aller möglichen Berufe ihr Publikum betrügen. Das Spektrum erstreckt sich von Advocaten und Ärzten bis zu Zolleinnehmern und Zuckerbäckern und enthält leider auch "Professores oder Academische Lehrer", die es auf 21 solche Betrügereien bringen, zum Exempel:

Wenn sie in denen Prolegominis ihrer Collegiorum güldne Berge / und wie ausführlich sie von dieser oder jener Materie handeln wolten, versprechen, bei der Ausführung aber nur Proletaria und abgedroschenes oder ausgeschriebenes Zeug vorbringen.

Wenn sie die Fontes oder Bücher, welche von dieser oder jener Materie / über welche sie hauptsächlich handeln, nicht anzeigen / sondern die besten, welche sie etwa wacker reiten, verschweigen / damit man ihre Blösse nicht so bald mercken oder hinter ihre Schliche kommen möge.

Wenn sie über Materien lesen / die nicht zu ihrer Profession gehören, solchen Collegiis aber nur den Deck-Mantel eines ihrer Profession gemässen Nahmens umtun, und also anderen das Brodt vorm Maul wegnehmen.

Als Hilfsmittel wird angegeben:

Fleißige Visitation durch die von hohen Nutritoribus besonders dazu abgeordnete / gelehrte / gewissenhafte Männer.

Damit nun aber die Studenten unter Ihnen sich nicht aufs hohe Roß setzen, sei angemerkt, daß diese sogar auf 36 Arten betrügen, zum Exempel:

Wenn sie das Ihnen zur Anschaffung benöthigter Bücher von Hauß geschickte Geld sonst wohin übel anwenden / und hernach um anders Geld, unter allerlei erdichteten Praetexten / nach Hause schreiben.

Wenn sie überhaupt die edle und theure academische Zeit nicht wohl anwenden, sondern mit Faulentzen und liederlichen Leben hinbringen, und gleichwohl ihren Eltern zumahl unstudirten, von ihren erlangten Profectibus und Gelahrtheit einen blauen Dunst vor die Augen machen.

Auch dagegen finden sich Mittel:

Durch ausdrücklichen obrigkeitlichen Befehl zu verhüten / daß nicht soviel junge Leute / nach ihrem Belieben und der Eltern Gutdüncken studieren / sondern nur diejenigen / welche genugsame Capacität und Mittel darzu haben / weil man im gemeinen Wesen allezeit mehr nützliche Bürger / Handwercker / Bauren und Soldaten / als Gelehrte brauchet / auch über dieses bey solcher überhand genommenen Studier-Seuche vieles Geld aus dem Land geschleppt wird / hingegen dieses mit manchem unnützen Subjecto beschweret.

Um nun einem solchen Verdacht von vornherein die Spitze zu nehmen, will ich in meinen Prolegomenis Ihnen reinen Wein einschenken über das, was Sie erwartet. Meine Fächer sind Astrophysik und theoretische Physik. Von der Geschichtswissenschaft, aber auch von Ökonomie, Soziologie und Theologie verstehe ich so gut wie nichts. Auch zum Teilgebiet der Geschichte der Naturwissenschaften habe ich nie wissenschaftliche Beiträge geleistet. Ich werde Ihnen die Geschichte der Astronomie so darstellen, wie sie einem Fachastronomen aus heutiger Sicht erscheint. Ich werde keine der schönen Anekdoten auslassen, nur weil sie nicht historisch ist. Sie können sich darauf verlassen, daß die Fakten, die ich vortragen werde, nach meinem besten Wissen und Gewissen der Wahrheit entsprechen. Die Interpretation dagegen wird wahrscheinlich subjektiv sein, und es steht Ihnen frei, sie durch eine eigene zu ersetzen. Ich will Ihnen auch die Fontes oder Bücher nennen, die ich wacker reiten werde. Es sind dies für das Gesamtgebiet die Standardwerke

J.L.E. Dreyer: A History of Astronomy from Thales to Kepler (1905)

A. Pannekoek: A History of Astronomy (1961)

neben einer großen Zahl von Quellen über spezielle Themen.

Bei einer Vorlesung über die Geschichte einer Naturwissenschaft gibt es nun eine zusätzliche Schwierigkeit, die bei anderen Geschichtsvorlesungen kaum vorkommt. Zur Illustration möge der erste Teil von Mark Twains "Some Learned Fables for Good Old Boys and Girls" dienen: "Wie die Tiere des Waldes eine wissenschaftliche Expedition aussandten". Diese Expedition unter der Leitung von Professor Ochsenfrosch gelangt nach dem Verlassen des Waldes auf eine große grasbewachsene Ebene und entdeckt dort eine Allee aus zwei endlosen, parallellaufenden Barrieren aus irgendeinem harten schwarzen Material, die sich bis zum Horizont erstrecken. Professor Sumpfschildkröte gibt die Erklärung: Es handelt sich um Breitenkreise, die man bisher immer für rein theoretische Gebilde gehalten hat. Gegen Mitternacht aber vernimmt man einen teuflischen Schrei, dann ein ratterndes, rasselndes Geräusch, und im nächsten Augenblick schießt ein ungeheures, entsetzliches Auge vorbei, einen langen Schweif nach sich ziehend. Auch hier weiß Professor Sumpfschildkröte die Erklärung: Es war die Präzession der Äquinoktien. Großer Jubel, aber gleich darauf erschallt das entsetzliche Kreischen erneut. Wieder blitzt ein großes, flammendes Auge auf, um dann in Finsternis und Ferne zu entschwinden. Diesmal findet Lord Langbein die Erklärung: Es war nichts Geringeres als ein Venus-Transit. Mark Twain macht sich also lustig über Pseudo-Wissenschaftler, die ihre "docta ignorantia" - ihre gelehrte Unwissenheit - hinter einer pompösen Fachsprache verstecken. Mit der Präzession der Äquinoktien und

Venus-Transiten werden wir uns auch in dieser Vorlesung beschäftigen, aber es hat wenig Sinn, darüber zu diskutieren, ob schon die Babylonier oder erst Hipparch die Präzession der Äquinoktien entdeckt haben, wenn man nicht weiß, worum es sich dabei handelt. Die Beschäftigung mit der Geschichte einer Naturwissenschaft erfordert immer ein gewisses Maß an Kenntnis der betreffenden Wissenschaft selbst. Im folgenden sollen deshalb einige Grundtatsachen der Astronomie zusammengestellt werden, die für das Verständnis ihrer Geschichte bis zum Mittelalter erforderlich sind.

A. Astronomische Grundlagen

Unser Lebensraum - oft etwas großspurig "die Welt" genannt - beschränkt sich im wesentlichen auf die unmittelbare Umgebung der Oberfläche eines nahezu kugelförmigen Körpers, der Erde, mit einem Radius von 6371 km. Dieser Wert ist nicht zufällig: Bei der Festsetzung der Längeneinheit Meter durch die französische Revolutionsregierung wurde der Äquatorumfang der Erde zu 40000 km festgelegt, wegen der beschränkten Meßgenauigkeit waren es dann aber 40075 km. In Wirklichkeit läßt sich die Erde in sehr viel besserer Näherung durch ein abgeplattetes Rotationsellipsoid - ein Sphäroid - mit den Halbachsen Äquatorradius 6378 km und Polarradius 6357 km, also einer Abplattung von etwa 3% bzw. einer numerischen Exzentrizität 0.082, beschreiben. Diese Abplattung ist so klein, daß es nicht möglich ist, sie mit den üblichen zeichnerischen Hilfsmitteln darzustellen [1,2]. Ihre Bestimmung gelang erst in der Mitte des 18. Jahrhunderts. Sie wird dadurch hervorgerufen, daß die Erde relativ zu anderen, sehr weit entfernten Objekten, den Fixsternen, rotiert, wobei sie für eine Umdrehung 86164 s, einen Sterntag, benötigt. Man könnte sich fragen, warum die Zeiteinheit Sekunde nicht dadurch festgelegt wurde, daß ein Sterntag in 24 Stunden zu 60 Minuten zu 60 Sekunden, also insgesamt 86400 Sekunden, zerlegt wird. Dafür gibt es einen guten Grund:

In einer Entfernung von ungefähr 150 Millionen Kilometern befindet sich ein weiterer kugelförmiger Körper, der intensiv leuchtet, die Sonne. Auch sie rotiert, aber die Abplattung ist so klein, daß sie noch nicht gemessen werden konnte. Von der Erde aus erscheint ihr Durchmesser unter einem Winkel von ungefähr einem halben Grad, er muß also etwa 1.5 Millionen Kilometer betragen (genauer: $1.392 \cdot 10^6$ km). Näherungsweise bewegt sich die Erde in einer Ebene, der Ekliptik, auf einem Kreis um die Sonne herum und benötigt für einen Umlauf $3.156 \cdot 10^8$ s oder 366.25 Sterntage. Da die Sonne eine Hälfte der Erde beleuchtet und diese sich dreht, wechselt für jeden Punkt auf der Erde periodisch "Paradieseshelle mit tiefer, schauervoller Nacht". Die Zeit zwischen zwei Mittagagen wird als Sonnentag bezeichnet. Wegen der Bewegung der Erde auf ihrer Bahn ist dafür etwas mehr als eine Rotation erforderlich, und insgesamt entsprechen die 366.25 Sterntage eines Umlaufs 365.25 Sonnentagen zu 86400 s. Daß man statt des Sterntages den Sonnentag in genau 24 Stunden zerlegt hat, liegt natürlich an seiner enormen Bedeutung für das menschliche Leben, bringt aber einige Komplikationen mit sich. Während die Rotation der Erde so gleichmäßig ist, daß sie erst 1967 durch die Atomuhr als Zeitnormal abgelöst wurde, gilt das für die Bahnbewegung nicht. Die Erdbahn ist nämlich nur näherungsweise ein Kreis, genauer betrachtet eine Ellipse mit einer Exzentrizität von 0.017, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht. Den sonnennächsten Punkt bezeichnet man als Perihel, den sonnenfernsten als Aphel, beide zusammen als Apsiden und ihre Verbindungslinie als Apsidenlinie. Diese Ellipse ist noch viel kreisähnlicher als der Meridionalquerschnitt des Erdkörpers [3,4], das Verhältnis von kleiner zu großer Halbachse beträgt 0.99986. Der Mittelpunkt dieses Näherungskreises liegt aber exzentrisch zur Sonne.

Würde er von der Erde mit konstanter Geschwindigkeit durchlaufen, so daß ihre Winkelgeschwindigkeit bezogen auf den Mittelpunkt konstant wäre, so würde sich der Fahrstrahl ("radius vector") von der Sonne zur Erde in der Nähe des Perihels schneller drehen als in der des Aphels. In Wirklichkeit ist aber das Produkt aus Abstand und Geschwindigkeit in beiden Punkten gleich, wodurch der Effekt verdoppelt wird und die Drehung bezogen auf den anderen Brennpunkt in sehr guter Näherung gleichförmig ist [5]. Die Sonnentage sind also nicht gleich lang. Man führt daher einen mittleren Sonnentag ein, der im folgenden einfach als Tag bezeichnet wird. Der wahre und der mittlere Mittag finden dann im allgemeinen nicht zur gleichen Zeit statt, und der Unterschied, die Zeitgleichung, kann bis

zu 16 Minuten betragen. Daß die Umlaufsdauer der Erde, das Jahr, in keinem rationalen Verhältnis zur Rotationsdauer, dem Tag, steht, führt zu dem Problem der Schaltjahre, das ja im Augenblick besonders aktuell ist. König Alfons X von Kastilien, genannt “el saber” (der Weise), hat etwa um 1250 gesagt: “Hätte der Allmächtige mich zu Rate gezogen, als er sich an die Erschaffung der Welt machte, ich hätte etwas Einfacheres empfohlen!” Das brachte ihm damals den Vorwurf der Ketzerei ein, aber ich glaube, das folgende wird zeigen, daß er so unrecht nicht hatte.

Die wechselnde Entfernung von der Sonne und die daraus resultierende Änderung der Tageslänge haben übrigens nichts mit dem Phänomen der Jahreszeiten zu tun. Das ist natürlich sofort einsichtig, wenn man bedenkt, daß in unserem Sommer die Australier gerade Winter haben, aber sich natürlich in der gleichen Sonnenentfernung wie wir befinden, die ihren kleinsten Wert nebenbei bemerkt zur Zeit Anfang Januar annimmt. Die Ursache für die Jahreszeiten liegt darin, daß die Achse der Erde nicht senkrecht auf der Ekliptik steht und deshalb die Äquatorebene mit der Ekliptik einen Winkel von etwa 23° , die Schiefe der Ekliptik, bildet. Da die Erde in guter Näherung eine Kugel darstellt, sind ihre Rotation und ihre Bahnbewegung nicht kräftemäßig gekoppelt. Die Rotationsachse behält also beim Umlauf ihre Richtung im Raum bei. Je nach der geographischen Breite ändern sich daher der Tag- und der Nachtbogen der Sonne regelmäßig während eines Jahres [6]. Sie sind gleich groß am 21. März (Frühjahrsäquinoktium) und am 23. September (Herbstäquinoktium). Am 22. Juni ist der Tagbogen auf der Nordhalbkugel am größten (Sommersolstitium) und am 22. Dezember am kleinsten (Wintersolstitium). Auf der Südhalbkugel ist es gerade umgekehrt.

Nach der Sonne ist der wichtigste weitere Himmelskörper der Mond. Wie die Erde um die Sonne bewegt er sich um die Erde näherungsweise in einer Ebene und näherungsweise auf einem Kreis, wobei seine Umlaufdauer 27.3217 Tage beträgt (siderischer Monat). Genauer läßt sich seine Bahn durch eine Ellipse mit der Exzentrizität 0.055 mit der Erde in einem der Brennpunkte beschreiben. Seine Entfernung schwankt zwischen 356400 km im Perigäum und 406700 km im Apogäum. Die Bahnebene stimmt weder mit der Äquatorialebene der Erde noch mit der Ekliptik überein, sondern bildet mit der letzteren einen Winkel von etwa 5° . Die Mondbahn verläuft also teils unterhalb, teil oberhalb der Ekliptik und durchstößt diese in zwei Punkten, dem aufsteigenden und dem absteigenden Knoten, die durch die Knotenlinie verbunden sind. Wegen seiner Abweichung von der Kugelgestalt und seiner Nähe zur Erde ist er erheblichen Gezeitenkräften unterworfen, die dazu geführt haben, daß seine Rotationsdauer mit seiner Umlaufdauer übereinstimmt. Er wendet daher der Erde immer die gleiche Seite zu. Zusammen mit der beträchtlichen Einwirkung durch die Sonne haben diese Störungen zunächst die Folge, daß sich die Apsidenlinie seiner Bahn in der Bahnebene dreht und in 8.85 Jahren einmal umläuft. Aber auch diese Ebene liegt nicht fest, sondern dreht sich im Raum, was zu einer ständigen Verlagerung der Knotenpunkte (Regression der Mondknoten) mit einer Periode von 18.6 Jahren führt, und schwankt außerdem in ihrer Neigung gegenüber der Ekliptik. Die Folge ist, daß der Zeitraum zwischen zwei Durchgängen durch das Perigäum 27.5546 Tage beträgt (anomalistischer Monat), zwischen zwei Durchgängen durch den aufsteigenden Knoten 27.2122 Tage (drakonitischer Monat). Wichtiger als diese drei Monate ist ein weiterer Zeitraum, der mit der Bewegung des Mondes auf seiner Bahn gar keinen unmittelbaren Zusammenhang hat. Durch die Sonne wird eine Hälfte des Mondes ständig beleuchtet, ist aber auf der Erde nur teilweise zu sehen und ergibt so die Phasen des Mondes, insbesondere Neumond und Vollmond, die Syzygien. Diese Phasen hängen von der relativen Stellung von Sonne, Erde und Mond ab und wiederholen sich, wenn diese drei Körper wieder in gleicher Weise zusammenstehen. Der Zeitraum von einem Neumond zum nächsten heißt daher syn-

odischer Monat und dauert 29.5306 Tage. Wenn der Mond in den Syzygien in der Nähe eines Knotens, also in der Ekliptik, steht, kann es zu Finsternissen kommen, und zwar bei Neumond zu Sonnenfinsternissen, bei denen der Mondschaten auf die Erde fällt, und bei Vollmond zu Mondfinsternissen, bei denen der Mond in den Erdschatten tritt [7,8].

Die Erde ist nur einer aus einer Vielzahl von Planeten, die die Sonne in Ellipsenbahnen umlaufen, die meisten im gleichen Umlaufssinn, mit kleiner Exzentrizität und in ungefähr der gleichen Ebene [9]. Auch ihre Bahnen haben also auf- und absteigende Knoten, und auch ihre Bahnelemente ändern sich, wie die des Mondes, mit der Zeit, aber außerordentlich langsam. Bis zur Neuzeit waren nur fünf von ihnen bekannt: die inneren (unteren) Planeten Merkur und Venus und die äußeren (oberen) Mars, Jupiter und Saturn. Fast alle von ihnen haben Monde.

Damit sind alle Akteure auf der Weltbühne des Altertums und des Mittelalters vorgestellt, die Fixsterne bilden bis zum 18. Jahrhundert nur eine Kulisse. Dieses Schauspiel war lange Zeit für die Menschheit so verwirrend, weil sie es von der mitbewegten, aber irrtümlich als ruhend angenommenen Erde aus betrachtete. Deren Rotation führt dann zu einer scheinbaren Drehung des Himmelsgewölbes, gegenüber dem die Planeten, zu denen deswegen auch Sonne und Mond gezählt wurden, Eigenbewegungen ausführen.

Am wichtigsten ist die der Sonne. Zum Zeitpunkt den Frühlingsäquinoktiums steht sie auf dem Himmelsäquator im Frühlingspunkt, auch Widderpunkt (“first point of aries”), genannt, obwohl er sich heute im Sternbild Fische befindet und bald in das des Wassermanns übertreten wird (“age of aquarius”). Sie steigt dann auf einem Großkreis, der Ekliptik, in Richtung auf den Himmelsnordpol hin an, während sie gleichzeitig gegenüber den Fixsternen zurückbleibt, und wandert daher durch die Sternbilder des Tierkreises. Ihre größte Höhe erreicht sie im Sommersolstitium auf dem Wendekreis des Steinbocks [10]. Dann ist auf der nördlichen Halbkugel ihr Tagesbogen am längsten, und sie geht im Nordosten auf und im Nordwesten unter. Beim folgenden Abstieg erreicht sie im Herbstäquinoktium wieder den Äquator und im Wintersolstitium den Wendekreis des Krebses. Jetzt ist ihr Tagesbogen am kürzesten, die Nacht am längsten. Mit dem Wiederanstieg zum Frühlingspunkt ist ihr Jahreslauf auf der Ekliptik zwischen den beiden Wendekreisen, das tropische Jahr, vollendet.

Der Mond läuft in der gleichen Richtung wie die Sonne, bald bis zu 5° oberhalb, bald unterhalb der Ekliptik, aber mit viel höherer Geschwindigkeit, so daß er sie etwa zwölfmal im Jahr überholt (Neumond). Kreuzt er dabei gleichzeitig die Ekliptik, so kommt es zu Sonnenfinsternissen. Ebenfalls jeden Monat einmal befindet er sich in der zur Sonne entgegengesetzten Richtung (Vollmond) und kann dort bei hinreichend kleinem Abstand zur Ekliptik durch den Erdschatten gehen, was zu Mondfinsternissen führt.

Auch die Planeten bewegen sich in einem engen Band um die Ekliptik herum, also im Tierkreis, aber mit stark schwankender Geschwindigkeit. Dabei verhalten sich innere und äußere Planeten unterschiedlich. Die inneren bleiben immer in der Nähe der Sonne, eilen ihr zeitweise voraus und bleiben zeitweise zurück. Sie entfernen sich aber nicht weit von ihr: Venus um höchstens 48° , Merkur um höchstens 28° , was seine Beobachtbarkeit sehr einschränkt. Bei ihrem Hin- und Hergang gehen sie einmal hinter und einmal vor der Sonne vorbei [11], aber ähnlich wie der Mond beim Umlauf um die Erde stehen sie dabei wegen ihrer Bahnneigung meistens zu hoch oder zu tief, um sich mit der Sonne zu überdecken. Es kommt daher relativ selten dazu, daß zum Beispiel die Venus als dunkles Scheibchen über das Sonnenbild läuft (Venus-Transit). Die äußeren Planeten bewegen sich langsamer als die Sonne und werden deshalb von ihr zu bestimmten Zeitpunkten (Konjunktionen) überholt [12]. Der Abstand zwischen zwei solchen Ereignissen, die synodische Umlaufsdauer, ist

beim Mars mit 780 Tagen am größten und nähert sich mit wachsender Entfernung immer mehr der Jahreslänge, wie bei den Fixsternen. Befindet sich ein äußerer Planet andererseits in Opposition zur Sonne, so wird er durch die schneller umlaufende Erde auf der Innenbahn überholt und daher für kurze Zeit scheinbar rückläufig.

Die beobachteten Erscheinungen werden erheblich dadurch kompliziert, daß einerseits die Rotationsachse der Erde schief zur Ekliptik steht und andererseits der Erdkörper als Folge der Rotation abgeplattet ist. Die der Sonne näheren Teile eines Körpers werden von ihr stärker angezogen als die von ihr ferneren (Gezeitenkräfte). Diese Unterschiede heben sich für den Gesamtkörper auf, für einen abgeplatteten Körper mit geneigter Rotationsachse bleibt aber ein Drehmoment wirksam, das ihn aufzurichten sucht. Wegen seiner Rotation stellt er einen Kreisel dar und zeigt dessen scheinbar paradoxes Verhalten: Die Neigung der Achse ändert sich nicht, aber diese läuft auf einem Kegel um die Vertikale zur Ekliptik um (Präzession) [13]. Bei der Erde dauert ein solcher Umlauf 25800 Jahre ("platonisches Jahr"). Mit der Polarachse verlagert sich natürlich auch die dazu senkrechte Äquatorebene und deren Schnittlinie mit der Ekliptik, oder, von der Erde aus betrachtet, der Schnittpunkt von Himmelsäquator und Ekliptik, der Frühlingspunkt. Er wandert im Lauf der Jahrtausende aus dem Sternbild Widder über Fische und Wassermann durch den gesamten Tierkreis und kommt dabei der Sonne auf ihrem Jahreslauf längs der Ekliptik entgegen, allerdings nur um 50 Bogensekunden im Jahr (Präzession der Äquinoktien). Das tropische Jahr ist daher mit 365.242 mittleren Sonnentagen etwas kürzer als das siderische.

B. Astronomie der Antike

Welche Beweggründe führen zur Beschäftigung mit der Astronomie? Der heute für uns wichtigste, die wissenschaftliche Neugier, spielte in der Antike nur in der griechischen Kultur eine gewisse Rolle, entscheidend waren handfeste des täglichen Lebens. Wichtig, besonders für seefahrende Völker, ist die Orientierung auf der Erdkugel, also die Bestimmung der geographischen Länge und Breite. Die letztere folgt sofort aus der Polhöhe, die erstere erforderte bis in die Neuzeit eine sehr genaue Zeitmessung. Nicht nur aus diesem Grunde, sondern ganz allgemein war die Festlegung und Messung der Zeit und damit auch des Kalenders eine Grundaufgabe der Astronomie. Noch weit in unser Jahrhundert hinein gehörte zu den allgemeinen Aufgaben der Sternwarten der Zeitdienst. Grundeinheit der Zeitmessung ist, wie schon gesagt wurde, der mittlere Sonnentag mit seiner Unterteilung bis zur Sekunde. Durch den unmittelbar feststellbaren Wechsel von Helligkeit und Dunkelheit ist er dem Menschen so vertraut, daß er als a priori gegeben erscheint. In der Genesis (1 Moses 1) werden aus Abend und Morgen drei Tage, bevor überhaupt erst am vierten Tag die Sonne erschaffen wird.

Für sehr viele Zeitintervalle ist der Tag eine zu kleine Einheit und führt daher zu sehr großen Zahlen. Die Astronomen, die daran gewöhnt sind, haben ihn beibehalten und ordnen Ereignissen das julianische Datum zu, die Zahl der mittleren Sonnentage, die seit dem Jahre - 4712 (entsprechend 4713 BC) um 12 Uhr Weltzeit verstrichen sind. Der 29.10.1999 um 15.15 MEZ (Sommerzeit) entspricht dann 2451481.1354160 J.D. (bis auf Bruchteile einer Sekunde). Ein längeres Intervall, das ebenfalls sehr leicht meßbar, wenn auch nicht von unmittelbarer physikalischer Bedeutung (außer für Schlafwandler, Liebespaare und Palolo-Würmer) ist, wird gegeben durch den Phasenwechsel des Mondes. Ein solcher Monat beginnt und endet mit dem erstmaligen Erscheinen der Sichel des neuen Mondes am Abendhimmel und ist daher im wesentlichen identisch mit dem synodischen Monat. Da dessen Länge aber keine ganze Anzahl von Tagen umfaßt, muß ein Wechsel zwischen 29 und 30 Tagen stattfinden und der verbleibende Rest in größeren Zeitabständen durch einen Schalttag ("intercalation day") ausgeglichen werden.

Von unmittelbarer Bedeutung für das menschliche Leben ist der Zeitraum des Jahres, genauer gesagt des tropischen Jahres wegen der, mit wachsender geographischer Breite immer deutlicheren, Beziehung zu den Jahreszeiten. Leider enthält es weder eine ganze Zahl von mittleren Sonnentagen noch von synodischen Monaten, erfordert daher in gewissen Abständen Schalttage und Schaltmonate. Messen läßt es sich (außer am Äquator) durch Beobachtung des längsten Tages bzw. des am weitesten nördlichen Aufgangspunktes der Sonne (Sommersolstitium). Das siderische Jahr ergibt sich dagegen durch Beobachtung der Sternbilder, die die Sonne im Laufe des Jahres durchwandert. Man benutzt dazu die sogenannten heliakischen Auf- und Untergänge von Sternen. Dabei handelt es sich um folgendes: Sterne, die der Sonne bei ihrer täglichen Bewegung unmittelbar vorausgehen - im Laufe eines Jahres sind das immer andere - gehen ganz kurz vor ihr im Osten auf, sind also eine kurze Zeit sichtbar, bevor die Sonne alles überstrahlt. Entsprechendes gilt für die heliakischen Untergänge von Sternen, die der Sonne unmittelbar folgen. Im Gegensatz zur Festlegung von Tagen und Monaten erfordern beide Verfahren einen erheblichen Aufwand an Beobachtungen, das zweite außerdem ein genaues Verzeichnis der Sterne im Sonnenweg. Alle Kulturen beginnen daher mit einem reinen Lunarkalender, der später als Lunisolarkalender dem Jahreslauf angepaßt werden muß und meist in einen reinen Solarkalender übergeht.

B1. Frühe Kulturen

Damit in einer menschlichen Gesellschaft Astronomie betrieben wird, muß dafür einerseits ein praktisches Bedürfnis bestehen, andererseits müssen aber auch gewisse Voraussetzungen erfüllt sein, wie die Fähigkeit zu schreiben und zu rechnen. Die Entwicklung beginnt daher dort, wo durch Seßhaftwerden und Ackerbau eine relativ hohe Bevölkerungsdichte entsteht und durch Arbeitsteilung eine höhere Kulturstufe erreicht werden kann. Das war der Fall in großen Flußtälern in günstigen Klimaten, wo trotz geringer Niederschläge intensiver Ackerbau betrieben werden kann, weil der Fluß das nötige Wasser liefert. Das ist zum Beispiel der Fall in den Tälern des Nil, des Hoang-ho und von Euphrat und Tigris. Da das Flußwasser durch Deiche und Kanäle reguliert und verteilt werden muß, ist kollektives Handeln der Menschen und damit eine Organisation erforderlich. Dabei bildet sich ein Staatswesen mit einer Führungsschicht heraus. In der Umgebung dieser Gebiete finden sich allerdings stets Nachbarn in weniger begünstigten Lebensumständen, die immer versucht sind, sich durch Raubzüge an den erzeugten Gütern zu beteiligen. Zu ihrer Abwehr bedarf es eines stehenden Heeres, das natürlich auch durch den produzierenden Teil der Bevölkerung unterhalten werden muß. Das geschieht durch Tribute, in heutiger Sprechweise Steuern, die mit mehr oder weniger Nachdruck eingetrieben werden müssen. Sie ermöglichen der Führungsschicht ein materiell relativ angenehmes Leben und schaffen dadurch die Voraussetzung für eine Beschäftigung mit Kunst und Wissenschaft.

Für ein solches Staatswesen ist ein Kalender von fundamentaler Bedeutung. Die landwirtschaftlichen Aktivitäten müssen der Jahreszeit angepaßt sein, zum Beispiel würde ein Ausbringen der Saat in einem Monat, auf den eine Dürreperiode folgt, für das Gemeinwesen katastrophale Folgen haben. Ebenso muß das Einziehen der Tribute regelmäßig erfolgen und der Leistungsfähigkeit der Bauern Rechnung tragen, damit nicht durch ein Übermaß die Grundlage der Wirtschaft zerstört wird. Dazu ist ein Rechnungssystem mit genauer Buchführung und Speicherung der Daten nötig, also die Entwicklung einer Schrift. Saat und Ernte sind zugleich verknüpft mit religiösen Feiern. Solche Organisationsaufgaben führen zum Entstehen einer Gruppe von Spezialisten mit entsprechenden Kenntnissen und Fähigkeiten, einer Kombination von Verwaltungsbeamten, Priestern und eben auch Astronomen.

a) Ägypten

Das Tal des Nil, eingeschnitten in die umgebende Wüste, erfüllt in idealer Weise die Voraussetzungen für die Entwicklung der Astronomie: Der Himmel ist fast immer wolkenlos, und die jährliche Überschwemmung durch den Nil macht einen Kalender zur Notwendigkeit. Schon vor dem Jahre 3000 BC entstand eine Zentralregierung mit einer mächtigen Priesterklasse und einer Beamtenhierarchie. Neben der Hieroglyphenschrift gab es, bedingt durch die jährlich erforderliche Neuvermessung des Landes, eine relativ weit entwickelte Geometrie.

In vorhistorischer Zeit beruhte die Zeitrechnung, wie anfänglich in allen Kulturen, auf den Mondphasen. Dieser Mondkalender wurde aber schon früh abgelöst durch einen Sonnenkalender, von ihm blieb nur die Zwölfzahl der Monate, die aber nichts mehr mit dem Mondlauf zu tun hatten. Das tropische Jahr wurde eingeteilt in drei Abschnitte von je vier Monaten: die Zeit der Überschwemmung von Juli bis Oktober, die Zeit der Saat und des Wachstums von November bis Februar und die Zeit der Ernte von März bis Juni. Jeder Monat hatte 30 Tage, nach dem zwölften Monat wurden fünf Tage eingeschoben. Sie galten als unglücklich für die Arbeit und wurden deshalb als Festtage benutzt. Insgesamt

war dieses Jahr um einen Vierteltag zu kurz, was sich aber erst über größere Zeiträume bemerkbar macht. Schon früh war aufgefallen, daß zum gleichen Zeitpunkt, in dem die Flutwelle des Nils die Hauptstadt Memphis erreichte, der hellste Fixstern, Sirius, seinen heliakischen Aufgang hatte. Er wurde daher nicht nur als Vorbote, sondern als Urheber der Nilflut angesehen und als Gott Sothis verehrt. Sein Erscheinen verzögerte sich allerdings alle vier Jahre um einen Tag gegenüber dem Monatsbeginn und wanderte deshalb in $4 \cdot 365 = 1460$ Jahren einmal durch alle Monate. Nach dieser sogenannten Sothis-Periode fiel es wieder auf das ursprüngliche Datum. Allegorisch nimmt darauf Bezug die Fabel vom Vogel Phönix, der alle 1460 Jahre zurückkehrt, sich selbst verbrennt und verjüngt aus den Flammen aufsteigt. Wegen der Präzession der Äquinoktien ist das Sothis-Jahr allerdings etwas länger als das tropische Jahr, und die Rückkehr erfolgt schon nach 1456 Jahren. Der Sirius-Aufgang verspätete sich dadurch im Lauf von 2000 Jahren um fast einen Monat und verlor nach und nach seine ankündigende Bedeutung.

Die Ägypter benutzten mit dem Verwaltungsjahr von 365 Tagen und dem Sothis-Jahr zwei Kalender nebeneinander. Mehrere Pharaonen versuchten, diese beiden, wie beim julianischen Kalender, durch einen Schalttag in jedem vierten Jahr zu vereinigen, konnten sich aber nicht gegen die Priesterschaft durchsetzen, die nicht auf ihr "Herrschaftswissen" verzichten wollte. Daneben gab es noch eine dritte Art der Zeitzählung durch die sogenannten Dekane, Zehntage-Wochen, die mit Sternbildern verknüpft waren und beim Totenkult eine Rolle spielten. Da die praktischen Bedürfnisse der Zeitmessung erfüllt waren und die Bewegungen des Mondes und der Planeten offenbar auch astrologisch nicht von Bedeutung waren, begann die Entwicklung der Astronomie in Ägypten schon früh zu stagnieren. Zu einer Weiterentwicklung kam es erst nach der Eroberung des Landes durch Alexander und den Einfluß der hellenistischen Kultur, die sich zum Beispiel im Bild des Himmels im Tempel von Dendera [14] zeigt, aber diese Epoche hat nichts mehr mit der ursprünglichen ägyptischen Astronomie zu tun.

In der Kosmologie der Ägypter hatte das Universum die Form eines großen Kastens von Norden nach Süden mit der Erde als Boden und Ägypten in der Mitte [15]. Oben wurde er durch ein gewölbtes Dach abgeschlossen, das auf vier hohen Bergen in den Haupthimmelsrichtungen ruhte. Von ihm hingen die Gestirne als Lampen herab und wurden tagsüber ausgelöscht. Die seitliche Begrenzung lieferte eine Kette hoher Berge, hinter denen in einem finsternen Tal ein Strom floß, von dem der Nil im Süden abzweigt. Der Sonnengott Ra bestieg abends im Westen eine Barke, die ihn in der Nacht auf dem Strom in den Osten zurückbrachte.

b) China

Legendenhaft wird von späteren Autoren von einem Beginn der chinesischen Astronomie vor dem Jahre 2000 BC berichtet, aber historische Nachweise gibt es erst nach dem Jahre 1000 BC, als sich am Mittellauf des Hoang-Ho ein erstes Zentrum chinesischer Kultur bildete. In den folgenden Jahrhunderten löste sich die ursprüngliche feudale Ordnung schrittweise auf, und es entwickelte sich eine zentrale Verwaltung mit einer Beamtenklasse (Mandarine), die nur geringe priesterliche Funktionen hatte. Zu ihr gehörten berühmte Philosophen wie Kung-fu-tse ("Konfuzius", 551-470 BC), die wesentlich zur Entwicklung des Ideals der Tugend als korrektem Verhalten gegenüber überlieferten Riten und Vorschriften beitrugen.

Das astronomische Wissen dieser Zeit wurde um das Jahr 400 BC zusammengefaßt durch Shi-shen. Die tägliche Drehung des Himmelsgewölbes mit Pol und Äquator sowie der Horizont spielen eine Rolle, aber die Ekliptik und die Planeten werden kaum erwähnt. Es

überwiegen kosmologische Ideen, die in der Staatsreligion Himmel und Erde in enge Beziehung setzen. Danach ist China das "Reich der Mitte" auf der flachen Erde und entspricht dem Himmelsnordpol. Dort regiert der Gott Shang-ti, dessen irdische Entsprechung der "Sohn des Himmels", der Kaiser, ist. Unordnung in den himmlischen Regionen führt zu solchen auf der Erde und umgekehrt. Finsternisse und Kometen sind Zeichen, daß der Kaiser und seine Minister sich nicht richtig verhalten. Auch die Bahn des Mondes kann sich verändern, wenn der Kaiser nicht die Harmonie zwischen Himmel und Erde aufrecht-erhält. Das Schicksal des Menschen wird nicht durch Götter regiert, sondern Glück und Unglück folgen aus der Tugendhaftigkeit seines Verhaltens, dem Befolgen der Weisungen des Himmels.

Aufgabe der staatlichen Astronomen war in erster Linie die Zeitrechnung, um sicherzu-stellen, daß alle Maßnahmen zum richtigen Zeitpunkt getroffen wurden. Dazu gehörte es, den Kaiser offiziell über den Beginn der Jahreszeiten zu informieren und ihm mit großer Feierlichkeit den neuen Kalender zu überreichen, der insbesondere die glücklichen und unglücklichen Tage enthielt. Die astronomischen Werke dieser Zeit hatten überwiegend astrologische Inhalte, doch soll das von Shi-shen auch schon einen Sternkatalog mit 809 Sternen in 122 Sternbildern enthalten haben [16]. Leider ist es nur in Bruchstücken über-liefert. Daß Sonnenfinsternisse etwas mit dem Mond zu tun haben, war Shi-shen bekannt, doch wurden sie nicht als Bedeckungen, sondern als geistige Unterdrückung des Prinzips der Sonne durch das des Mondes gedeutet. Von Mondfinsternissen wurde sogar behauptet, daß sie zu jeder Zeit des Monats stattfinden könnten.

Im Jahre 213 BC kam es auf Befehl des Kaisers Shih Huang, eines Usurpators, zu einer allgemeinen Bücherverbrennung, um die Tradition zu brechen, aber schon unter der folgen- den Han-Dynastie (212-221 AD) wurde sie wiederhergestellt und ebenso die alten Bücher, was weitgehend auf ein Neuschreiben hinauslief. Aus einer Nachricht über die Hinrichtung zweier Astronomen names Hi und Ho, die sich während eines der zahlreichen Bürgerkriege der falschen Partei angeschlossen hatten, wurde so eine sehr moralische Geschichte, wo- nach die beiden wegen Trunkenheit versäumt hätten, eine Sonnenfinsternis vorherzusagen und deshalb mit dem Tode bestraft worden wären. Sogar Zeit (erster Tag des Herbstes) und Ort (Kopf des Skorpions) wurden angegeben, woraus man heute berechnen kann, daß diese Finsternis am 22. Oktober des Jahres 2137 BC stattgefunden haben müßte, einem Zeitpunkt also, wo von einer Vorherberechnung von Sonnenfinsternissen noch gar keine Rede sein konnte.

Die Zeitschrift "Observatory" widmete 1894 den bedauernswerten chinesischen Kollegen die folgende (fiktive) Grabschrift:

Here rest the bones of Ho and Hi / Whose fate was sad yet risible,
Being hanged because they did not spy / Th' eclipse that was invisible.
Heigh-ho! t'is said a love of drink / Occasioned all their trouble,
But this is hardly true, I think, / For drunken folks see double.

Während der Han-Periode wurde die Beobachtungsgenauigkeit wesentlich gesteigert, unter anderem durch die Konstruktion von Armillarsphären. Diese v hatten allerdings nur Ringe für den Äquator und den Horizont, nicht für die Ekliptik, und waren seltsamerweise in 365.25 statt 360 Grade geteilt. Die Schiefe der Ekliptik wurde zu 23.7° bestimmt und die Mondbewegung genauer verfolgt. Die Anpassung des Mondkalenders an den Sonnenlauf erfolgte jetzt systematisch, und etwa seit dem Jahre 20 AD konnten auch Finsternisse vorhergesagt werden. Die Kosmologie sah den Himmel jetzt als Eierschale, worin die Erde als Eidotter auf dem Wasser schwimmt und die Jahreszeiten durch ihre unmerkliche Auf- und Abbewegung zustandekommen.

In den folgenden Jahrhunderten wurde sowohl die Ungleichheit der Jahreszeiten als auch die Präzession der Äquinoktien bekannt, aber dabei spielten sicher Einflüsse aus dem Westen, insbesondere der nach Indien gelangten hellenistischen Astronomie, eine Rolle. Unter der folgenden Tang-Dynastie kam es zu regulären Verbindungen mit den islamischen Staaten im vorderen Orient und in Zentralasien, und die weitere Entwicklung war nicht mehr autochthon. Die chinesische Astronomie behielt jedoch ihren traditionellen und konservativen Charakter bei, bis im 16. Jahrhundert Jesuiten mit der Neuordnung des Kalenders beauftragt wurden und die westliche Astronomie einführten. Der einzige eigenständige Beitrag, den China zur Entwicklung der Astronomie lieferte, war die sorgfältige Beobachtung und Dokumentation von Himmelserscheinungen in den Jahrhunderten, in denen weder die orientalische noch die abendländische Astronomie aktiv war. Dazu gehören Sichtungen des Halleyschen Kometen in den Jahren 989, 1066, 1145 und 1301, sowie der Supernova 1054 im Sternbild Stier, an deren Stelle heute der Crab-Nebel steht.

c) Mesopotamien

Das Zweistromland zwischen den Flüssen Euphrat und Tigris, der fruchtbare Halbmond, ist ebenfalls ein Beispiel für die frühe Entwicklung einer Hochkultur. Anders als zum Beispiel das Niltal ist es nicht, etwa durch zusammenhängende Randgebirge oder Wüsten, abgeschlossen. Es hat daher in ihm ständig Wanderungsbewegungen gegeben, die seine Geschichte sehr wechselvoll machten [17,18]. Dabei lassen sich grob drei Perioden unterscheiden:

Sumerer und Akkader (3000-900 BC)

Schriftliche Zeugnisse gibt es seit etwa 3000 BC. Zu dieser Zeit war der Süden des Landes von den Sumerern besiedelt, die die Keilschrift entwickelt hatten. Dabei werden in ein Tontäfelchen mit einem Griffel keilförmige Vertiefungen gedrückt und dieses dann gebrannt. Ein solches Zeichen stellt eine Silbe aus einem Vokal und einem oder zwei Konsonanten dar. Die Herkunft der Sumerer ist unklar. Ihre Sprache ist weder semitisch noch indogermanisch, am ehesten der der Turkvölker verwandt. Wahrscheinlich stellen auch sie nicht die Urbevölkerung dar. Sie haben das untere Flußtal durch Bewässerung urbar gemacht und eine Reihe berühmter Städte gegründet (Eridu, Ur, Uruk, Lagash, Nippur, Larsa), die ständig um die Vorherrschaft kämpften. Die ursprünglichen Lokalgötter bildeten ein Pantheon mit den Göttern der Städte als Hauptgöttern (Eridu: Ea, Uruk: Anu, Nippur: Enlil), wobei ein Machtwechsel sich auch im Rang der Götter auswirkte. Daneben traten später auch nichtlokale Naturgötter, hauptsächlich Gestirnsgottheiten (Ur: Sin - Mond, Sippara: Shamash - Sonne, Babylon: Ishtar - Venus).

Im Laufe der Zeit wuchs der Einfluß der semitischen Akkader im Norden (Akkad, Sippara, Borsippa, Babylon) wegen ihrer militärischen Überlegenheit und durch weitere semitische Einwanderung. Es kam zur Errichtung von größeren Reichen, die ganz Mesopotamien umfaßten, allerdings meist nur kurzlebig waren, so z.B. unter Sargon von Akkad um 2350 BC. Um 2000 BC entstand noch einmal ein sumerisches Reich um Ur und Lagash herum, aber danach gewannen endgültig die Akkader das Übergewicht, und Babylon wurde Hauptstadt. Bekanntester König ist Hammurabi (1729-1686 BC). Die Machtkämpfe waren sehr grausam und führten in der Regel zur Vernichtung der Oberschicht der Besiegten - mit einer Ausnahme: der Verwaltungshierarchie. Die Akkader stellten zwar die Herrscher und das Militär, übernahmen aber weitgehend die Kultur und die Religion der Sumerer. Natürlich wurde jetzt aber Marduk, der Stadtgott von Babylon, zum Hauptgott. Übernommen wurden mit der Priesterhierarchie auch die Archive und die sumerische Keilschrift. Amtssprache war allerdings Akkadisch, zu dessen Wiedergabe sich die Keilschrift nur schlecht

eignete. Man half sich dadurch, daß man z.B. für akkadische Wörter ein Symbol benutzte, das aus dem Anfangslaut des entsprechenden sumerischen Wortes bestand.

Hammurabi schuf eine umfassende Gesetzgebung [19]. Es gab ein detailliertes Vertragsrecht und Geldgeschäfte, wobei die Tempel und ihre Archive als Notariate dienten. Der Kalender war ein Mondkalender, die zwölf Monate sind mit ihren semitischen Namen erhalten:

Nisannu, Airu, Simannu, Duzu, Abu, Ululu,
Tishritu, Arach-Samma, Kislimu, Tebitu, Sabatu, Adaru.

Die astronomischen Beobachtungen wurden bei der in diesem Klima meist ausgezeichneten Sicht von den Plattformen der hohen Tempel (Zikurat) vorgenommen, zu denen auch der in der Bibel erwähnte "Turm von Babel" gehörte [20,21,22,23]. Der Monat begann mit dem Sichtbarwerden der Sichel des neuen Mondes am Abendhimmel. Zu diesem Zeitpunkt war der Mond allerdings schon ungefähr 1.4 Tage alt. Die weiteren Tage wurden dann bis 29 oder 30 durchgezählt. Der Wechsel zwischen 29 und 30 Tagen wurde letztlich empirisch bestimmt (Schalttage). Um den Zusammenhang zwischen Monat und Jahreszeit nicht zu verlieren - im Monat Duzu fand z.B. die Saat statt, im Monat Sabatu die Ernte - mußten von Zeit zu Zeit Schaltmonate eingefügt werden, im allgemeinen ein zweiter Adaru. Das Einschalten erfolgte, wenn sich Monat und Jahreszeit, zum Beispiel die Ernte, zu weit verschoben hatten, durch königlichen Befehl. Manchmal waren in einem Jahr zwei Schaltmonate erforderlich, dann gab es auch einen zweiten Ululu. Ein solcher Fall wird durch das folgende Dokument belegt:

"So spricht Hammurabi: Da das Jahr schlecht ist, soll der nächste Monat ein zweiter Ululu sein. Die am 25. Tishritu fälligen Tribute an Babylon sind schon am 25. Ululu II zu entrichten."

Der Steuertermin wurde also nicht verschoben!

Das Einschaltverfahren wurde später systematisiert durch Beobachtung der Veränderung der Sternbilder während eines Jahres, z.B. am Abendhimmel. Man ordnete den Monaten Einzelsterne oder Sternbilder zu, die in diesem Monat ihren heliakischen Aufgang hatten. Aus dieser Zeit stammen auch die Namen von Sternen (Regulus, Spica) und Konstellationen des Tierkreises, die sich zum Teil (Taurus, Gemini, Leo, Scorpio, Sagittarius, Capricornus) bis in unsere Zeit erhalten haben. Später wurde die Unterteilung noch verfeinert auf drei Sterne oder Sternbilder (nicht unbedingt aus dem Tierkreis) pro Monat. Sie spielten auch im täglichen Leben eine bedeutende Rolle, so wurden Grenzsteine (kudurru) mit ihren Bildern geschmückt [24]. Neben Sonne und Mond [25] wurde zu dieser Zeit als einziger Planet die Venus beobachtet: "Nin-dar-anna", die Herrin der Himmel, die Schwester des Mondes (vielleicht wegen ihrer sichelförmigen Gestalt?). Aus ihrer Bewegung wurden Omina gestellt. Wichtig waren dabei ihre Konjunktionen mit der Sonne. Aus einer solchen Beobachtungsreihe zusammen mit Konjunktionen des Mondes gelang durch Vergleich mit modernen astronomischen Daten auch die Bestimmung der Regierungszeit von Hammurabi, aber es besteht immer noch eine Unsicherheit um 64 Jahre.

Assyrer (900-500 BC)

Die Assyrer spielten lange nur eine Nebenrolle. Sie waren ebenfalls ein semitischer Volkstamm, noch kriegerischer und kulturferner als ursprünglich die Akkader mit der Hauptstadt und dem Hauptgott Assur. Später nahm ihre Bedeutung ständig zu, und ab ungefähr 800 BC eroberten sie das gesamte Mesopotamien und schufen ein Großreich, das Syrien,

Palästina, Ägypten und Phönizien umfaßte. Hauptstadt wurde Ninive, aber Babylon blieb das geistige Zentrum. Die wichtigsten Könige waren Tiglatpileser III (746-727 BC), Sargon II (722-705 BC), Sanherib (705-681 BC) und Assurbanipal (669-627 BC). Auch sie übernahmen weitgehend die bestehende Verwaltung, Kultur und Religion. Mit wachsender Macht und entsprechendem Reichtum wandten sich die Herrscher der Pflege der Künste und Wissenschaften zu. Assurbanipal legte in Ninive eine große "Bibliothek" an, in der alte Keilschrifttafeln gesammelt und katalogisiert wurden. Natürlich wurde sie von den nächsten Eroberern zerschlagen und angezündet, aber das macht Tontafeln nur härter! Das Assyrische Reich endete 539 BC, als Kyros Babylon eroberte. Vorher war schon 606 BC Ninive zerstört und Babylon unter Nebukadnezar (604-561 BC) Hauptstadt geworden.

Die Festlegung des Kalenders war inzwischen nicht mehr von überragender Bedeutung, die Schaltmonate wurden mit Hilfe heliakischer Aufgänge bestimmt:

"Wenn am ersten Tag des Nisannu der Mond und die Plejaden zusammenstehen, ist es ein gewöhnliches Jahr, wenn sie am dritten Tag zusammenstehen, ist das Jahr voll."

Im zweiten Fall sind die Plejaden noch lange nach Sonnenuntergang sichtbar, d.h. es muß früh im Jahr sein, es ist also ein dreizehnter Monat nötig. Von überragender Bedeutung war jetzt die Astrologie. Sonne und Fixsterne spielten eine geringere Rolle, da sie keine besonderen Phänomene bieten (außer bei Finsternissen), wichtiger waren der Mond und die Planeten, die sich wie lebende Wesen bewegen und direkt mit den Göttern identifiziert werden. Aus ihrem Verhalten wurden Omina abgeleitet (Keilschrifttafel K725) [26]:

"Venus verschwindet im Westen. Wenn Venus schwach wird und verschwindet im Monat Abu, wird ein Gemetzel in Elam sein. Wenn Venus im Abu vom 1. Tag bis zum 30. Tag erscheint, wird es regnen, und die Feldfrüchte werden gedeihen. In der Mitte des Monats erscheint Venus im Löwen im Osten.

Von Nirgal-itar."

Die Planetenpositionen konnten offenbar noch nicht vorherberechnet werden, aber es wurden schon gewisse Regelmäßigkeiten erkannt, so daß ein Ort oder eine Zeit als "falsch" erschienen, was immer ein böses Omen war. Dasselbe galt vom Mond, dessen Lauf zwar recht gut, aber nicht vollkommen bekannt war. Es kamen Abweichungen vor, z.B. Vollmond nicht am Tag 14 oder am Tag 1 noch keine neue Sichel. Noch wichtiger waren Finsternisse. Schon relativ früh wurde erkannt, daß Mondfinsternisse nur bei Vollmond, Sonnenfinsternisse nur bei Neumond auftreten. Sorgfältige Beobachtungen über Jahrhunderte zeigten, daß nach einer Mondfinsternis die nächste frühestens nach 6 Monaten vorkommt. Oft kommt es dann zu einer dritten nach weiteren 6 Monaten, manchmal sogar zu Gruppen von vier oder fünf. Dann bricht die Reihe ab, bis nach 41 oder 47 Monaten eine neue beginnt. Die Ursache dafür liegt darin, daß wenn der Mond sich in der Nähe eines Knotens befindet, die Regression der Mondknoten dafür sorgt, daß das nach 6 Monaten näherungsweise wieder der Fall ist [27]. Noch genauer wiederholen sich die Erscheinungen nach einer noch längeren Periode von 223 synodischen Monaten (= 6585.32 Tagen), also nach 18 Jahren und 11 Tagen, denn dieser Zeitraum entspricht zugleich sehr genau 242 drakonitischen Monaten (= 6585.36 Tagen) und zufällig auch 239 anomalistischen Monaten (= 6585.54 Tagen). Wahrscheinlich haben die Babylonier bei ihrer geduldrigen Beobachtungstätigkeit diese Periodizität, die heute Saros-Zyklus heißt, erkannt.

Perser und Hellenen (500-100 BC)

539 BC eroberte Kyros Babylon (durch Verrat), die Tätigkeit der Handelsmetropole ging aber weiter. Die lokalen Religionen wurden nicht behindert, verloren aber ihre Bedeutung. 538 BC wurde Kambyses Statthalter in Babylon, das ein Handelszentrum und eine (aber nicht mehr die) Hauptstadt des persischen Reiches blieb. Die Bedeutung der Astrologie ging etwas zurück, die Vorherberechnung von Phänomenen wurde erheblich genauer. Wahrscheinlich wurden Meßgeräte mit Teilkreisen verwendet. Die Sternbilder, speziell des Tierkreises, stimmen im wesentlichen mit den heutigen überein und werden von den Griechen weitgehend übernommen. Der Kalender wurde systematisiert, den heliakischen Aufgängen von Sternen wurden Monatsdaten zugeordnet, wobei aber Sprünge durch Schaltmonate vorkommen. Diese Einschaltung von Monaten geschah jetzt regelmäßig, zunächst (um 500 BC) in einem 8-Jahres-Zyklus:

$$12+12+13+12+12+14+12+12 = 99 \text{ m} = 8 \text{ a}$$

Noch genauer war später (ab 387 BC) ein 19-Jahres-Zyklus:

$$12+12+13+12+12+13+12+13+12+12+13+12+12+14+12+12 = 235 \text{ m} = 19 \text{ a.}$$

Der gleiche Zyklus wurde um diese Zeit auch schon in Griechenland benutzt (Meton-Zyklus), wahrscheinlich nicht unabhängig.

Alle praktischen Bedürfnisse, was den Kalender anging, waren damit erfüllt, wobei eigentlich sogar, wie bei den Ägyptern und in der heutigen Zeit, ein reiner Solarkalender ausgereicht hätte, da die Mondphasen kaum einen Einfluß auf das irdische Leben haben. In Babylon waren sie trotzdem von großer Bedeutung, nämlich für astrologische Zwecke. Das galt aber auch für die Positionen der Planeten im Tierkreis, denn diese wurden ja unmittelbar mit den Hauptgöttern der babylonischen Religion identifiziert (Venus=Ishtar, Jupiter= Marduk, Mars=Nergal). Da es natürlich ein großes Interesse an Vorhersagen für die Zukunft gab, war die Vorherberechnung der sehr ungleichförmigen Bewegung der Planeten von großer Wichtigkeit. Sie wurde noch dadurch erhöht, daß in spätbabylonischer Zeit Prognostika nicht mehr nur für den Staat und seine Herrscher, sondern auch für gewöhnliche Bürger gestellt wurden. Grundlage war der bis in unsere Zeit fortwirkende Aberglaube, daß die Stellung der Gestirne in der Geburtsstunde, das Horoskop, für den weiteren Lebensweg wesentlich sei:

Dämon (Goethe)

Wie an dem Tag, der dich der Welt verliehen
Die Sonne stand zum Gruße der Planeten,
Bist alsobald und fort und fort gediehen
Nach dem Gesetz, nach dem du angetreten.
So mußt du sein, dir kannst du nicht entfliehen,
So sagten schon Sybillen, so Propheten,
Und keine Zeit und keine Macht zerstückelt
Geprägte Form, die lebend sich entwickelt.

Die scheinbare Kompliziertheit der Bewegung insbesondere der äußeren Planeten Mars, Jupiter und Saturn liegt daran, daß sie von der selbst bewegten Erde aus beobachtet wird. Besonders auffällig ist, daß ein äußerer Planet in der Nähe der Opposition zur Sonne vor dem Hintergrund der Fixsterne zum Stillstand kommt, mit wachsender Geschwindigkeit zurückläuft (am schnellsten bei der Opposition selbst), wieder stillsteht und schließlich seine Vorwärtsbewegung wieder aufnimmt [28]. Da er sich immer langsamer im Tierkreis

bewegt als die Sonne, wird er von ihr in regelmäßigen Abständen überholt (Konjunktion), allerdings im allgemeinen vor verschiedenen Sternbildern. Zwischen der Umlaufzeit in seiner Bahn (siderische Periode) und dem Abstand zweier Konjunktionen (synodische Periode), beide in siderischen Jahren gemessen, besteht der Zusammenhang:

$$1/T(\text{syn}) = |1/T(\text{sid}) - 1|$$

Wie beim Mond stehen siderische und synodische Umlaufzeit in keinem rationalen Verhältnis zueinander, aber näherungsweise stimmen wie dort ganze Vielfache von synodischen und siderischen Perioden überein, zum Beispiel ist für den Jupiter:

$$76 T(\text{syn}) = 7 T(\text{sid}) = 83 \text{ a}$$

Diesen Zeitraum nannten die Babylonier eine “große” Periode der Jupiterbewegung. Nach ihr wiederholen sich alle Erscheinungen recht genau. Man kann daher die zukünftigen Positionen der Planeten aus den Beobachtungen vor einer oder mehreren großen Perioden vorhersagen.

Die Herrschaft der Perserkönige wurde beendet durch Alexander. Er eroberte Mesopotamien und machte Babylon wieder zur Hauptstadt. Nach seinem frühen Tod zerfiel sein Reich allerdings wieder in Satrapien, daraus wurden Teilkönigreiche, in denen Diadochen herrschten. In Mesopotamien und in Syrien waren es die Seleukiden nach Seleukos (304-281 BC). In dieser Zeit, in der aber auch schon die griechische Astronomie Bedeutung erlangt hatte, blieb die wissenschaftliche Aktivität in Babylon erhalten, obwohl die Stadt ihre wirtschaftliche Bedeutung verloren hatte. Die Hauptstadtfunktion übernahm Seleukia in Syrien, Alexandria wurde führend im Orienthandel. Die Planetenpositionen wurden jetzt in ekliptikalen Koordinaten angegeben, über die Meßgeräte ist allerdings nichts bekannt. Der Tierkreis wurde in Abschnitte von 30° zerlegt, die Zählung begann aber nicht wie heute am Frühlingspunkt. Aus den über Jahrhunderte gesammelten Protokollen wurden jetzt für die einzelnen Planeten die Phänomene zusammengestellt und Berechnungsregeln für ihre Positionen angegeben, die auch Abweichungen von den Kreisbahnen (in unserem Weltbild) und veränderliche Geschwindigkeiten berücksichtigten. Ähnliche Tabellen gestatteten die Berechnung der Konjunktionen von Sonne und Mond und daraus die der Monatsanfänge, wobei ebenfalls die Ungleichmäßigkeiten der der Sonnen- und Mondbewegung berücksichtigt wurden. Mit Hilfe dieser “chaldäischen Tafeln” ließen sich dann die Positionen von Sonne, Mond und Planeten für die Zukunft mit recht hoher Genauigkeit berechnen. Die Anwendungen lagen jetzt allerdings fast ausschließlich auf astrologischem Gebiet.

Der Niedergang Babylons wurde beschleunigt durch die Einfälle der Parther nach 181 BC. 149 BC wurde Babylon zerstört. In einzelnen Tempeln ging die Arbeit allerdings weiter, die letzte erhaltene Keilschrifttafel stammt aus dem Jahre 75 AD. Viele der heimatlos gewordenen Astrologen durchzogen das römische Reich und betritten ihren Lebensunterhalt durch Stellen von Prognostika aufgrund der “chaldäischen Tafeln”. Eine Erinnerung daran findet sich bei Matthäus 2.1, in der Geschichte von den drei Weisen aus dem Morgenland.

Die Wiedergabe der beobachteten Bewegung der Gestirne durch mathematische Modelle und die daraus folgende Vorhersage künftiger Beobachtungen stellen die Grundlage einer Naturwissenschaft dar. Eine Weiterentwicklung war in Babylon aber nicht möglich, da die Träger dieser Wissenschaft als Priester am überkommenen Weltbild festhielten. Danach bewegten sich die Sterne wie lebende Wesen an einer festen Sphäre, die auf dem die Erde

umgebenden Ozean, den “Wassern der Tiefe”, ruhte. Oberhalb befanden sich die “Wasser über der Feste” und der Wohnsitz der Götter. Die Sonne kam morgens durch eine Tür im Osten herein und ging abends durch eine andere im Westen hinaus. Morgen- und Abendstern wurden wechselnd als ein oder zwei Wesen betrachtet. Die Erde war ein großer hohler Berg, in dessen Innerem sich das Totenreich befand. Durch die babylonische Gefangenschaft der Juden fand dieses Weltbild Eingang in die Bibel und beeinflusste dadurch später die Entwicklung der Astronomie.

B2. Griechenland

Gleichzeitig mit der letzten Phase der babylonischen Astronomie kam es zu einer Entwicklung in Griechenland, die so völlig von den früheren verschieden ist, daß man an das Auftreten einer neuen Menschenrasse denken könnte - heute würden phantasievolle Autoren vielleicht Mutationen oder den Besuch von Außerirdischen als Ursache vermuten. Bedingt war sie aber wohl in erster Linie durch die grundsätzlich anderen Voraussetzungen geographischer und politischer Natur.

Im Gegensatz zu Mesopotamien ist Griechenland kein ausgedehntes, fruchtbares Flußtal, sondern besteht außer relativ kleinen Ackerflächen im Innern aus einer langgestreckten, reichgegliederten Küste. Die kleinen Täler sind zum Meer hin offen, voneinander aber durch unwegsame, damals bewaldete, Bergrücken getrennt. In ihnen entwickelte sich eine große Zahl unabhängiger Gemeinwesen oder Kleinstaaten, die nicht durch eine Zentralmacht zusammengehalten wurden. Jedes hatte seine recht unterschiedlichen Lokalgötter, die erst später durch die Dichter zu einem olympischen Pantheon vereinigt wurden. Es fehlte infolgedessen auch eine machtvolle Priesterhierarchie, und die örtlichen Priester waren von relativ geringem Einfluß. Zu einem intensiveren Austausch zwischen diesen Gemeinwesen kam es erst nach der Entwicklung der Seefahrt, aber damit zugleich auch zu Verbindungen über weit größere Entfernungen hinweg, und zur, nicht immer friedlichen, Wechselwirkung mit anderen Kulturen ("Seehandel, Krieg, Piraterie, dreieinig sind sie, nicht zu trennen"). Da für die zunehmende Bevölkerung die vorhandene Anbaufläche nicht ausreichte, wurden jetzt zunächst die vorgelagerten Inseln und die kleinasiatische Küste besiedelt, dann entstanden auch am Schwarzen Meer und auf der Krim sowie im Westen in Süditalien, Südfrankreich und Nordafrika Kolonien.

In einer frühen Phase bis etwa zum Jahre 1100 BC gab es ein Feudalsystem mit mit vielen Kleinkönigen auf ihren Burgen, die über eine Bauernbevölkerung herrschten. Diese agrarischen Gesellschaften standen, wie auch im mittelalterlichen Europa, auf einer relativ niedrigen Stufe der Zivilisation, und entsprechend dürftig waren die astronomischen Kenntnisse. Ihren literarischen Niederschlag, entsprechend dem Nibelungenlied, fand diese heroische Zeit wesentlich später, nämlich um etwa 800 BC, in den Heldenepen des Homer und dem Werk des Hesiod. Dort gibt es auch astronomische Aussagen, etwa bei der Schilderung, wie Hephästos den Schild des Achill schmiedet.

Bildete oben darauf die Erde, das Meer und den Himmel,
Dann auch alle Sterne dazu, die den Himmel umkränzen,
Oben, das Siebengestirn, die Hyaden, die Kraft des Orion,
Und den Bären, den auch mit Namen den Wagen sie nennen,
Der auf der Stelle sich dreht und stets den Orion belauert,
Doch als einziger Teil nicht hat an Okeanos' Bade.
(Homer, Ilias XVIII, 483-489)

Bekannt waren also eine Reihe von Sternbildern, der Himmelspol und zirkumpolare Sterne. Auch die Zuordnung von Sternen und Sterngruppen zu Jahreszeiten (heliakische Auf- und Untergänge) findet sich.

Wenn Orion und Sirius in der Mitte des Himmels stehen und die rosenfingrige Eos den Arktur sieht, ist es Zeit, die Trauben zu pflücken (14. September).
(Hesiod, Werke und Tage)

Die olympischen Götter wurden im Vergleich zu denen Babylons und mehr noch der späteren monotheistischen Religionen sehr menschenähnlich gesehen. Die griechische Mythologie besteht zu einem großen Teil aus Skandalgeschichten, die ihr ausgedehntes Liebesleben untereinander und mit den Menschen betreffen.

Durch die wirtschaftliche Entwicklung, insbesondere den Fernhandel, änderte sich in späterer Zeit das Gesellschaftssystem grundlegend. Die entstehenden Städte beherbergten selbstbewußte, unternehmenslustige Bürger, eine hier erstmals auftretende Menschenklasse, die später ein Gegenstück in der Renaissance fand. Diese "merchant adventurers" kamen auf ihren Seereisen weit herum und waren, anders als traditionsverhaftete Bauern, für Neues aufgeschlossen. In fremden Häfen kamen sie in Kontakt mit Menschen, die ganz anderen Kulturen und Religionen angehörten, und entwickelten dadurch eine kritische Haltung auch gegenüber der eigenen. Das zeigte insbesondere in der von ihnen betriebenen Wissenschaft, die in ihrer Grundhaltung völlig von der Priesterwissenschaft des Orients verschieden ist. Neben der Entwicklung eines Kalenders, die natürlich eine Hauptaufgabe blieb, entstanden jetzt durch die Navigation weitere astronomische Bedürfnisse. Die Erfahrungen bei Seereisen über große Entfernungen und in verschiedene Klimazonen, bei denen sich das Aussehen des Sternhimmels verändert, legten eine Kugelgestalt der Erde nahe.

Im 7. und 6. Jahrhundert BC trat eine ganze Reihe von "Philosophen" auf, die im Gegensatz zu späteren Zeiten durchaus keine weltfremden Denker, sondern weitgereiste und vorurteilslose, praktischen Überlegungen zugeneigte Männer waren. Ihre kühnen Spekulationen beschäftigten sich mehr mit der Suche nach den Ursachen und Folgen der Erscheinungen als mit der Behandlung der Details oder den Beobachtungen. Ihr Weltbild war nicht, wie alle bisherigen, magisch-mystisch, sondern rational. Das Geschehen in der Welt war für sie nicht durch das willkürliche Eingreifen personaler Götter oder Geister bestimmt, sondern durch Ordnungen und Gesetze, die für den Verstand des Menschen erfaßbar sind. Anders allerdings als nach der heutigen Naturwissenschaft verläuft es nicht kausal, sondern final, teleologisch nach übergeordneten geistigen Prinzipien. Die anthropomorphen olympischen Götter kommen darin nicht mehr vor, die Grundhaltung ist weitgehend atheistisch oder pantheistisch, was nach Schopenhauer ja nur eine höfliche Form des Atheismus ist.

Von den Werken dieser Naturphilosophen ist unmittelbar nichts erhalten, und die Nachrichten darüber sind lückenhaft und widersprüchlich. Das ist nicht verwunderlich, da spätere Autoren wie Plato und Aristoteles diese von den ihrigen abweichenden Meinungen nur selten objektiv wiedergeben. In noch höherem Maße gilt das von den christlichen Quellen, die darin nur Material zur Polemik gegen die von ihnen bekämpfte "törichte Weisheit der Heiden" suchten.

Die älteste dieser Schulen war die der ionischen Naturphilosophen. Sie "vertrieben die Mythologie durch Technologie" in der Überzeugung, daß das Universum als Ganzes in der gleichen Weise funktioniert wie der kleine Bereich, den der Mensch beherrscht. Die wichtigsten Vertreter sind:

Thales von Milet (624-547 BC)

Er behauptete, daß das Wasser der Ursprung aller Dinge sei. Die Erde schwimmt darauf als eine flache Scheibe. Nach oben wird die Welt abgeschlossen durch die Himmelskuppel. Angeblich hat Thales sein astronomisches Wissen von einer Reise aus Ägypten mitgebracht, und Herodot behauptet, daß er die Sonnenfinsternis während der Schlacht am Halys (584 BC) "auf ein Jahr" vorhergesagt habe - offensichtlich eine Fabel.

Anaximander von Milet (611-546 BC)

Für ihn war das Unendliche die Ursache aller Dinge. Die Erde schwebt in der Mitte der Welt, da alle Richtungen, in die sie fallen könnte, gleichwertig sind, hat jedoch die Form eines flachen Zylinders. Die Himmel sind Kugelschalen, aber die Fixsterne sind der Erde am nächsten, die Sonne am fernsten. Sonne und Mond sind hohle, mit Feuer gefüllte Ringe. Ihr Licht quillt aus kreisförmigen Löchern, die bei Finsternissen oder Mondphasen teilweise geschlossen werden.

Anaximenes von Milet (585-526 BC)

Er betrachtete die Luft als den Ursprung aller Dinge. Der Himmel ist eine Halbkugel aus Kristall, die sich wie eine Kappe dreht und an die die Sterne wie Nägel geheftet sind. Die Erde schwebt auf der Luft. Sonne, Mond und Sterne werden unsichtbar, weil sie hinter einem hohen Berg im Norden verschwinden.

Fast zur gleichen Zeit entstand in Süditalien eine andere Schule, die der Eleaten. Ihre wichtigsten Vertreter sind:

Xenophanes von Kolophon (570-478 BC)

Er war mehr Dichter als Philosoph. Nach ihm ist die Erde flach und unbegrenzt. Die Himmelskörper, einschließlich der Kometen, bestehen aus Dämpfen, die von der Erde aufsteigen, zu Wolken verdichtet werden und sich entzünden. Die Sonne wird morgens angezündet und abends gelöscht, sie ist jeden Tag neu. Der Mond hat eigenes Licht und wird zu Beginn eines Monats angezündet, am Ende gelöscht. Entsprechendes geschieht bei Finsternissen.

Parmenides von Elea (504-450 BC)

Er hat als erster die Kugelgestalt der Erde gelehrt, wenn auch wohl nicht entdeckt. Der Himmel ist in Kugelschalen aufgebaut, aber die Schale der Fixsterne ist die unterste. Der Mond empfängt sein Licht von der Sonne.

Neben diesen Schulen gab es eine Reihe weiterer Naturphilosophen, die dazu in mehr oder weniger enger Verbindung standen:

Heraklit von Ephesus (≈ 500 BC)

Seine wichtigste Idee war, daß alles im Fließen ist ("panta rhei") und unaufhörlich auf- und niedersteigt. Die Himmelskörper sind Becken, in denen sich von der Erde aufgestiegene Dämpfe sammeln und entzünden. Durch Drehen dieser Behälter wird teilweise der dunkle Boden sichtbar, wodurch die Mondphasen und die Finsternisse entstehen.

Empedokles von Agrigent (494-434 BC)

Von ihm stammt die Lehre von den vier Elementen Feuer, Luft, Wasser, Erde. Das Universum ist eine Kugel, an deren Innenseite die Fixsterne befestigt sind, während die Planeten sich frei bewegen können. Die Kugelschale hat eine Tag- und eine Nachthälfte, und die Sonne ist ein Spiegelbild der Taghälfte. Sonnenfinsternisse entstehen, wenn der flache Mond vor der Sonne vorbeigeht.

Die für die Entwicklung der Astronomie in Griechenland wichtigste philosophische Schule war die der Pythagoreer. Sie wurde um 540 BC herum in Kroton in Süditalien gegründet, bestand mehr als zwei Jahrhunderte und hatte den Charakter einer religiösen Bruderschaft oder eines Geheimbundes. Ihre Einmischung in die politischen Verhältnisse führte zur Verfolgung in Süditalien. Ihr berühmtestes Mitglied ist ihr Gründer:

Pythagoras von Samos (580-500 BC)

Vor seiner Niederlassung in Kroton hat er angeblich größere Reisen in den Orient, insbesondere nach Ägypten und Babylon unternommen und dort seine astronomischen Kenntnisse erworben. Es sind keine Werke von ihm überliefert, und es ist nicht klar, welche der

mathematischen und naturwissenschaftlichen Entdeckungen seiner Schule auf ihn selbst zurückgehen und welche von seinen Schülern gemacht wurden, da in späterer Zeit die Neigung bestand, möglichst viel dem Meister selbst zuzuschreiben.

Die Leitidee der Pythagoräer war, daß sich alles auf Zahlen, insbesondere auf ganze Zahlen und ihre Verhältnisse, zurückführen läßt. Das Weltall war ihrer Meinung nach von Harmonien erfüllt ("Sphärenmusik"). Nach der Lehre des Pythagoras ist die Welt ein gesetzmäßiges, harmonisches, beseeltes Ganzes ("Kosmos"). Sie ist kugelförmig und aus den vier Elementen aufgebaut. Im Mittelpunkt befindet sich die ebenfalls kugelförmige Erde, die rundherum bevölkert ist (Antipoden), mit fünf Klimazonen. Morgen- und Abendstern sind identisch. Sonne und Mond wurden zunächst als Scheiben betrachtet, später als Kugeln. Zu Beginn des 5. Jahrhunderts BC wurde dieses Weltmodell wesentlich verändert durch:

Philolaus von Tarent (≈ 500 BC)

Danach wird die Mitte der Welt nicht von der Erde eingenommen, sondern von einem Zentralfeuer ("Herd des Universums"). Um dieses herum bewegt sich sehr weit innen die Erde in einem Tag in gebundener Rotation. Die tägliche Drehung der Fixsternsphäre ist also nur scheinbar, ebenso die entsprechende der Himmelskörper. Weiter außen umlaufen das Zentralfeuer der Mond, die Sonne und die Planeten sowie die Fixsternsphäre. Innerhalb der Erdbahn befindet sich ein weiterer Körper, die Gegenerde (Antichthon), der ebenfalls in einem Tag umläuft und den Blick auf das Zentralfeuer versperrt. Damit ist die Gesamtzahl der Weltkörper die den Pythagoräern heilige Zehn. Die Bewegung der Erde um das Zentralfeuer wurde im Mittelalter, insbesondere auch von Kopernikus, mißverstanden als ein Umlauf um die Sonne. Eine Rotation der Erde um ihre Achse vertraten auch die Pythagoräer Hiketas und Ekphantus, beide von Syrakus.

Während alle bisherigen Naturphilosophen in den Randgebieten des griechischen Siedlungsraumes gelebt hatten, konzentrierte sich im 5. Jahrhundert BC das geistige Leben in Athen. Der erste Philosoph dieser Richtung dort war:

Anaxagoras von Clazomenae (500-428 BC)

Er ließ sich in Athen nieder und war ein persönlicher Freund des Perikles. Für ihn war das bewegende Prinzip des Weltalls der Geist. Das Weltall ist nach seiner Lehre eine Kugel, die Erde dagegen eine von der Luft getragene flache Scheibe. Die Sterne gehen unter der Erde durch. Der Mond wird von der Sonne erleuchtet. Seine Phasen und die Finsternisse sind Beleuchtungseffekte. Der Fall eines Meteoriten brachte ihn zu der Ansicht, daß die Sonne "ein glühender Stein, größer als der ganze Peloponnes" sei. Das brachte ihm ein Verfahren wegen Gotteslästerung und die Verbannung ein, eine ähnliche Anklage wurde übrigens auch gegen Sokrates erhoben: "Er sagt, daß die Sonne ein Stein und der Mond eine Erde sei." Der eigentliche Grund für den Prozeß war aber wohl, daß man damit Perikles zu treffen hoffte.

Das Weltbild des Philolaus blieb auf die pythagoräische Schule beschränkt, aber in der zweiten Hälfte des 5. Jahrhunderts BC war die Lehre von der Kugelgestalt der Erde von den Gebildeten weitgehend angenommen. Dieser Fortschritt betraf allerdings mehr die Kosmologie als die eigentliche Astronomie. Der Bedarf für die letztere war vorhanden, aber nicht sehr groß. Für die Seefahrt spielten Navigation und Zeitrechnung eine Rolle, aber im Mittelmeer, wo die Küsten stets sehr nahe sind, reichte dafür die Bestimmung der Himmelsrichtungen und der Zeit. Dazu wurden in der Nacht die Aufgänge der Sternbilder des Tierkreises, weitgehend aus Babylon übernommen, benutzt, am Tage Sonnenuhren.

Der Kalender war seit alters ein Lunisolarkalender. Die Monate hatten abwechselnd 30 ("voll") und 29 ("hohl") Tage, in 16 Jahren wurden 3 Tage hinzugefügt. Monatsnamen

und Jahresbeginn waren von Stadt zu Stadt verschieden, häufig wurden die von Athen benutzt. Die Jahreszählung erfolgte nach den lokalen Herrschern, der Vergleich wird aber durch die gemeinsamen Olympiaden erleichtert. Die Anpassung an das tropische Jahr geschah lange wie in Babylon durch Einfügung eines dreizehnten Monats mittels heliakischer Aufgänge und wurde von den lokalen Autoritäten recht willkürlich, wieder von Stadt zu Stadt verschieden, verfügt und den Bürgern durch Anschläge ("parapegmata") bekanntgegeben. Zu einem systematischen Schaltverfahren kam es zunächst um 520 BC herum durch Cleostratos von Tenedos mit einer Periode von 99 Monaten entsprechend 8 Jahren ("Oktaeteris"), dann um 433 BC durch den Athener Meton mit einem Zyklus von 235 Monaten entsprechend 19 Jahren oder 6940 Tagen. Der letztere ist identisch mit dem um diese Zeit in Babylon verwendeten und wahrscheinlich nicht unabhängig davon. Die Länge der Jahre schwankte wegen des Schaltens zwischen 354 und 384 Tagen, was zu Sprüngen der Daten beispielsweise für die Solstitien führte.

Im 5. Jahrhundert BC, der Blütezeit Griechenlands, änderten sich die politischen und wirtschaftlichen Verhältnisse wesentlich. Athen war jetzt eine Weltmacht. Seine durch den Handel reichgewordenen Bürger regierten über zahlreiche Handwerker und Sklaven und sahen auf alle praktische Tätigkeit mit Verachtung als eines freien Bürgers unwürdig herab. Dieser sollte sich statt dessen mit Philosophie, Politik und Mathematik beschäftigen. Mit der letzteren war aber nur die Geometrie gemeint, die Arithmetik galt als zu praktisch und kaufmännisch. Insbesondere wurde, ganz anders als bei den Ioniern, die Technik abgelehnt. Schon das Wort hat die Bedeutung von Betrug, Manipulation. Hier liegt vielleicht die Ursache, daß es während des gesamten Altertums nicht zu einer stärkeren Entwicklung der experimentellen Naturwissenschaft kam.

Auch die Philosophie trat mit den Sophisten, Sokrates (470-399 BC) und Plato (427-347 BC) in eine neue Phase. Sie beschäftigte sich jetzt vornehmlich mit den Problemen von Mensch, Staat und Gesellschaft statt mit der Kenntnis der Natur, die zum Beispiel von Sokrates geringgeschätzt wurde. Auch in den Werken Platos nimmt sie nur einen kleinen Raum ein und ist überdies in symbolisch-allegorische Formen gekleidet. Wirklich sind für ihn nicht die Gegenstände der Natur, sondern ihre geistigen Urbilder, die Ideen, von denen sie nur unvollkommene Abbilder sind, wie es im Höhlengleichnis des "Timäus" beschrieben wird. Zwischen der Welt der Ideen und der materiellen Welt ist die Mathematik anzusiedeln, die allerdings nicht die Wahrheit, sondern nur einen hohen Grad von Wahrscheinlichkeit erreichen kann. Der Kosmos ist ein vollkommenes, lebendes Wesen als Abbild des Göttlichen. Im "Timäus" wird beschrieben, wie das schöpferische göttliche Prinzip, der Demiurg, diese Weltseele als rotierende Kugel erschafft und in ihr dann durch Mischung des "Gleichen" mit dem "Verschiedenen" und dem "Wesentlichen" alle Dinge entstehen, unter anderem auch die Planeten.

Er [der Demiurg] teilte das Ganze dieser Mischung der Länge nach in zwei Hälften und legte sie kreuzweise übereinander wie beim Buchstaben X; dann bog er sie zu Kreisen und verband sie mit sich selbst und dem anderen so, daß ihre Enden sich am Punkt gegenüber ihrem Schnittpunkt trafen, versetzte sie in gleichförmige Drehung um den gleichen Mittelpunkt und tat den einen Kreis nach außen, den andern nach innen. Die Bewegung des äußeren Kreises nannte er "Gleichheit", die des inneren "Verschiedenheit". Er ließ den Kreis der Gleichheit sich längs der Seite eines Parallelogramms nach rechts, den der Verschiedenheit längs der Diagonale nach links bewegen. Die Überlegenheit gab er dem Kreise des Gleichen und Ähnlichen, denn ihn ließ er ungeteilt, aber den inneren teilte er in sechs Teile und bildete so sieben ungleiche Kreise, angeordnet nach doppelten und dreifachen Intervallen, von jedem drei. Er ließ diese Kreise sich in entgegengesetzten Richtungen zueinander bewegen, drei

mit gleicher Geschwindigkeit, die anderen vier mit Geschwindigkeiten, die untereinander und von denen der ersten drei verschieden waren, aber in einem festen Verhältnis bezüglich der Geschwindigkeit.

Es handelt sich um die Beschreibung eines kugelförmigen Universums. Der Kreis der Gleichheit ist der Himmelsäquator auf der Fixsternschale. Hier bewegt sich alles mit der gleichen Geschwindigkeit. Der Kreis des Verschiedenen ist die Ekliptik, auf ihr bewegen sich die sieben Planeten (einschließlich Mond und Sonne) mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Diese beiden Kreise schneiden sich in zwei gegenüberliegenden Punkten und bilden einen Winkel miteinander. Die Anordnung der Abstände geschieht nach einer Mischung der beiden geometrischen Reihen 1,2,4,8 mit dem Quotienten 2 und 3,9,27 mit dem Quotienten drei, die Reihenfolge von Mond, Sonne, Venus, Merkur, Mars, Jupiter und Saturn ist also 1,2,3,4,8,9,27. Sie werden an anderer Stelle in Beziehung zu Tonleitern gesetzt, ein Rückgriff auf die Zahlenmystik der Pythagoräer. Was die Namen der Planeten angeht, so beruft er sich auf "Barbaren, die in einem günstigeren Klima lebten", also auf die Babylonier, deren Gestirngottheiten hier ihre griechischen Entsprechungen Selene, Helios, Aphrodite, Hermes, Ares, Zeus und Kronos zugewiesen werden. Sonne, Merkur und Venus bewegen sich tatsächlich im Tierkreis im Mittel mit der gleichen Geschwindigkeit, die äußeren Planeten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Sie alle wurden "zur Erzeugung und Bewahrung der Zeit" geschaffen. Es finden sich auch Angaben über die Farben und bei den äußeren Planeten über die relativen Geschwindigkeiten, aber die zeitweise Rückläufigkeit wird nicht erwähnt.

Viele Aussagen in den platonischen Dialogen sind in mystisch-allegorisch-poetisches Dunkel gehüllt und nicht in ein konsistentes Bild physikalischer Fakten übersetzbar. Während im naturwissenschaftlichen Weltbild die mathematische Theorie nur eine unvollkommene Annäherung an die empirisch gegebene Wirklichkeit darstellt, ist es bei Plato und den idealistischen Philosophen allgemein gerade umgekehrt: Die Welt der Erfahrungen ist eine unvollkommene Näherung der wirklichen Welt der Ideen, die nur durch die Seele erfaßt werden kann. Wirkliche Astronomie kann man daher nach Plato nur betreiben, wenn man von der Betrachtung des gestirnten Himmels absieht und sie als geometrisches Problem betrachtet. Ein lohnende Aufgabe ist es daher, "die gleichförmigen und geordneten Bewegungen herauszufinden, durch deren Annahme die scheinbaren Bewegungen der Planeten dargestellt werden können".

Diese Aufgabe wurde durch den berühmten Mathematiker Eudoxus von Knidus (408-355 BC) auf geniale Weise gelöst. Sein Werk ist zwar nicht erhalten, aber ein Auszug findet sich bei dem Aristoteles-Kommentator Simplicius im 5. Jahrhundert und wurde in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts von Schiaparelli zur Rekonstruktion benutzt. Eudoxos betrachtet zunächst eine Kugel, die sich mit konstanter Winkelgeschwindigkeit um eine feste Achse dreht. In ihrem Innern ist eine zweite angebracht, die mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit im umgekehrten Sinn rotiert, aber um eine Achse, die mit der ersten einen Winkel bildet. Ein Punkt auf dem Äquator der inneren Kugel beschreibt dann eine geschlossene Kurve, Hippoped genannt, weil sie dem Weg des Pferdes in der Reitschule ähnelt [29].

Die äußere Kugel möge mit der Winkelgeschwindigkeit ω um die z -Achse im positiven Sinne rotieren, die innere im negativen um eine Achse, die mit der ersten den Winkel α bildet. Mit den Anfangsbedingungen $x(0) = R, y(0) = z(0) = 0$ ergibt sich dann für das Hippoped in Kugelkoordinaten

$$r(t) \equiv R \quad , \quad \sin^2 \varphi = \frac{(1 - \cos \alpha)^2 (\sin^2 \vartheta - \cos^2 \alpha)}{\sin^4 \alpha \tan^2 \vartheta}$$

und als Parameterdarstellung in kartesischen Koordinaten

$$\begin{aligned}x(t) &= R[1 - (1 - \cos \alpha) \sin^2(\omega t)] \\y(t) &= R(1 - \cos \alpha) \sin(\omega t) \cos(\omega t) \\z(t) &= -R \sin \alpha \sin(\omega t)\end{aligned}$$

Für die Projektionen auf die xy -, xz - und yz -Ebene gilt:

$$\begin{aligned}\left[x - \frac{R}{2}(1 + \cos \alpha)\right]^2 + y^2 &= \left[\frac{R}{2}(1 - \cos \alpha)\right]^2 \\x &= R\left[1 - \frac{(1 - \cos \alpha)}{R^2 \sin^2 \alpha} z^2\right] \\y^2 &= \frac{(1 - \cos \alpha)^2}{\sin^2 \alpha} z^2 \sqrt{1 - \left(\frac{z}{R \sin \alpha}\right)^2}.\end{aligned}$$

Die erste ist ein Kreis, der die Kugel von innen berührt, das Hippoped ist also die Schnittlinie der Kugel mit einem Zylinder. Die zweite Projektion ist eine Parabel und die dritte eine Kurve, die sehr einer Lemniskate ähnelt. Während für diese das Verhältnis von Breite zu Länge aber konstant ($1 : \sqrt{3}$) ist, hat es hier den Wert $(1 - \cos \alpha)/2 \sin \alpha$, hängt also von α ab. Für kleine α wird es $\approx \alpha/4$.

Die Überlagerung der gleichförmigen Bewegung in einer Richtung mit der auf einem Hippoped führt neben einer kleinen seitlichen Bewegung zu einer veränderlichen Geschwindigkeit, die sogar eine zeitweilige Umkehr ergeben kann. Damit läßt sich näherungsweise die Schleifenbildung von Planetenbahnen reproduzieren. Die Durchführung dieses Programms ist umso bewunderungswürdiger, als es ausschließlich mit den Hilfsmitteln der Geometrie ohne die der Trigonometrie erfolgt. Eudoxos verwendet für jeden Planeten vier konzentrische (homozentrische) Kugeln. Die erste gibt die tägliche Drehung des Fixsternhimmels wieder und die zweite einen gleichförmigen Umlauf mit der siderischen Periode in der Ekliptik, während die dritte und vierte zur Darstellung der Geschwindigkeitsvariation ein Hippoped erzeugen, das in der synodischen Periode durchlaufen wird. Für die Sonne und den Mond kommt Eudoxus mit drei Kugeln aus, insgesamt ergeben sich also 26 Sphären. Das Verfahren gibt die Bewegung von Jupiter und Saturn in recht guter Näherung wieder, versagt aber, zum Teil wegen unzureichenden Beobachtungsmaterials, bei Mars und Venus und ergibt für Merkur nur eine mäßige Übereinstimmung.

Sein Schüler Kalippus von Kyzikus (390-300 BC) verbesserte es, unterstützt von Aristoteles, durch Hinzunahme weiterer Kugeln. Er war zugleich Beobachter und stellte, wie etwa zur gleichen Zeit auch die Babylonier, fest, daß die Sonne in der Ekliptik mit ungleichförmiger Geschwindigkeit umläuft. Das hat zur Folge, daß die Jahreszeiten nicht gleich lang sind. Kalippus gab dafür 94, 92, 89 und 90 Tage an, was mit den exakten Werten von 94.1, 92.2, 88.6 und 90.4 bis auf Tagesbruchteile übereinstimmt. Er nahm für Mars, Venus und Merkur je eine sowie für die Sonne und den Mond je zwei zusätzliche Kugeln an und konnte mit diesen insgesamt 33 Sphären alle Bewegungsunregelmäßigkeiten mit leidlicher Genauigkeit darstellen. Die Theorie der homozentrischen Kugeln von Eudoxos und Kalippus wurde später abgelöst durch die Epizykeltheorie von Hipparch und Ptolemäus, stellt aber in der wechselseitigen Verknüpfung von Beobachtung und Theorie und der Anwendung der Geometrie auf den Himmel den Beginn der wissenschaftlichen Astronomie dar.

Die zentrale Figur in der Philosophie des 4. Jahrhunderts BC ist Aristoteles von Stagira (384-322 BC), nach seiner mazedonischen Geburtsstadt oft einfach "der Stagirit" genannt. In Athen wurde er ein Schüler von Plato, später beauftragte ihn Philipp von Mazedonien mit der Erziehung seines Sohnes Alexander. Nach seiner Rückkehr nach Athen gründete

er eine eigene Philosophenschule, das Lycäum, dessen Mitglieder wegen ihrer Gewohnheit, umherwandelnd zu diskutieren, als Peripatetiker (“Spaziergänger”) und ihre Philosophie als peripatetisch bezeichnet wurden. Er wurde, wie vor ihm Anaxagoras und Sokrates, wegen Gotteslästerung angeklagt und verbrachte seine letzten Lebensjahre im Exil.

Im Gegensatz zu Plato sind für ihn die sichtbaren Erscheinungen, die Phänomene, wirklich und nicht nur verzerrte Bilder der Welt der Ideen, sondern entstehen durch deren Einwirkung auf die ungeformte Materie. In der Welt der Erscheinungen gibt es ständige Bewegung und Wandel, während die Ideen als das Wesentliche unveränderlich sind und nur durch den Geist erkannt werden können. Es ist wichtig, möglichst viele Beobachtungen sorgfältig durchzuführen und zu beschreiben, um sie dann später durch logische Deduktion aus dem Wesen der Dinge durch als notwendige logische Folgerungen abzuleiten. Aristoteles bemüht sich daher um eine enzyklopädische Zusammenstellung des Wissens seiner Zeit, wobei die Naturwissenschaften und insbesondere die Physik und die Astronomie nur einen relativ kleinen Teil darstellen. Seine Argumentation wirkt heute oft sehr gekünstelt und nimmt streckenweise einen dogmatischen Charakter an, sein Weltbild ist aber sehr geschlossen, von innerem Zusammenhang und großer Harmonie.

Das Universum ist für ihn kugelsymmetrisch in Schalen um einen Mittelpunkt herum aufgebaut und wird begrenzt durch die Fixsternsphäre [30]. Außerhalb befindet sich nichts, auch kein leerer Raum, der für ihn denkunmöglich ist. Durch die Sphäre des Mondes wird die Welt in zwei wesentlich verschiedene Bereiche geteilt, den Himmel oberhalb und die irdische oder sublunare Welt unterhalb. Beide sind in gleicher Weise rational, aber aus verschiedenem Material aufgebaut. Die Materie der irdischen Welt ist, wie bei Plato und den Pythagoräern, aus den vier Elementen Feuer, Luft, Wasser und Erde gemischt und hat je nach ihrer Zusammensetzung an deren Eigenschaften kalt oder warm, feucht oder trocken teil. Feuer ist warm und trocken, Luft kalt und trocken, Wasser warm und feucht und Erde kalt und feucht. Auch Schwere und Leichtigkeit sind, wie Farbe oder Oberflächenbeschaffenheit, innere Eigenschaften der Körper, wobei “leicht” absolut und nicht nur ein geringerer Grad von “schwer” ist. Die irdische Materie ist stetem Wandel unterworfen, ganz anders dagegen die himmlische. Sie besteht aus dem fünften Element, der “quinta essentia” oder dem Äther, und ist unwandelbar wie die Ideen. Das ganze System ist einmal geschaffen worden, dauert aber ewig fort.

In dieser Welt gibt es zwei Arten von einfachen Bewegungen, in gerader Linie zum Zentrum hin und von ihm weg und deshalb notwendig begrenzt, sowie auf Kreisen um das Zentrum herum und damit ewig und unbegrenzt. Die erste Art ist für irdische Körper die natürliche. Diese haben, wenn sie absolut schwer sind, das Bestreben, ihren natürlichen Ort in der Nähe des Zentrums aufzusuchen, wenn sie absolut leicht sind, sich so weit als möglich der Sphäre des Mondes zu nähern. Diese natürlichen oder freien Bewegungen geschehen aus innerem Antrieb heraus und bedürfen keiner äußeren Einwirkung. Im Gegensatz zur modernen Naturwissenschaft verlaufen die Vorgänge also nicht kausal, sondern final, teleologisch. Seitliche Bewegungen müssen durch unmittelbaren Kontakt von außen erzwungen werden. Problematisch und schon für die Zeitgenossen nicht sehr einleuchtend ist die Erklärung der Wurfbewegung: Nach dem Verlassen der Hand überträgt diese einen Bewegungsvorrat (“Impetus”) auf die angrenzende Luft, die ihrerseits auf den geworfenen Körper einwirkt und seine weitere seitliche Bewegung verursacht. Dabei sammelt sich die an seiner Vorderseite verdrängte Luft wegen des “horror vacui” hinter ihm und übt einen Schub aus. Nach der Erschöpfung des Bewegungsvorrats erfolgt der Übergang in die natürliche Bewegung, also den Fall, wobei der Körper um so schneller fällt, je schwerer er ist.

In völligem Gegensatz dazu erfolgen die Bewegungen der aus Äther aufgebauten Him-

melskörper auf idealen Kreisbahnen oder zumindest auf Kugeln und sind unveränderlich. Grundsätzlich sind alle Änderungen im himmlischen Bereich, wie zum Beispiel die Mondphasen, nur scheinbar. Kometen und Meteore („Lufterscheinungen“) müssen sich daher, wie die Wolken, in der sublunaren Welt bewegen. Im Gegensatz zu Eudoxus und Kalippus sind für Aristoteles die Sphären der Planeten nicht nur mathematische Abstraktionen, sondern körperlich als Kristallkugeln vorhanden. Das göttliche Grundprinzip wirkt von außen in diese Welt hinein und setzt sie in Bewegung, die sich über die Sphären nach innen überträgt. Auf die vier Kugeln des Saturn folgen daher drei weitere, die nur die Aufgabe haben, die drei speziellen Bewegungen dieses Planeten zu kompensieren, damit für den Jupiter nur die tägliche Bewegung verbleibt. Entsprechendes gilt für die weiteren Himmelskörper, wobei der Mond allerdings keiner Kompensationssphären bedarf, da er ohnehin keine Bewegung auf die Erde überträgt. Insgesamt ergibt sich so ein riesiger Mechanismus von 55 ineinander geschachtelten rotierenden Kugeln, in deren Mitte die Erde ruht. Gegen deren Bewegung sprechen außer metaphysischen Argumenten nach Meinung des Aristoteles nach auch eine Reihe physikalischer. So müßten alle Dinge, die nicht fest mit der Erde verbunden sind, wie die Luft und die Wolken, wegen der rasenden Umdrehung hinter ihr zurückbleiben. Ein fallender Stein würde weit hinter dem Abwurfpunkt auftreffen, wie es nach seiner Meinung auch ein Stein tut, der vom Mast eines schnell segelnden Schiffes fällt. Diese unzutreffende Behauptung wurde bis in die Neuzeit häufig wiederholt, aber nie überprüft.

Die Philosophie des Aristoteles geht, wie alle idealistischen Philosophien, davon aus, daß die Wahrheit allein durch das Denken erkannt werden kann. Der Vergleich mit der Erfahrung liefert nur eine, im Prinzip überflüssige, Bestätigung. Insbesondere spielen Experimente als gezielte Fragen an die Natur keine Rolle. Dieses philosophische System ist so gebaut, daß es alle bekannten Fakten erklären kann, sich also mit ihnen in Übereinstimmung befindet. Es ist daher, was Naturphänomene angeht, bis auf wenige Ausnahmen im Sinne des Wissenschaftstheoretikers Karl Popper nicht falsifizierbar. Damit ist es für die naturwissenschaftliche Erkenntnis weitgehend wertlos, da es im allgemeinen nicht in der Lage ist, über neuartige Erscheinungen qualitative oder gar quantitative Voraussagen zu machen, die dann im Versuch überprüft werden könnten. In den wenigen Fällen, in denen dies doch möglich ist, erweisen sie sich in der Regel, zum Beispiel beim Fall, als falsch.

Das Weltbild des Aristoteles wurde in Griechenland durchaus nicht einhellig akzeptiert. Eine völlig andere Auffassung, insbesondere bezüglich des Aufbaus der Materie, vertraten die Atomisten Leukippos von Milet (≈ 450 BC) und Demokritus von Abdera (460-370 BC). Für sie besteht alle Materie aus kleinsten Bausteinen, den Atomen, die nicht weiter teilbar sind und sich regellos im unendlich ausgedehnten leeren Raum bewegen. Bei Zusammenstößen können sie sich vereinigen und bilden so die Körper. Diese haben Eigenschaften, die von denen der Atome völlig verschieden sind - ein Eisenatom ist also nicht aus Eisen. Alle Sinneseindrücke sind nur Täuschung:

“Scheinbar ist Farbe, scheinbar Süßigkeit, scheinbar Bitterkeit - wirklich nur Atome und Leeres.” (Fragment 125 des Demokritus)

Alle Vorgänge laufen kausal ab, es gibt also keinen freien Willen - eine These, die auch bei den recht toleranten Griechen als ausgesprochen atheistisch galt. Die Auffassungen der Atomisten stimmen in vielen Punkten mit denen der modernen Physik überein, doch ist zu bedenken, daß es sich dabei zu dieser Zeit nur um kühne Spekulationen handelte, die durch keinerlei Beobachtungen gestützt wurden. Es ist daher nicht verwunderlich, daß das Weltbild des Aristoteles in diesen Punkten auf seine Zeitgenossen viel überzeugender wirkte.

Für die astronomischen Aussagen, die ja weitgehend mit denen von Eudoxus und Kalippus übereinstimmen, gilt das aber nur begrenzt. Da sich danach alle Himmelskörper auf Kugeln um den Weltmittelpunkt herum bewegen, müßten ihre Abstände von der Erde immer gleich bleiben. Diese Entfernungen sind nicht unmittelbar, etwa durch Triangulation, meßbar, aber es gibt Erscheinungen, die ihre Veränderung mit der Zeit nahelegen. Zum Beispiel ändert sich die Helligkeit der Planeten während eines Umlaufes stark, so ist der Mars in der Opposition um ein Vielfaches heller als in der Konjunktion mit der Sonne. Noch zwingender ist die Tatsache, daß Sonnenfinsternisse total oder ringförmig sein können, die Winkeldurchmesser von Sonne und Mond also verschiedene Verhältnisse annehmen.

Zu den Gegnern der aristotelischen Theorie der Himmelserscheinungen gehörte Herakleides von Pontus (388-315 BC). Er stand in Beziehung zur Schule der Pythagoräer, in der zu dieser Zeit die These vom Zentralfeuer, das Erde und Gegenerde in sehr kleinem Abstand umkreisen, aufgegeben worden war. Dadurch, daß er diesen Abstand auf Null schrumpfen ließ, kam er zu der Vorstellung einer täglichen Rotation der Erde um ihre Achse bei feststehender Fixsternsphäre. Zusätzlich nahm er an, daß Merkur und Venus, deren Platz in der Reihenfolge der Planeten immer umstritten gewesen war, im Gegensatz zu allen anderen nicht um die Erde, sondern um die Sonne kreisen und von ihr bei ihrem Umlauf um die Erde mitgenommen werden. Dieses Weltsystem wurde später, unbegründeterweise, als das ägyptische bezeichnet. Die Planeten waren für ihn erdähnliche Körper mit eigenen Atmosphären.

Noch wesentlich tiefgreifender waren die Änderungen, die Aristarchus von Samos (310-230 BC) vornahm. Von seinen Werken ist nur "Über die Größen und Entfernungen von Sonne und Mond" erhalten geblieben. Sein Weltmodell wird allerdings von Archimedes von Syrakus (287-212 BC) im "Sandrechner" erwähnt, in dem dieser die Zahl der Sandkörner berechnet, mit denen man das Universum ausfüllen könnte. Aristarchus bestimmte zunächst den Abstand des Mondes aus der Zeit, die dieser bei einer totalen Mondfinsternis benötigt, um den Kernschatten der Erde zu durchqueren. Schon seit längerer Zeit war die ungefähre Größe des Erddurchmessers, zum Beispiel aus der Änderung der Höhe von Gestirnen bei einer Seereise von Griechenland nach Ägypten, abgeschätzt worden, und Aristoteles gibt dafür 400000 Stadien an. Daraus folgt, wenn auch nicht sehr genau, der Monddurchmesser als ein Drittel des Erddurchmessers. Zur Bestimmung des Sonnenabstandes ging Aristarchus davon aus, daß bei Halbmond die Richtung vom Mond zur Sonne genau senkrecht auf der von der Erde zum Mond steht [31]. Aus dem Winkel, den die letztere mit der Richtung zur Sonne bildet, läßt sich dann sofort das Verhältnis von Sonnen- und Mondentfernung und damit auch von Sonnen- und Monddurchmesser bestimmen. Aristarchus nahm für den Winkel bei der Sonne 3° an, während er in Wirklichkeit weniger als 10 Bogenminuten beträgt, und kam zu dem Ergebnis, daß das Abstandsverhältnis 19:1 und damit das Verhältnis von Sonnen- zu Erdradius 19:3 ist. Dieses Ergebnis ist um einen Faktor 20 zu klein, aber auch so beträgt das Volumen der Sonne mehr als das 250-fache dessen der Erde. Dieser Umstand war vielleicht die Ursache dafür, daß er für die Erde eine Umlaufbahn um die ruhende Sonne annahm. Das Weltsystem des Kopernikus wird hier also schon vorweggenommen, ein Umstand, auf den Kopernikus selbst ausdrücklich verweist. Aristarchus fand zu seiner Zeit außer dem Babylonier Seleukus von Seleukia kaum Anhänger. Sein System vermag zwar die Rückläufigkeit der Planetenbahnen auf die gleiche Weise wie das moderne Weltbild zu erklären, aber, bei der Beschränkung auf Kreisbahnen, nicht die Ungleichförmigkeit der Sonnenbewegung. Es wurde daher bald durch das Epizykelmodell verdrängt, das beides zu leisten in der Lage ist.

B3. Hellenismus und Spätantike

Durch die Eroberungszüge Alexanders weitete sich die den Griechen bekannte Welt in großem Maße aus. Persien und Teile von Innerasien und Indien wurden zugänglich für den wirtschaftlichen und kulturellen Austausch. Der Fernhandel machte die neuen Zentren Alexandria, Antiochia, Smyrna, Ephesus und Nicäa zu reichen Städten mit einem selbstbewußten, liberalen Bürgertum. Das eigentliche Griechenland fiel zurück, aber Athen blieb wegen seiner Akademie ein Mittelpunkt von Kultur, Kunst und Philosophie. Das hellenistische Weltreich war multikulturell und tolerant, auch in religiöser Beziehung, der Hellenismus als geistige Haltung eine Mischung aus griechischen und orientalischen Elementen. Auch nach dem Zerfall des Alexander-Reiches in die Teilreiche der Diadochen blieb diese Grundlage erhalten.

Zentrum des Welthandels war Alexandria, die Hauptstadt des von den mazedonischen Ptolemäern beherrschten Ägyptens. Diese gründeten mit dem Museion, einem Tempel der Musen, eine Akademie der Wissenschaften mit einer weltberühmten Bibliothek, einer Sammlung von Hunderttausenden von Handschriften, und den berühmtesten Gelehrten als Leitern. Dort blühte neben Philologie, Medizin, Geographie und Mathematik auch die Astronomie. Zwischen 296 BC und 272 BC wurden von Aristyllus und Timocharis Sternpositionen gemessen, doch waren die Beobachtungen, über deren Instrumente nichts Genaueres bekannt ist, nicht von der Qualität der babylonischen.

Von viel größerer Bedeutung war jedoch das Werk des Geographen Eratosthenes von Kyrene (276-195 BC), eines der ersten Direktoren der Bibliothek. Er bestimmte den Erdumfang aus der Beobachtung, daß zur Zeit des Sommersolstitiums in Syene in Oberägypten eine tiefe Grube bis zum Boden ausgeleuchtet wurde, während die Sonne gleichzeitig in Alexandria mit der Vertikalen einen Winkel von 7.2° , einem Fünfzigstel des Vollkreises, bildete [32]. Da die Nord-Süd-Entfernung von Alexandria und Syene durch die Botenstaffette des Königs als 5000 Stadien bekannt war, schloß er daraus auf einen Erdumfang von 250000 Stadien. Die Länge eines Stadions variierte von Stadt zu Stadt, mit dem wahrscheinlichsten Wert von 157 m ergibt sich daraus der Umfang der Erde zu 39250 km, also auf 2% genau. Diese hohe Übereinstimmung ist natürlich zufällig, aber es kann wohl von einem Fehler von 5-10% ausgegangen werden, denn Posidonius (133-51 BC) erhielt mit Hilfe des hellen Sterns Canopus, der in Alexandria gerade den Horizont berührte, während er auf Rhodos mit 7.5° kulminierte, einen Wert von 240000 Stadien. Auch die Schiefe der Ekliptik wurde in Alexandria mit hoher Präzision zu $23^\circ 51'$ bestimmt.

Nach der Theorie des Herakleides von Pontus bewegen sich die Planeten Merkur und Venus gleichförmig auf Kreisen, deren Mittelpunkt ebenfalls gleichförmig auf einem anderen Kreis umläuft, und beschreiben dabei recht komplizierte Schleifenkurven, wobei sich ihr Abstand von der Erde ständig ändert. Dieses Modell schlug Apollonius von Pergä (262-190 BC), einer der bedeutendsten Mathematiker der Antike, berühmt durch sein Werk über Kegelschnitte, auch für die übrigen Planeten vor. Danach bewegt sich ein Planet gleichförmig auf dem Epizykel ("Aufkreis"), dessen Mittelpunkt ebenfalls gleichförmig auf dem Deferenten ("Tragekreis") mit der Erde als Mittelpunkt umläuft [33]. Das Zentrum des Epizykels ist jetzt aber im allgemeinen kein materieller Körper, sondern leer. Je nach dem Verhältnis der Radien und der Winkelgeschwindigkeiten der beiden Bewegungen ergeben sich sehr verschiedene Bahnkurven, zu denen als Sonderfälle auch die Rollkurven (Epizykloiden und Hypozykloiden) gehören. Für das folgende besonders wichtig ist der Fall, daß die Umläufe auf Epizykel und Deferent mit gleicher Winkelgeschwindigkeit, aber im entgegengesetzten Sinne erfolgen [34]. Als Bahnkurve resultiert dann ein Kreis, der ebenfalls gleichförmig durchlaufen wird, dessen Mittelpunkt aber nicht mit dem der Erde

übereinstimmt (Exzenter). Da nur die Winkelbewegung des Planeten, nicht sein Abstand, gemessen werden kann, können die Radien von Deferent und Epizykel mit dem gleichen beliebigen Faktor multipliziert werden, ohne daß sich die beobachtete Erscheinung ändert. Es können aber auch die Rollen von Deferent und Epizykel vertauscht werden, da die Vektoraddition kommutativ ist [35].

Wenn man sich auf die Kinematik, also auf die Beschreibung der Bewegungsvorgänge in Raum und Zeit, beschränkt und keine Aussagen über ihre Ursachen, also die Dynamik, macht, haben nur relative Orte und relative Geschwindigkeiten eine physikalische Bedeutung. Man kann dann den Bezugspunkt, den man als ruhend bezeichnen will, beliebig wählen. Die Bewegung eines Planeten auf einem Epizykel um die Sonne, die ihrerseits auf einem Deferenten um die Erde umläuft, ist daher kinematisch völlig äquivalent zu einer Beschreibung, bei sich der Planet und die Erde beide auf Kreisen um die Sonne bewegen. Von der Antike bis zur Neuzeit, besonders in der Philosophie Kants, galten Raum und Zeit allerdings nicht als physikalische Begriffe, sondern als “a priori”-Kategorien, die also vor aller Erfahrung allein durch unser Denken gegeben sind. Sie glichen insofern der Mathematik, und deshalb zählte bis zur Zeit Keplers die beschreibende Astronomie nicht zur Physik, sondern zur Mathematik. Diese Vorstellung wurde zuerst in der Geometrie von Gauß und Riemann aufgegeben (nichteuclidische Geometrien) und schließlich die Raum-Zeit-Begriffe radikal revidiert durch Einstein. Kinematik und Dynamik waren schon vorher durch Newton zur Mechanik vereinigt worden. Die hellenistische Astronomie stand auf dem Boden der aristotelischen Physik und deutete daher den Raum und die Bewegungen als absolut, während ihre Beobachtungen in Wirklichkeit nur kinematischer Natur waren und deshalb auch später ihre Bedeutung beibehielten.

Der größte Astronom des Altertums, Hipparchus von Nicäa (162-126 BC), lebte allerdings nicht in Alexandria, sondern auf Rhodos. Von seinen Werken blieb nur eines erhalten, aber sein Nachfolger Ptolemäus hat drei Abhandlungen überliefert: “Über die Länge des Jahres”, “Über Schaltmonate und Schalttage” und “Über die Änderung der Solstitien und Äquinoktien”. Hipparch lieferte auch Beiträge zur sphärischen Trigonometrie. Die Entfernungen von Sonne und Mond bestimmte er auf die gleiche Weise wie Aristarchus mit Hilfe von Mondfinsternissen [36]. Unmittelbar ergibt sich dabei nur die Summe der täglichen Parallaxen dieser beiden Himmelskörper. Unter der Annahme, daß die der Sonne sehr klein ist, erhielt Hipparchus einen mittleren Mondabstand von 59.1 Erdradien (exakt: 60.3). Für den Mondradius ergab sich ein Wert von 0.282 Erdradien (exakt: 0.273). Nach mehreren vergeblichen Versuchen gab er die Bestimmung der Sonnenentfernung auf und schloß, daß sie wesentlich größer als das Zwanzigfache der Mondentfernung sein müsse.

Aus einem verbesserten Zyklus der Mondfinsternisse leitete er sehr genaue Werte für die Dauer des tropischen Jahres sowie des synodischen und siderischen Monats ab: $365^d 5^h 55^m 16^s$ (exakt: $365^d 5^h 48^m 56^s$) sowie $29^d 12^h 44^m 3.3^s$ (0.4 Sekunden zu kurz) und $27^d 7^h 43^m 13.1^s$ (1.7 Sekunden zu lang). Durch Vergleich der Jahreslänge mit babylonischen Beobachtungen erkannte er den Unterschied zwischen siderischem und tropischem Jahr und entdeckte so die Präzession der Äquinoktien. Da der Stern Spica zur Zeit des Timocharis einen Abstand von 8° vom Herbstäquinoktium gehabt hatte, zu seiner aber nur noch von 6° , schloß er auf eine Änderung von ungefähr 2° in 150 Jahren entsprechend $45''$ /Jahr und deshalb mindestens 1° in 100 Jahren entsprechend $36''$ /Jahr (exakt: $50''$ /Jahr).

Aus der ungleichen Länge der Jahreszeiten folgerte er, daß die Bewegung der Sonne in der Ekliptik ungleichförmig sein müsse und stellte ihre Bahn durch einen Exzenter dar [37]. Mit einer Dauer von 94.5 Tagen für den Frühling, 92.5 Tagen für den Sommer und

178.5 Tagen für den Rest des Jahres erhielt er für die Exzentrizität einen Wert von 0.042 (exakt: 0.035) und für die Länge des Apogäums $65^{\circ}30'$ (exakt: $66^{\circ}5'$). Der mittlere Fehler der ekliptikalen Länge der Sonne betrug $22'$ und rührte im wesentlichen daher, daß der Eintritt der Äquinoktien und Solstitien nur auf einen halben Tag genau bestimmt werden konnte. Im Prinzip ist der Fehler, der durch die Ersetzung der exakten Sonnenbahn durch einen Exzenter entsteht, bei optimaler Anpassung kleiner als eine Bogenminute. Allerdings ist auch die Beobachtung der Position der Sonne mit einem beträchtlichen Fehler behaftet, da diese nicht unmittelbar mit der von Sternen verglichen werden kann, sondern mit Hilfe von Uhren angeschlossen werden muß.

Wenn die Exzentrizität e so klein ist, daß man Terme 2. und höherer Ordnung vernachlässigen kann, läßt sich die Kepler-Ellipse durch einen Kreis ersetzen [38]. Der Kosinussatz für das Dreieck MGP liefert:

$$\bar{r}^2 = a^2 + a^2 e^2 + 2 a^2 e \cos E \quad \rightarrow \quad \bar{r} \approx a (1 + e \cos E)$$

und der Sinussatz:

$$\bar{r} \sin w = a \sin E \quad \rightarrow \quad w \approx \arcsin(\sin E - e \sin E \cos E) \approx E - e \sin E .$$

Auf die gleiche Weise folgt aus dem Dreieck FMP:

$$r \approx a (1 - e \cos E) .$$

Insgesamt ergibt sich:

$$v \approx E + e \sin e \approx w + 2e \sin w .$$

Benutzt man den Antifokus G als "punctum äquans", also $w(t) = \omega t$, so gilt:

$$E - e \sin E = \omega t .$$

Das ist die Kepler-Gleichung, die aus dem Flächensatz folgt. Die wahre Anomalie v ist dann

$$v \approx \omega t - 2e \sin(\omega t) .$$

Nimmt man dagegen mit Hipparchus an, daß $E = \omega t$ ist, so wird mit der Exzentrizität \bar{e} statt e

$$v \approx \omega t - \bar{e} \sin(\omega t) .$$

Zur Darstellung des gleichen $v(t)$ muß man also $\bar{e} = 2e$ wählen. Der Abstand wird dann zwar mit $r \approx a (1 - \bar{e} \cos E)$ nicht mehr in Übereinstimmung mit der Kepler-Ellipse wiedergegeben, konnte von Hipparchus aber ohnehin nicht gemessen werden.

Die Darstellung mit dem Exzenter liefert also bis zu Termen in e^2 die exakte Zeitabhängigkeit des allein beobachtbaren Winkels v , bei Einführung des "punctum äquans" sogar die exakte Bahnkurve. Für die Mondbahn verwendete Hipparchus statt des Exzenters einen Epizykel [39]. Die Übereinstimmung mit der Beobachtung war allerdings nicht sehr gut, da der Mond sehr starken Bahnstörungen durch die Sonne unterliegt. Auch für die Planeten versuchte er die Darstellung durch Epizykel, wobei aber nicht klar ist, ob er sie als real oder nur als mathematische Hilfsmittel zur "Rettung der Phänomene" betrachtete. Wegen der hier im Vergleich zu Mond und Sonne viel größeren Zeiträume beim Ablauf der Erscheinungen reichten die ihm zur Verfügung stehenden Beobachtungen aber für eine genaue Theorie nicht aus. Er beschränkte sich daher auf die Sammlung und kritische Sichtung von Daten für spätere Nachfolger. Ähnlich waren seine Beweggründe auch für die Anlegung eines Katalogs der ekliptikalen Längen und Breiten von 850 Fixsternen, um das Erkennen eventueller neuer Sterne, die es nach Aristoteles nicht geben dürfte, zu ermöglichen. Ausgelöst wurde dieses Vorhaben vielleicht durch das Auftreten einer Nova in Scorpius im Jahre 134 BC. Als Instrument benutzte er dafür wahrscheinlich eine Armillarsphäre.

In den auf Hipparchus folgenden Jahrhunderten gab es in der Astronomie, im Gegensatz zur Mathematik (Diophant, Pappus), kaum eine Weiterentwicklung. Dazu trug bei, daß in der Philosophie die Stoiker bestimmend wurden, deren Interesse an der Naturwissenschaft gering war. Entscheidend war aber der Zerfall des Reiches der Ptolemäer nach dem Tode der Cleopatra (30 BC) und sein Übergang in eine römische Provinz. Schon vorher hatte es häufig römische Eingriffe gegeben, wobei während des Feldzuges von Cäsar (47 BC) die Bibliothek von Alexandria schwer beschädigt worden war. Bei den Römern kam es nicht zu einer wesentlichen eigenständigen Entwicklung der Medizin und der Naturwissenschaften, sondern nur zu einer Imitation und Kompilation der griechischen Vorbilder, zum Beispiel mit den Sammelwerken von Plinius (Geschichte), Strabo (Geographie) und Galenus (Medizin). Alexandria und Athen blieben wissenschaftliche Zentren, während Rom von geringerer Bedeutung war. Als Verwaltungsmaßnahme kam es allerdings unter Julius Cäsar zu einer Kalenderreform, bei der ein bürgerliches Jahr von 365^d6^h eingeführt wurde, und die bis in die frühe Neuzeit beibehalten wurde.

Ein Sammelwerk der Astronomie wurde von Claudius Ptolemäus in Alexandria in den Jahren von 127 bis 151 geschaffen. Er war aber nicht nur Kompilator, sondern leistete wesentliche eigene Beiträge, insbesondere zur Epizykeltheorie. Die Ergebnisse, vereinigt mit denen des von ihm bewunderten Hipparchus, faßte er zusammen in seinem Hauptwerk, den “dreizehn Büchern der mathematischen Zusammenstellung”, der “matematike syntaxis”, die von seinen Zeitgenossen sehr bald als “megale syntaxis” und dann sogar als “megiste syntaxis” bezeichnet wurde. Die Araber machten daraus später “al majisti”, was dann im Mittelalter zu “almagestum” wurde [40]. Der Almagest blieb bis zu den Arbeiten von Kopernikus, Galilei und Kepler unübertroffen, sein Autor die absolute Autorität in astronomischen Fragen. Daneben verfaßte Ptolemäus auch ein Lehrbuch der Astrologie, den “Tetrabiblos”.

Der Almagest behandelt neben den eigentlichen astronomischen Problemen auch die mathematischen Hilfsmittel aus der sphärischen Trigonometrie einschließlich Sehnentabellen, sowie eine Beschreibung der benutzten Instrumente (Teilkreis, Armillarsphäre). Nach einer Diskussion der astronomischen Grundannahmen über Form und Bewegung von Erde und Fixsternsphäre beschäftigt Ptolemäus sich zunächst mit der Bahn der Sonne. Er übernimmt dafür die Theorie des Hipparchus und übersieht dabei die Änderungen, die in den fast drei Jahrhunderten durch die ihm noch unbekanntere Drehung der Apsidenlinie eingetreten sind. Bei der Theorie der Mondbahn erreicht er dagegen eine wesentliche Verbesserung durch die Einführung eines “punctum æquans”, mit dessen Hilfe die Drehung der Apsidenlinie in 8.85 Jahren wiedergegeben wird [41]. Seine größte Leistung ist aber die Darstellung der Bahnen der Planeten durch eine Kombination von Epizykel, Exzenter und Äquant [42,43]. Der beigefügte Fixsternkatalog ist offensichtlich der des Hipparchus, ergänzt um 230 weitere Sterne, wobei die Längenänderung durch die Präzession der Äquinoktien eingerechnet wurde. Zur Berechnung der Präzessionskonstanten vergleicht er vorgeblich eigene Positionsmessungen mit denen von Hipparchus und erhält den viel zu kleinen Wert von 1° im Jahrhundert, den Hipparchus als untere Grenze angegeben hatte. Von modernen Astronomen wurde er deshalb des “doctoring”, also der Fälschung seiner Resultate, beschuldigt, doch ist zu bedenken, daß über die Bedeutung von Theorie und Beobachtung und deren Anpassung in der Antike andere Vorstellungen herrschten. Die Positionen der Fixsterne werden ergänzt durch Angaben über ihre Helligkeiten in Größenklassen - ein Begriff, der bis heute benutzt wird - und ihre Farben, wobei seltsamerweise der heute bläulich-weiße Sirius, wie auch in babylonischen Quellen, als rötlich bezeichnet wird. Die Ursache hierfür liegt vielleicht darin, daß bei der Beobachtung seiner heliakischen Aufgänge die Rötung durch die Atmosphäre eine Rolle spielte.

Vernachlässigt man (siehe [42,43]) die Exzentrizität der Deferenten, so folgt, daß bei den inneren Planeten die Richtung zum Mittelpunkt des Epizykels und bei den äußeren die von diesem Mittelpunkt zum Planeten stets mit der von der Erde zur Sonne übereinstimmt. Durch Vertauschung der Rollen von Deferent und Epizykel bei den äußeren und Änderung des Maßstabes bei allen Planeten können dann alle Deferenten zur Deckung mit der Bahn der Sonne gebracht werden. Als Ergebnis entsteht dabei ein kinematisch gleichwertiges Weltmodell - wie es später von Tycho Brahe angegeben wurde - bei dem alle Planeten auf ihren Epizykeln die Sonne umlaufen und diese sich wiederum auf dem Deferenten um die Erde bewegt. Das bleibt im Prinzip auch richtig, wenn man für kleine Exzentrizitäten die Deferenten und Epizykel durch Exzenter mit Äquanten ersetzt. Bei optimaler Anpassung weichen die Bahnen dann von den exakten Kepler-Ellipsen um weniger als 2' ab.

Daß Ptolemäus diesen Schritt nicht tat, liegt wahrscheinlich zum Teil daran, daß er zunächst für die Epizykel einfache Kreise und für die Sonnenbahn den Exzenter von Hipparchus ohne Äquant und ohne Drehung der Apsidenlinie beibehielt, wodurch die Identitäten verschleiert wurden. Zur Verbesserung der Übereinstimmung mit den Beobachtungen fügte er dann in unsystematischer Weise weitere Epizykel hinzu und kam so schließlich zu einem System von 40 Kreisen, einschließlich des Himmelsäquators, wobei sich immer noch ein mittlerer Fehler von etwa 30' ergab.

Von wesentlicher Bedeutung dürfte aber gewesen sein, daß er, um die Bewegung des Planeten, wenn schon nicht auf eine Sphäre, so doch auf den Raum zwischen zwei möglichst benachbarten zu beschränken, stets den kleineren der beiden Kreise als Epizykel wählte. Dadurch, daß man die äußere Sphäre des vorangehenden Planeten mit der inneren des folgenden zur Deckung brachte, konnten dann, ausgehend von der bekannten Entfernung des Mondes, absolute, wenn auch irrealen, Dimensionen für das Sonnensystem angegeben werden. Das Festhalten am aristotelischen Dogma von der Unbeweglichkeit der Erde verhinderte weiterhin den kinematisch zulässigen Wechsel vom geozentrischen zum heliozentrischen System nach dem Vorbild des Aristarchus. Diesen Schritt, der an der Berechnung der Positionen an der Himmelssphäre nichts ändert, vollzog erst Kopernikus. Eine wesentliche Erhöhung der Genauigkeit wurde schließlich erst möglich durch Keplers revolutionäre Abkehr vom aristotelischen Dogma der gleichförmigen Bewegung auf Kreisen.

Zwischen Ptolemäus und Kopernikus, der als sein unmittelbarer Nachfolger erscheint, liegen 14 Jahrhunderte, der doppelte Zeitraum wie von den griechischen Naturphilosophen bis Ptolemäus und der dreifache wie von Kopernikus bis heute, in denen keine wesentlichen Fortschritte erzielt wurden. Dafür gibt es eine ganze Reihe von Ursachen. In der Spätphase des römischen Reiches war die vorherrschende philosophische Richtung die des Neoplatonismus, in dem die Geringschätzung der Natur sich bis zum Abscheu verstärkt hatte. Von einem der führenden Vertreter, Plotinus (205-270), heißt es zum Beispiel, daß er vor Scham errötete, weil er einen Körper hatte. Eine solche Einstellung trug natürlich nicht zur Förderung der Naturwissenschaften bei.

Entscheidend war aber der wirtschaftliche und militärische Niedergang des römischen Reiches ab dem 3. Jahrhundert. Das römische Wirtschaftssystem gründete sich auf die Ausbeutung der Kolonien und Sklavenarbeit. Um den Nachschub von Kriegsgefangenen als Sklaven aufrechtzuerhalten, mußte Rom seine Grenzen ständig durch Kriege, zuletzt mit Söldnerheeren, erweitern, bis sie schließlich eine solche Ausdehnung erreichten, daß das System kollabierte. Persische, arabische und insbesondere germanische Völkerschaften durchzogen wie Schwärme von Wanderheuschrecken plündernd das Reich. Das Verschwinden von Gold und Silber wegen der Importe von Luxusgütern aus dem Orient und der Erschöpfung der spanischen Silberminen führte zu Währungskrisen und einem teilweisen

Rückfall in die Tauschwirtschaft und das Feudalsystem der Latifundien. Im Jahre 395 kam es zur Teilung des Reiches in Ost- und Westrom, der letzte weströmische Kaiser wurde 476 durch den "Barbarenhäuptling" (Dreyer) Odoaker abgesetzt. Das Ende aller Zivilisation schien gekommen.

Die Zerstörung der antiken Wissenschaft hatte aber schon vorher eingesetzt und zwar durch die Kulturrevolution des fundamentalistischen Christentums. Diese völlig neuartige religiöse Bewegung wurde getragen von der bildungsfernen Unterschicht, den "Armen im Geiste". Für sie war der Text der "Heiligen Schrift" eine absolute Autorität, und sie lehnten als "törichte Weisheit der heidnischen Philosophen" alles ab, was damit nicht übereinstimmte, insbesondere das Weltbild der hellenistischen Astronomie. Ihm setzten sie das der Bibel entgegen, das letztlich eine primitive Version des babylonischen Weltbildes ist, mit dem die Juden während der babylonischen Gefangenschaft in Berührung gekommen waren. Während der Kirchenvater Origines (185-254) noch versuchte, den biblischen Text allegorisch zu deuten, kam es mit der beherrschenden Stellung des Christentums, etwa ab dem Jahre 300, zu einem in Geschichte der Wissenschaft beispiellosen Rückfall um ein volles Jahrtausend, für den insbesondere die Kirchenväter Lactantius, Augustinus, Hieronymus, Ambrosius und Severianus verantwortlich sind. Von ihnen war Augustinus (354-430) noch bei weitem der aufgeklärteste, doch auch für ihn ist alle Tugend der Heiden "beschmutzt durch den Einfluß obszöner und widerlicher Teufel".

Hauptangriffspunkt war die Kugelgestalt der Erde. Diese angeblich profunden Denker waren, im Gegensatz zu den gebildeten Griechen und später Arabern, nicht in der Lage, sich von der Vorstellung eines absoluten Oben und Unten zu lösen. Besonders deutlich wird das bei Lactantius (≈ 320). In seinem Buch "Über die falsche Weisheit der Philosophen" machte er sich ein ganzes Kapitel hindurch lustig über die Vorstellung, es könnte Menschen geben, die Antipoden, deren Füße höher sind als ihre Köpfe, und Orte, wo Regen und Schnee aufwärts fallen, ganz zu schweigen von Feldern, Seen, Städten und Bergen, die ohne Halt nach unten hängen. Etwas vorsichtiger äußerte sich Augustinus (354-430). Er hielt zwar die Kugelgestalt der Erde nicht für von vornherein unmöglich, nahm aber an, daß sie dann nur mit einem kleinen Teil über die "Wasser der Tiefe" hinausragen könne, eine Vorstellung, die sich ähnlich schon bei den Chinesen findet. Wichtiger als diese Argumente des "gesunden Menschenverstandes" waren für ihn wie für die anderen Kirchenväter aber Textstellen aus der Bibel, so zum Beispiel 1 Moses 1:

6. Und Gott sprach: Es werde eine Feste zwischen den Wassern, und die sei ein Unterschied zwischen den Wassern.
7. Da machte Gott die Feste und schied das Wasser unter der Feste von dem Wasser über der Feste. Und es geschah also.

Die anderen Argument für eine flache Erde erscheinen recht weit hergeholt, zum Beispiel Moses 1, 19, Vers 23:

Und die Sonne war aufgegangen auf Erden, da Lot nach Zoar kam.

und Jesaja 40, Vers 22:

Er sitzt über dem Kreis der Erde und die darauf wohnen sind wie Heuschrecken; - der den Himmel ausdehnt wie ein dünnes Fell und breitet ihn aus wie eine Hütte, darin man wohnt.

Die aus Babylon übernommene Vorstellung von den “Wassern über der Feste” rührt wahrscheinlich daher, daß im Zweistromland Regenfälle selten, dann aber heftig sind, was bei dem dortigen Mangel an Wolken und Nebel himmlische Vorratsbehälter plausibel macht. Neben der Unmöglichkeit der Antipoden spielte die Existenz der “Wasser über der Feste” bis ins 12. Jahrhundert eine unheilvolle Rolle.

Nach der Vorstellung der Kirchenväter war die Welt nach dem Muster der Stiftshütte aufgebaut, die Moses auf Geheiß Gottes in der Wildnis errichtete (2 Moses 25, 18-23). Zusammengefaßt und ausgearbeitet wurde dieses patristische Weltmodell in der Mitte des 6. Jahrhunderts in der “Christlichen Topographie” des Kosmas Indicopleustes (“Indienfahrer”), einem Buch “gegen die, welche vorgeben, Christen zu sein, und doch wie die Heiden denken und meinen, daß der Himmel kugelförmig ist”. Kosmas war in seiner Jugend Kaufmann und Seefahrer und kam bis Abessinien, später trat er in ein Kloster auf dem Sinai ein.

Die Welt des Kosmas ist flach und viereckig, doppelt so lang wie breit, und erstreckt sich in ost-westlicher Richtung. Sie wird umgeben von einem Ozean und dieser wiederum von einer zweiten Erde, die einmal das Paradies und bis zur Sintflut die Wohnstätte der Menschen war. Noah setzte von dort mit der Arche über, und seitdem ist sie unzugänglich. An ihren vier Seiten erheben sich senkrechte Wände und darüber als Dach ein Halbzylinder, der auf der Nord- und Südwand ruht, so daß das Ganze wie eine Truhe mit gewölbtem Deckel (Dreyer: Reisekoffer, Koestler: Nissenhütte) aussieht [44]. Durch den Zwischenboden des Firmaments wird es in zwei Stockwerke geteilt. Das obere enthält die “Wasser über der Feste”, im unteren ist der Raum für Engel und Menschen bis zum Jüngsten Gericht. Dann werden die Wasser niederstürzen und Platz für die Seligen und die himmlischen Heerscharen machen. Bis dahin werden Sonne, Mond und Sterne unter dem Firmament von Engeln freischwebend herumgetragen. Die Sonne, die viel kleiner als die Erde ist, geht abends natürlich nicht unter, sondern verschwindet hinter einem hohen Berg im Norden der Erde. Eine Erklärung für Finsternisse und Mondphasen fehlt allerdings.

Nach der Erhebung des Christentums zur Staatsreligion und dem Verbot aller heidnischen Kulte, also jeder Opposition, im Jahre 391 wurde es lebensgefährlich, abweichende Meinungen zu vertreten. Die grundsätzliche Intoleranz der christlichen Lehre hatte sich allerdings schon vorher gezeigt. 381 setzte der Kirchenvater Ambrosius bei Kaiser Theodosius die Zustimmung zur gewaltsamen Zerstörung heidnischer Heiligtümer durch, und 389 “zerstörte der christliche Mob der Stadt” (Dreyer) die weltberühmte Bibliothek von Alexandria. Der Gewalt gegen Sachen folgte sehr bald auch die Gewalt gegen Personen. Die geniale Tochter Hypatia des Aristoteles-Kommentators Theon von Alexandria, die “zu Recht als Verkörperung der höchsten griechischen Kultur und Wissenschaft galt, wurde 415 gerade deshalb auf bestialische Weise ermordet” (Dreyer).

In neuerer Zeit wird ihre Bedeutung für die historische Rolle der Frau in der Wissenschaft stark hervorgehoben. Im Katalog der Wanderausstellung “Frauen in der Physik”, die 1995 auch an der Universität Kiel gezeigt wurde, heißt es über sie: “Hypatia studierte bei ihrem Vater, sowie in Athen und Italien. Nach ihrer Rückkehr nach Alexandria erhielt sie den offiziellen Auftrag, die Lehren von Platon, Aristoteles und deren Anhängern darzulegen. Sie lehrte auch Mathematik, Astronomie und Mechanik. Ihre Vorlesungen besuchten Studenten aus aller Welt. Obwohl es aufgrund der Glaubensdifferenzen inzwischen eigene Schulen für Christen, Juden und Heiden gab, bot Hypatia ihre Vorlesungen Vertretern aller Religionen an. Im Zuge der Christianisierung waren sie und ihre Familie als Heiden und Anhänger des wissenschaftlichen Rationalismus zunehmend gefährdet. Als 412 Cyrillus, ein fanatischer Christ, Patriarch von Alexandria wurde und die Stadt von Heiden reinigen wollte, fiel auch

Hypatia einem Mordkomplott zum Opfer. Hypatia stand bis zu ihrem Tod zu ihren Lehren und weigerte sich, ihre Ideale aufzugeben. Ihre brutale Ermordung setzte der Verbreitung von Platons Lehre in Alexandria und im ganzen römischen Reich ein Ende.”

In Ostrom, dem späteren Byzanz, wurde die philosophische Schule des Neoplatonismus, der ja in vielen Dingen ähnliche Auffassungen wie das Christentum vertrat, noch längere Zeit geduldet. Ihr bedeutendster Vertreter war neben Proklus (412-485), der einen Kommentar zu den einfacheren Teilen des *Almagest* schrieb, der im Mittelalter sehr berühmte Aristoteles-Kommentator Simplicius. Als der Kaiser Justinian 529 die Akademie in Athen schloß, ging er ins Exil nach Persien, fand dort aber die gleiche Intoleranz. “Die lange, dunkle Nacht des Mittelalters hatte eingesetzt” (Dreyer).

C. Astronomie des Mittelalters

Mit dem Zusammenbruch des weströmischen Reiches und seiner Aufteilung durch die germanischen Eroberer "schien das Ende aller Zivilisation gekommen. Die Kirchenväter machten gemeinsame Sache mit den Barbaren, die den Zeiger der Zeit gewaltsam um ein Jahrtausend zurückstellten, und Jahrhunderte vergingen, bis ihr Werk bis zu einem gewissen Grade wieder aufgehoben wurde und das menschliche Denken sich von den Fesseln zu befreien begann, die ihm in den Tagen angelegt worden waren, als die antike Welt in Scherben fiel" (Dreyer). Die gemeinsamen Anstrengungen von fanatischen Christen und germanischen Barbaren hatten dazu geführt, daß am Ende des 6. Jahrhunderts die gesamte wissenschaftliche Literatur der Antike bis auf die Werke einiger spätrömischer Kompilatoren vollständig vernichtet war. In Flammen aufgegangen waren nicht nur der *Almagest* des Ptolemäus, sondern auch die Werke von Euklid, Archimedes, Apollonius, Aristoteles, Galenus und vielen anderen.

Damit hatte das Abendland sein antikes Erbe zerstört und die Quellen der Wissenschaft verschüttet. Die Kenntnis der griechischen Sprache war fast vollständig verschwunden und Latein zu einer reinen Kirchensprache geworden. Für die Astronomie bestand fast kein Bedürfnis. Da alle Meere von Feinden der Christenheit (Araber, Wikinger) beherrscht wurden, erübrigten sich Navigationskenntnisse, und für fast alle Zwecke der Zeitmessung genügte der julianische Kalender, allerdings mit einer Ausnahme: Das Osterfest, das höchste Fest der Christenheit und die damit verbundene Fastenzeit waren an den jüdischen Mondkalender gebunden. Nach der auf dem Konzil von Nicäa (325) festgesetzten Osterregel soll es am ersten Sonntag nach dem ersten Vollmond im Frühling stattfinden. Wegen der sehr komplizierten Mondbewegung ist eine genaue Berechnung schwierig und im primitiven patristischen Weltbild natürlich völlig unmöglich. Man war daher auf ein Näherungsverfahren, den "computus", angewiesen, das von nur wenigen Klerikern beherrscht und von keinem verstanden wurde, so daß der berühmte Mystiker Notker ("Balbulus", der Stammeler) von St. Gallen (804-912) in den geheimnisvollen Schwankungen des Osterdatums die unerforschliche Einwirkung des Himmels auf die Erde sah. Der einzige christliche Beitrag zum Kalenderwesen bestand darin, daß nach dem Vorschlag des Dionysius Exiguus nach 525 der Beginn der Zeitrechnung auf das vermutete Datum der Geburt Jesu verlegt wurde (christliche Ära).

Die Vorstellung von der flachen Erde wurde noch bis zum Ende des 9. Jahrhunderts vertreten. Insbesondere war es gefährlich, an die Existenz von Antipoden zu glauben. Das mußte der irische Mönch Fergil ("Virgilius") erfahren, der 745 Abt von St. Peter in Salzburg geworden war. Da irische Mönche bis Island gekommen waren und das Phänomen der Mitternachtssonne kennengelernt hatten, stand für sie die Kugelgestalt der Erde außer Frage. Fergil geriet wegen einer theologischen Frage in Streit mit Bonifatius, und da dieser gehört hatte, daß Fergil von der Möglichkeit von "Menschen unter der Erde" gesprochen hatte, denunzierte er ihn bei Papst Zacharias mit dem Ziel eines Ketzerprozesses. Fergil hatte aber Glück: Bonifatius wurde von den (Ost-) Friesen erschlagen, Zacharias starb, und er selbst wurde sogar 767 Bischof von Salzburg.

Ab dem 7. Jahrhundert wich allerdings der Spott über die "törichte Weisheit der heidnischen Philosophen" mehr und mehr der Bewunderung von deren Kenntnissen, so bei dem wegen seiner Gelehrsamkeit hoch gepriesenen Isidorus Hispalensis, Erzbischof von Sevilla (570-636). In seiner zwanzigbändigen *Ethymologie* erklärte er neben der Herkunft auch die Bedeutung der Wörter. Bei gefährlichen Gegenständen wie der Gestalt der Erde, hütete er sich vor einer Stellungnahme und teilte nur die "Lehren der Philosophen" mit,

ohne ihnen jedoch zu widersprechen. Er war allerdings das Muster eines Büchergelehrten, er gab nur die Kenntnisse wieder, die er durch das Studium von römischen Kompilatoren wie Macrobius gewonnen hatte, ohne eigentliches Verständnis. So gab er an, daß die Sterne ihr Licht von der Sonne erhalten und sich gegenüber der Erde nicht bewegen und daß der Mond in 8, die Sonne in 19 Jahren umläuft, offenbar eine Verwechslung mit dem Meton-Zyklus.

Noch größer war bei der Nachwelt der Ruf des englischen Mönchs Bede, genannt "Beda Venerabilis" (673-735). In seinem Hauptwerk "De natura rerum" behandelte er in enger Anlehnung an Plinius Himmel und Erde und erwähnte ihre Kugelgestalt, konnte aber natürlich nicht auf die ominösen "Wasser über der Feste" verzichten. Ein weiterer Fortschritt erfolgte während der Regierung Karls des Großen ("karolingische Renaissance"), auf dessen Geheiß der englische Mönch Alkuin eine Verwaltungsakademie gründete. Dadurch wurde die Beschäftigung mit der lateinischen Literatur gefördert, die griechische blieb allerdings wegen der mangelnden Kenntnis der Sprache unzugänglich, so daß damals im Abendland sogar die Namen von Plato und Aristoteles unbekannt waren. Zur gleichen Zeit kam es aber auch schon, unter anderem durch den Austausch von Gesandtschaften mit Harun er Raschid in Bagdad, zu Kontakten mit der arabischen Zivilisation und ebenso mit Byzanz.

C1. Arabische Astronomie

Während im Abendland die Wissenschaft ihren tiefsten Stand seit mehr als einem Jahrtausend annahm, erlebte sie im Morgenland eine neue Blüte. Mit der Hedschra, der Flucht von Mohammed (570-632) von Mekka nach Medina im Jahre 622, entstand eine neue monotheistische Religion auf der Basis von Juden- und Christentum, die zugleich zu einer politischen Bewegung wurde und die arabischen Stämme einigte: der Islam. Unter dem Kalifen Omar I begann 634 die kriegerische Ausdehnung des islamischen Reiches über Ägypten, Syrien und Mesopotamien. In ihrem Zuge wurde 640 auch Alexandria erobert und der Überrest der Bibliothek zerstört, der allerdings nicht mehr von bedeutendem Umfang war.

Das arabische Weltreich erstreckte sich bald von Andalusien bis zu den Steppen Mittelasiens und bis nach China und bildete ein zusammenhängendes Wirtschaftsgebiet, in dem Handel und Handwerk blühten. Hauptstadt war zunächst Damaskus, später Bagdad. Die Toleranz gegenüber Andersgläubigen war erheblich größer als im Christentum. Es gab keine Zwangsbekehrungen, und Nichtmuslime konnten, insbesondere in der Wissenschaft, wichtige Positionen einnehmen. Im Gegensatz zu den Germanen übernahmen die Araber weitgehend die Zivilisation der unterworfenen Völker, und die Herrscher nahmen sich sehr bald der Pflege von Kunst und Wissenschaft an. Obwohl auch der Islam eine eschatologische Buchreligion ist, fehlt ihm die Wissenschaftsfeindlichkeit des mystischen Christentums. Dazu trägt bei, daß der Koran neben religiösen auch staatspolitische und sozialetische Fragen behandelt, aber kaum weltbildrelevante Aussagen enthält.

Von besonderem Interesse waren Medizin und Astronomie bzw. Astrologie. Dazu trug einerseits die Bedeutung der Ortsbestimmung und der Navigation, zum Beispiel bei der Bestimmung der Gebetsrichtung nach Mekka ("Kiblah"), bei, andererseits die fatalistische Grundhaltung ("Kismet"). Auch Mathematik, Chemie ("Alchemie") und Philosophie insbesondere der Griechen waren von großer Bedeutung, nicht dagegen die Dichtung. Bedeutungsvoll für die Entwicklung der Astronomie war auch die Entscheidung Mohammeds, den in Arabien gebräuchlichen Lunisolarkalender durch einen reinen Mondkalender zu ersetzen. Nach jüdischem Vorbild wurden seit Beginn des 4. Jahrhunderts die notwendigen Schaltmonate durch die Kalammas, die Ältesten eines bestimmten Stammes, festgelegt. Um ihren geistigen und politischen Einfluß zu brechen und wohl auch um sich von den Juden zu unterscheiden, verbot Mohammed die Schaltungen, so daß der mohammedanische Kalender auf Mondjahren mit 354 Tagen beruht. Die Monate, insbesondere der Fastenmonat Ramadan, laufen daher in 33 Jahren durch alle Jahreszeiten. Diese, im Grunde rückschrittliche, Regelung hatte zur Folge, daß wegen der komplizierten Bewegung des Mondes zur Bestimmung des Monatsbeginns ständige astronomische Beobachtungen erforderlich wurden.

Schon unter den Omajjaden-Kalifen wurde in der Nähe von Damaskus ein Observatorium errichtet, zu einer Blüte der Astronomie kam es aber erst nach der Verlagerung der Residenz nach Bagdad unter den Abbasiden. Der Kalif Al Mansur (754-775) versammelte gelehrte Männer gleich welchen Glaubens um sich und ließ in großem Umfang wissenschaftliche Werke sammeln. Das größte Interesse fand zunächst die Medizin. Aus Byzanz vertriebene nestorianische Christen übersetzten die Werke von Hippokrates und Galenus aus dem Griechischen über das Syrische ins Arabische. Dabei kam es auch zur Berührung mit den Ideen des Aristoteles und auf diesem Wege mit weiteren Wissensgebieten. Im Jahre 773 erschien vor Al Mansur ein Gelehrter aus Indien, der über große astronomische Kenntnisse verfügte und zum Beispiel Finsternisse berechnen konnte. Auf Anordnung des Kalifen wurde das Hauptwerk ("Siddhanta") von Al Khwarizmi ("Algorithmus") ins Ara-

bische übersetzt, aber bald wurde klar, daß es sich dabei im wesentlichen um den Almagest des Ptolemäus handelte, allerdings mit der Verbesserung durch das indische Stellenwertsystems (“arabische Ziffern”).

Ein noch größerer Förderer der Wissenschaften war sein Nachfolger Harun Al Rashid (“Tausend und eine Nacht”). Auf seine Anordnung wurden in großem Maßstab griechische Manuskripte gesammelt und übersetzt, darunter auch der Almagest, von dem eine arabische Version aus dem Jahre 827 in der Universitätsbibliothek Leyden aufbewahrt wird. Viele antike Werke sind nur auf diese Weise erhalten geblieben. Die ersten Übersetzungen des Almagest waren wegen der Schwierigkeit des Gegenstandes nicht zufriedenstellend, eine endgültige Version wurde erst von Tabit ben Korra (836-901) gefertigt. Auf ihn geht auch die irrige Behauptung zurück, daß die Präzession der Äquinoktien ein periodischer Vorgang sei.

Ihren Höhepunkt erreichte die Astronomie in Bagdad unter Al Mamun (813-833). Er ließ 829 ein großes Observatorium bauen [45], dessen Instrumente besser als die des Hipparch waren und in dem regelmäßige Beobachtungen durchgeführt wurden. Einer der bedeutendsten Astronomen dieser Zeit war Muhammed Al Fargani (“Alfraganus”), der mit seinen “Elementen der Astronomie” eine leichtfaßliche Einführung in den Almagest schrieb, die später in Europa als eines der ersten Bücher 1486 in Augsburg gedruckt wurde und bis zum Ende des 16. Jahrhunderts als Standardlehrbuch diente. Al Mamun ordnete auch eine Neubestimmung des Erdradius durch Gradmessungen in der Ebene von Palmyra an, doch stimmen die Ergebnisse der beiden Expeditionen so genau untereinander und mit denen des Ptolemäus überein, daß sie kaum davon unabhängig sein können. Als Meßinstrumente wurden Armillarsphären und Quadranten benutzt [46], für einfache Höhenmessungen auch Astrolabien [47,48,49], die bis zum Ende des Mittelalters weit verbreitet waren. Die Genauigkeit der Beobachtungen war so groß, daß sie zu Korrekturen in den Tafeln des Ptolemäus dienten.

Der größte der arabischen Astronomen war Muhammed Al Battani (“Albategnius”, 878-928). Zu seiner Zeit war das Kalifat schon im Niedergang, aber wegen seiner Herkunft aus einer der bedeutendsten persischen Familien bedurfte er keines Gönners. Seine zahlreichen Beobachtungen stellte er von 877 bis 919 in Rakka an, seine Werke wurden später in Europa mehrfach übersetzt und veröffentlicht [50]. Er lieferte wesentliche Beiträge zur sphärischen Trigonometrie und verwendete als erster Tabellen des Sinus statt der Halbsehne. Nach der Methode des Hipparch bestimmte er die Dauer des tropischen Jahres und die Länge des Apogäums der Sonnenbahn neu und stellte fest, daß die letztere sich deutlich von dem Wert des Ptolemäus unterschied, erkannte aber nicht, daß die Ursache eine gleichmäßige Drehung der Apsidenlinie ist. Auch für die Schiefe der Ekliptik und die Präzession der Äquinoktien gab er verbesserte Werte an und korrigierte damit den Sternkatalog des Ptolemäus. Da er dessen volle Theorie der Epizykelbewegung benutzte, waren seine Tabellen zwar recht genau, aber entsprechend kompliziert, und noch um das Jahr 1000 wurden die einfacheren von Al Kharizmi häufig vorgezogen.

Im 10. Jahrhundert wurde unter dem türkischen Prinzen Sharaf Al Dawla in Bagdad ein neues Observatorium erbaut, an dem neben anderen der bekannte Astronom Abu'l Wefa (959-998) wirkte, aber der Schwerpunkt der astronomischen Wissenschaft verlagerte sich nach Westen. Im fatimistischen Königreich Ägypten führte Ali ben Abi Said Abderahman ben Ahmed ben Junis, kurz Ibn Junis genannt, in Kairo von 977 bis 1007 Beobachtungen von Finsternissen durch und berechnete neue Tabellen, die nach dem regierenden Sultan Al Hakim die Hakemitischen Tafeln genannt wurden.

Im 11. und 12. Jahrhundert kam es schließlich zu einer neuen Blüte im maurischen Kastilien

[50]. Dort berechnete Al Zarqala ("Arzachel", 1029-1087) die Toledanischen Tafeln und beschrieb auch die von ihm benutzten Instrumente, insbesondere das Astrolabium, doch sind seine Ergebnisse weniger genau als die älteren von Al Battani. Ihm folgten Gabir ben Aflah ("Geber") und Nureddin al Betruji ("Alpetragius"), die Kritik an der Plantentheorie des Ptolemäus übten, ohne sie allerdings durch etwas Besseres ersetzen zu können. Mit der Rückeroberung ("Reconquista") Andalusiens durch die kastilischen Christen kam es 1236 zum Ende des Kalifats von Cordoba. Die Gartenlandschaft wurde in eine Schafweide verwandelt, und die wissenschaftliche Tätigkeit hörte auf - bis auf eine letzte Aktivität unter König Alfonso X von Kastilien und Leon [52]. Er versammelte um sich eine Anzahl von Astronomen, die unter der Leitung des jüdischen Gelehrten Isaac ben Said im Jahre 1252 die Alfonsinischen Tafeln berechneten, die mangels eines Besseren mehr als 300 Jahre in Gebrauch blieben.

Während mit Alfonso die Beschäftigung mit der Astronomie im Westen des islamischen Gebietes zum Ende kam, begann sie im Osten von neuem. Im Jahre 1258 wurde Bagdad von Hulagu Khan, einem Enkel von Dschingis Khan, erobert. Schon im folgenden Jahr gründete er auf Rat seines Wesirs Nasir ed-din al Tusi, der selbst ein bedeutender Astronom war, ein neues, großzügig ausgestattetes Observatorium in Megara bei Täbris. Es enthielt eine riesige Bibliothek von mehr als 400000 Manuskripten, sein Hauptinstrument war ein Mauerquadrant von 10 Fuß Radius. Zwölf Jahre intensiver Pflanzenbeobachtungen führten zur Berechnung der Ilkhanischen Tafeln, aber danach hörten die Aktivitäten bald wieder auf.

Erst mehr als 200 Jahre später wurden sie in Samarkand von Ulugh Beg, einem Enkel des mongolischen Eroberers Tamerlan, wieder aufgenommen. Er gründete um 1420 ein Observatorium mit einem Mauerquadranten von 60 Fuß Radius und beteiligte sich bis 1437 selbst an den Beobachtungen. Sein Sternkatalog war der bis dahin einzige, der nicht aus einer bloßen Korrektur der Angaben des Ptolemäus bestand, aber in Europa wurde er erst ein Jahrhundert später bekannt und erst 1665 gedruckt, als er längst durch die Entwicklung überholt war.

Die arabische Astronomie zeichnete sich durch zahlreiche sorgfältige Beobachtungen mit neuen und verbesserten Instrumenten, Erhöhung der Genauigkeit und praktische Aktivität aus. Auf dem Gebiet der Theorie war der Fortschritt dagegen gering. Die mathematischen Hilfsmittel wurden vervollkommen und die Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Theorie durch die Hinzunahme weiterer Epizykel geringfügig verbessert. Die Tätigkeit kam zum Erliegen, als Mongolenhorden aus Innerasien die Städte und Bibliotheken weitgehend vernichteten, die Bevölkerung ausrotteten und den "fruchtbaren Halbmond" durch Zerstörung der Bewässerungsanlagen in eine menschenleere Wüste verwandelten. Das wesentliche Verdienst der arabischen Astronomie liegt darin, das antike Erbe durch die finsternen Jahrhunderte des Mittelalters bewahrt und schließlich an das aus dem Dunkel tretende Abendland weitergegeben zu haben.

C2. Renaissance

Während im 9. und 10. Jahrhundert unter dem Islam Handel, Gewerbe, Kultur und Wissenschaft blühten, war Europa ein barbarisches Land, in äußerster wirtschaftlicher Ohnmacht versunken, von allen Seiten durch Feinde wie die Araber, Hunnen und Wikinger bedrängt. Sein feudales Sklavensystem hatte zur Grundlage eine primitive Landwirtschaft, Latein war nur als Kirchensprache erhalten geblieben, und die Herren und Priester waren fast so unwissend wie ihre Untertanen (“... ein man der so geleret waz, daz er an den buochen laz ...”).

Um das Jahr 1000 herum trat eine gewisse Besserung ein. Die Wikinger und Hunnen waren zurückgeschlagen und christianisiert. In Italien blühten Städte und Seehäfen durch den Orienthandel auf, die neugegründeten Klöster wurden Zentren von Bildung und produktiver Arbeit. Die Kirche entwickelte sich zu einer machtvollen Hierarchie unter der Führung der Päpste. Durch die Kreuzzüge kam “die rauhe und primitive Welt der Ritter und Mönche in Kontakt mit der schon im Niedergang begriffenen arabischen Kultur” (Pannekoek), der auch das höfische Leben beeinflusste (Troubadoure). Zu einem geistigen Aufschwung führte insbesondere die Übernahme der arabischen Wissenschaft aus dem maurischen Spanien. Schon vorher hatte der gelehrte Gerbert, der spätere Papst Sylvester II (999-1004), in Barcelona nach Büchern über Astrologie gesucht. Er verfertigte selbst Erd- und Himmelsgloben zum Gebrauch bei seinen Vorlesungen, schrieb ein Buch über das Astrolabium und trug wesentlich dazu bei, daß in dieser Zeit die Lehre von der Kugelgestalt der Erde wieder zum Allgemeingut aller Gebildeten wurde [53]. Dem mußten auch die ominösen “Wasser über der Feste” weichen: Um 1130 deutete William of Conches sie als Wolken, wobei die Rolle des “Firmaments” der Luft zugewiesen wurde.

Am Ende des 11. Jahrhunderts begann ein wahrer Wissenschaftstourismus zu den Quellen der Weisheit an den maurischen Hochschulen. Christliche Gelehrte suchten, zum Teil in Verkleidung, nach astronomisch-astrologischem Wissen. Athelhard von Bath übersetzte 1126 die astronomischen Tafeln des Al Khwarizmi ebenso wie das astrologische Werk des Albumazar. Ihm folgte Gerard von Cremona (1114-1187), der in Toledo nach dem Werk des Ptolemäus suchte und dabei auf eine Fülle weiterer antiker Autoren stieß, die bis dahin im Abendland unbekannt waren: Euklid, Galenus, Aristoteles, Archimedes und viele andere. Um 1175 übersetzte er den Almagest aus dem Arabischen. Da im Kirchenlatein die Fachausdrücke für wissenschaftliche Gegenstände in der Regel fehlten, wurden viele arabische Bezeichnungen direkt übernommen und blieben zum Teil bis heute erhalten: Zenit, Nadir, Azimuth, sowie Sternnamen wie Algol (“ra’s al-ghul”) und Beteigeuze (“bat al-dshausa”).

Nach dem Muster der arabischen Medressen wurden jetzt neben den Klosterschulen auch Universitäten, allerdings mit geistlichem Lehrkörper, gegründet, so in Bologna, Paris und Oxford [54]. Am Ende des 12. Jahrhunderts wurde die Kirche zur geistigen Führungsmacht in Europa, sowohl in der Wissenschaft als auch in der Verwaltung. Den Höhepunkt ihrer politischen Macht erreichte sie unter Papst Innozenz III, als sie in einem Weltreich gebot, das dem des frühen Islam entsprach, und Kaiser und Könige ein- und absetzte. Zum Erhalt der Herrschaft und zur geistigen Machtausübung wurden religiöse Orden wie Franziskaner und Dominikaner gegründet, die “durch Predigt und Propaganda, aber auch Verfolgung, Inquisition und Unterdrückung abweichender Ideen, notfalls bis zur physischen Ausrottung” (Pannekoek) die Einheit der Doktrin wahrten. Aus ihren Reihen kamen auch die Gelehrten und Wissenschaftler.

Zu Anfang des 13. Jahrhunderts war das Übersetzungsprogramm beendet, und es begann die Diskussion und Assimilation. Das Griechische wurde wiederentdeckt, nachdem Platon

und Aristoteles und der Kommentator Simplicius zunächst nur aus arabischen Quellen bekannt waren, und vor den lesekundigen Mönchen tat sich eine Wunderwelt auf. Die offizielle Haltung der Kirche war im Anfang zwiespältig. Noch 1215 war die Lektüre des Aristoteles an der Sorbonne verboten und wurde später auf täglich wenige Stunden beschränkt, was die Universität Toulouse veranlaßte, Studenten mit dem Argument abzuwerben, daß an ihr die Lektüre völlig frei sei. Um 1254 wurden die Werke des Aristoteles dann zur Pflichtlektüre, und für fast 400 Jahre war "der Philosoph" unangefochtene Autorität in allen weltlichen Dingen, vergleichbar nur den Kirchenvätern in religiösen Fragen.

Die wissenschaftliche Tätigkeit beschränkte sich in diesem Zeitalter der Scholastik allerdings auf die Auslegung und Diskussion der antiken Quellen. Ihre Vertreter waren Buchgelehrte, keine Forscher, die neue Erfahrungen gesucht hätten, und ihre Kunst der Beweisführung mutet heute spitzfindig und teilweise abstrus an (Zahl der Engel auf einer Nadelspitze). Die bedeutendsten Denker dieser Epoche waren die Dominikaner Albertus Magnus (1193-1280) und Thomas Aquinas (1225-1274), der die Kosmologie des Aristoteles mit der kirchlichen Doktrin zu einem Gedankengebäude vereinigte, das jahrhundertlang fast unangefochten herrschte.

Auch der Almagest des Ptolemäus war sowohl aus arabischen als auch aus griechischen Quellen übersetzt worden, aber für die überwiegende Mehrzahl der scholastischen Gelehrten schon wegen seiner mathematischen Voraussetzungen zu schwierig. Das Studium der Astronomie, das als Bestandteil des Quadriviums für alle Studenten verbindlich war, beschränkte sich daher auf die Sphärik, die Lehre von der Himmelskugel und ihrer täglichen Umdrehung. Vier Jahrhunderte lang war das Werk "De Sphaera" des Johannes de Sacrobosco (John of Holywood), der aus England stammte, an der Sorbonne in Paris lehrte und dort 1256 starb, ein Standardlehrbuch. Es handelt sich im wesentlichen um einen kurzen Abriß des ersten Teils des Almagest. In ihrer Mehrzahl waren die Scholastiker allerdings Anhänger des Aristoteles und gingen über seine Lehren nicht hinaus. Eine völlig andere Auffassung vertrat Roger Bacon (1214-1294). Er betonte die Bedeutung von Experimenten für den notwendigen Fortschritt der Wissenschaft und wandte sich gegen eine wörtliche Auslegung der Bibel, fand aber in seiner Zeit kein Gehör und verbrachte einen großen Teil seines Lebens im Kerker.

Am Ende des 13. Jahrhunderts waren aristotelisches und christliches Weltbild zu einem einheitlichen Ganzen von großer Geschlossenheit und Harmonie vereinigt. In diesem streng hierarchisch gegliederten System hatte alles seinen Platz, war Glied einer "goldenen Kette des Seins", die sich von der Hölle bis zum Himmel erstreckte. Eine eindrucksvolle Beschreibung dieser Weltsicht, die nicht nur als poetisches Werk, sondern durchaus auch als Wiedergabe des wissenschaftlichen Wissens seiner Zeit anzusehen ist, gab Dante in seiner "Divina Commedia". Geführt durch Virgil steigt der Dichter durch den tiefsten Abgrund der Hölle im Mittelpunkt der Erde über das Fegefeuer und die neun Himmels-sphären auf zum Empyräum, dem Sitz der Gottes. Jede Sphäre mit den daran gehefteten Himmelskörpern wird bewegt durch eine eigene Gattung himmlischer Wesen, von einfachen Engeln, die für den Mond zuständig sind, bis hin zu den Seraphim, die das "primum mobile" drehen [55].

Dieses Weltbild war nicht mehr das rationale des aristotelischen Kosmos, es wurde beherrscht von übernatürlichen Kräften, von Wunderglauben, Magie und folgerichtig auch Astrologie. In seiner Geschlossenheit lag zugleich auch seine Schwäche. Jede Änderung durch wissenschaftliche Erkenntnisse, zum Beispiel bei der Planetenbewegung, bedeutete jetzt zugleich einen Angriff auf religiöse Glaubenssätze, die ihrer Natur nach unveränderlich sind, und mußte zu Konflikten mit der alles beherrschenden Kirche führen.

Im Verlaufe des 14. Jahrhunderts wurde deren Machtposition allerdings schwächer. Die Bürger der aufblühenden Städte erlangten politischen Einfluß, gleichzeitig machten sich die Könige der entstehenden Nationalstaaten immer mehr unabhängig vom Papst. Wissenschaft und Verwaltung lagen nicht mehr ausschließlich in der Hand der Kirche. Auch die Scholastik hatte ihren Höhepunkt überschritten. An den Universitäten regte sich Kritik an Aristoteles. Eine führende Rolle spielte dabei die Sorbonne in Paris, an der bedeutende Philosophen wie Johannes Buridanus (1290-1360), Albert von Sachsen (1316-1396) und Nikolaus Oresme (1320-1382) lehrten [56]. Der Hundertjährige Krieg zwischen England und Frankreich bewirkte allerdings ihren Niedergang. Die führende Rolle in der Wissenschaft übernahmen jetzt Länder, die näher am gewinnbringenden Orienthandel lagen und deshalb wirtschaftlich aufblühten, nämlich Italien und insbesondere Deutschland, wo eine große Zahl neuer Universitäten gegründet wurde: Prag (1348), Wien (1365), Heidelberg (1386) und Köln (1388).

Im 15. Jahrhundert verbreitete sich die Kenntnis der griechischen Sprache rasch. Dazu trug auch die Eroberung Konstantinopels durch die Türken (1453) bei, als deren Folge viele griechische Gelehrte mit den Originalmanuskripten ins Abendland flohen. Diese wurden eifrig gesucht und in großen Bibliotheken gesammelt, so in der des Kardinals Bessarion in Venedig, der Mediceischen Bibliothek in Florenz und im Vatikan. Die intensive Beschäftigung mit den antiken Autoren führte zur Ablösung der Scholastik durch den Humanismus, der die Autoritäten in Frage stellte. Seine Grundhaltung war liberal mit einem Hauch von Heidentum, besonders in Italien. In Deutschland war einer der bedeutendsten Vertreter dieser neuen Geistesrichtung Nikolaus von Kues ("Cusanus", 1401-1464), der es, aus kleinen Verhältnissen kommend, bis zum Kardinal brachte. In seiner Theologie vereinigte er christliche Mystik mit Neoplatonismus. Nach Studien in Heidelberg, Bologna und Padua, wo er Mathematik und Astronomie bei Toscanelli hörte, spielte er eine wichtige Rolle auf dem Konzil zu Basel (1431-1449), auf dem er vergeblich eine Kalenderreform durchzusetzen versuchte, und wurde schließlich Erzbischof von Brixen. In seinem Hauptwerk "De docta ignorantia" beschäftigte er sich in spekulativ-philosophischer Weise mit dem Problem des Unendlichen und dem Aufbau der Welt und kam später sogar zur Annahme der Erdrotation.

In der Astronomie war jetzt nicht mehr Aristoteles, sondern Ptolemäus die wesentliche Quelle. Neben dem Studium der antiken Werke im griechischen Original statt in arabischer Übersetzung wurde auch die Beobachtungstätigkeit wieder aufgenommen. Außer Astrolabien nach arabischem Vorbild wurden auch genauere Instrumente benutzt, die allerdings die Qualität der des zeitgenössischen Ulugh Beg noch nicht erreichten. Paolo Toscanelli (1397-1482), der geographische Berater von Kolumbus, beobachtete systematisch Kometen. In Wien stellte Georg Peurbach ("Purbachius", 1423-1461) die Epizykeltheorie des Ptolemäus dar in seiner "Theorica nova planetarum" dar, einem ausgezeichneten Lehrbuch, das im folgenden Jahrhundert immer wieder gedruckt und kommentiert wurde, und berechnete Finsternisse.

Sein Werk wurde fortgesetzt von seinem ihm weit überlegenen Schüler Johann Müller aus Königsberg in Franken ("Regiomontanus", 1436-1476). Er verbrachte sechs Jahre in Italien, wo er mit dem Kardinal Bessarion zusammentraf, und sammelte eine große Zahl antiker griechischer Manuskripte. Zurückgekehrt nach Nürnberg richtete er für ihre Herausgabe eine eigene Druckerei ein und machte sich an die Berechnung verbesserter Ephemeriden, die die inzwischen veralteten Alfonsinischen Tafeln ersetzen sollten. Sein früher Tod auf einer Reise nach Rom wegen der Kalenderreform machte diese Pläne zunichte, doch hatte er um sich in Nürnberg einen Kreis von Schülern gesammelt, darunter die wohlhabenden Patrizier Willibald Pirckheimer und Bernhard Walther (1430-1504), die die systematischen

Beobachtungen bis zu Walthers Tod in einer eignen Sternwarte fortsetzten. Als Instrumente dienten Armillarsphäre, Quadrant und der sogenannte Jakobsstab [57]. In die gleiche Zeit gehört auch die Entdeckung des Erdscheins auf dem Mond durch Leonardo da Vinci (1452-1519) und der Tatsache, daß Kometenschweife stets der Sonne abgewandt sind, durch Peter Bienert (“Apianus”, 1495-1552), den Autor des “Astronomicum Caesareum” [58,59].

Am Ende des 15. Jahrhunderts war im Abendland der Wissensstand der Antike wieder erreicht und es begann, anders als im Orient, eine stürmische Weiterentwicklung, insbesondere der Astronomie. Die Ursachen dafür waren mancherlei: die Änderung der Sozialstruktur, der durch die Bedürfnisse von Handel und Seefahrt angeregte Fortschritt der Technik und der Navigation (Entdeckung Amerikas) und die Erfindung des Buchdrucks, die die Kommunikation und die Verbreitung neuer Kenntnisse stark förderte. Hinzu kam die Schwächung der Kirche durch das vom Protestantismus herbeigeführte Ende der Einheit der Lehre, sowie soziale Unruhen und Kriege wegen Gruppeninteressen, bedingt durch die wachsende Macht der Bürger und Fürsten bei gleichzeitiger Verarmung der Landbevölkerung wegen der Gold- und Silberimporte aus den neuen Kolonien. Diese allgemeine Unsicherheit ließ Verlässlichkeit nur am Himmel erkennen und brachte die Astrologie in den Mittelpunkt des täglichen Lebens.

C3. Nikolaus Kopernikus

Niklas Kopperrnigk wurde 1473 in Thorn als Nachkomme deutscher Kolonisten geboren, in einem Gebiet, das erst unter der Oberherrschaft des Deutschen Ritterordens, dann unter der der polnischen Könige stand. Im Jahre 1491 begann er in Krakau mit dem Studium der Jurisprudenz, kam aber dabei auch in Berührung mit Mathematik, Astronomie und Astrologie. Von dort wurde er zu weiteren Studien, insbesondere der Medizin, nach Italien geschickt, wo er sich 1496 in Bologna als Mitglied der “natio Germanorum” einschrieb. Er beschäftigte sich dort intensiv mit dem Griechischen und lernte dabei die widersprüchlichen Ansichten der antiken Philosophen über den Bau der Welt kennen, insbesondere die Behauptung der Erdbewegung durch Philolaos und Herakleides von Pontus, und machte ab 1497 auch eigene Beobachtungen. Nachdem er im Jahre 1500 in Rom Vorlesungen über Astronomie gehalten hatte, kehrte er zunächst zurück nach Frauenburg, um dort eine Domherrenstelle zu übernehmen, die ihm sein Onkel Lucas von Watzelrode, der Bischof von Ermland, verschafft hatte. Er wurde allerdings gleich wieder beurlaubt, um seine Studien in Italien abzuschließen, und promovierte 1503 in Ferrara im Kirchenrecht.

Erst 1506 kehrte er endgültig nach Frauenburg zurück, nahm aber auch jetzt seine Aufgaben als Kanonikus noch nicht wahr, sondern diente zunächst seinem Onkel bis zu dessen Tod 1512 als medizinischer Berater. Von dieser Zeit an war er dann mit der Verwaltung der Diözese beschäftigt, praktizierte nebenher in der Medizin und ging im übrigen seinen astronomischen Neigungen nach [60]. Bis 1529 machte er auch eigene Beobachtungen, die aber nicht von besonderem Wert waren.

Seine Ideen über das Weltsystem formulierte er erstmals um 1512 im “Commentariolus”, den er an Freunde und andere Astronomen versandte, in sieben Thesen:

- (1) Es gibt kein gemeinsames Zentrum für die Bewegung aller Himmelskörper.
- (2) Der Mittelpunkt der Erde ist nur das Zentrum der Schwerkraft und der Mondbahn.
- (3) Das Zentrum der Welt liegt im Mittelpunkt der Erdbahn nahe der Sonne.
- (4) Der Abstand der Erde von der Sonne ist verschwindend klein gegenüber dem Abstand von der Fixsternsphäre.
- (5) Die tägliche Drehung der Erde erzeugt die scheinbare Bewegung der Fixsterne.
- (6) Die jährliche Bewegung der Sonne ist nur scheinbar und entsteht dadurch, daß die Erde eine Bahn wie die eines Planeten um die Sonne beschreibt.
- (7) Die rückläufige Bewegung der Planeten ist nur scheinbar und kommt durch die Bewegung der Erde zustande.

Er konnte damit also viele der beobachteten Erscheinungen aus der einzigen Hypothese der Erdbewegung erklären.

In den folgenden Jahrzehnten machte Kopernikus sich an die Ausarbeitung des neuen Weltsystems bis hin zur Berechnung von Ephemeriden-Tabellen, die die inzwischen sehr ungenauen Alfonsinischen Tafeln ersetzen sollten. Er zögerte allerdings mit der Publikation der Resultate, da er negative Reaktionen der Theologen befürchtete, aber teilweise wurden sie trotzdem durch seine Korrespondenz mit anderen Astronomen bekannt. Im

Jahre 1539 suchte ihn daraufhin der Wittenberger Professor Georg Joachim Rheticus auf, dem es nach zweijähriger Zusammenarbeit gelang, von Kopernikus das Manuskript zur Drucklegung zu erhalten. Diese erfolgte 1543 in Nürnberg, allerdings mit zwei verfälschenden Änderungen durch den lutherischen Theologen Osiander, der mit der Beaufsichtigung des Drucks betraut war. Er änderte den Titel des Buches "De revolutionibus libri VI" in "De revolutionibus orbium coelestium", um jeden Hinweis auf eine Bewegung der Erde zu vermeiden, und fügte ohne Wissen des Autors ein anonymes Vorwort hinzu, in dem der Inhalt des Werks als bloße mathematische Hypothese dargestellt wurde. Diese Fälschung wurde übrigens erst sehr viel später durch Kepler aufgedeckt. Das erste Exemplar des Buches soll Kopernikus noch am 24.3.1543, also an seinem Todestage, erhalten haben.

Kopernikus wird häufig als der erste bedeutende Astronom der Neuzeit betrachtet. Das ist nicht richtig, soweit es den Inhalt seines Werkes betrifft, der ihn eher als letzten Vertreter der antiken Astronomie erscheinen läßt. Alle seine Ansätze für das neue Weltbild finden sich schon bei antiken Vorgängern wie Philolaus, Herakleides von Pontus und Aristarchus von Samos. Darauf weist Kopernikus selbst ausdrücklich hin, er beruft sich geradezu auf die Autorität seiner antiken Vorbilder, wobei er aber seltsamerweise gerade Aristarchus, dessen Anschauungen den seinen am nächsten kommen, nicht erwähnt.

Kinematisch war das neue heliozentrische Weltsystem dem geozentrischen des Ptolemäus weitgehend äquivalent. Der schon damals naheliegende Schritt, die Sonne als Zentrum der Epizykel aller Planeten anzunehmen, wurde von Kopernikus vollzogen, hatte aber keine Auswirkung auf die Übereinstimmung von Theorie und Beobachtung, da die Entfernungen der Himmelskörper, den Mond ausgenommen, nach wie vor nicht bestimmbar waren. Die Darstellung der Beobachtungen durch das neue Weltsystem ist einfacher und harmonischer nur solange, wie man sich auf die Näherung exakt kreisförmiger Planetenbahnen um die Sonne beschränken kann, weil die durch die Kreisbewegung der Erde vorgetäuschte Epizykelbewegung entfällt. In diesem Fall kommt das kopernikanische System mit sechs gleichförmig durchlaufenen Kreisbahnen für Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter und Saturn aus [61], und Kopernikus versäumte auch nicht, im ersten Buch von "De revolutionibus" auf diese große Vereinfachung gegenüber den, wie er behauptet, 80 Hilfskreisen des Ptolemäus hinzuweisen (in Wirklichkeit sind es nur 40). Um aber die Ungleichförmigkeit der Bewegungen der Planeten mit der gleichen Genauigkeit wie Ptolemäus darzustellen, griff auch er zum Hilfsmittel der Deferenten und Epizykel. Da er zudem aus grundsätzlichen Erwägungen heraus die Einführung eines "punctum aequans" ablehnte und außerdem als Mittelpunkt der Bewegungen nicht die Sonne, sondern das Zentrum der Erdbahn wählte [62], enthielt sein Modell schließlich sogar 49 Hilfskreise, ohne damit ganz die Genauigkeit des ptolemäischen zu erreichen. Auch die relativ wenigen neuen Beobachtungen zur Festlegung der Bahnparameter erreichten nicht die Qualität der antiken oder arabischen Vorgänger. Verbesserte Werte erhielt er allerdings für die Umlaufsdauern der Planeten (Merkur 80 d, Venus 7 m, Mars 2 a, Jupiter 12 a und Saturn 30 a). Daß die auf der Basis dieses System 1551 von Erasmus Reinhold berechneten "Tabulae Prutenicae" trotzdem die Alfonsinischen Tafeln weitgehend ersetzten und wesentlich zur Bekanntheit des kopernikanischen Systems beitrugen, lag überwiegend an ihrer Aktualität ("... treu sind sie nicht, aber neu!"). Die neuen Ergebnissen wurden auch verwendet bei der von Papst Gregor XIII im Jahre 1582 angeordneten Kalenderreform [63]. Ihr schlossen sich die nicht-katholischen Staaten nur widerstrebend an: in Deutschland um 1700, England 1752, Schweden 1844, Rußland 1918, Türkei 1927 und China 1949.

Die Argumente, die Kopernikus zugunsten des heliozentrischen Weltbilds vorbrachte, sind für den heutigen Leser ebensowenig überzeugend wie die seiner Gegner. Neben der Berufung auf antike Autoritäten ist eines der wichtigsten, daß für eine Kugel die Drehung

die einzig angemessene Form der Bewegung sei, woraus die Rotation der Erde gefolgert wird. Dem seit dem Altertum dagegen geäußerten Einwand, daß dann die Luft hinter dem Erdkörper zurückbleiben müsse, begegnete er mit der Annahme, daß sie in Erdnähe mitgenommen würde. Die Bahnbewegung der Erde leitete er daraus her, daß der Zustand der Ruhe, weil er edler als der der Bewegung sei, dem Universum als Ganzem und nicht der Erde gebühre. Schließlich meinte er, daß der Sonne wegen ihrer Größe und ihrer Aufgabe, die ganze Welt zu erleuchten, der Platz als Lampe im Mittelpunkt dieses Tempels zukäme. In einem Punkt nahm er allerdings zukünftige Überlegungen vorweg: Er betrachtete als Ursache der Schwere das Bestreben von Teilchen, sich zu einer Kugel zu vereinigen, das bei allen Himmelskörpern und nicht nur bei der Erde wirksam sei.

Daß das Werk des Kopernikus von der Nachwelt als “kopernikanische Wende” oder sogar als “kopernikanische Revolution” empfunden wurde, lag weniger an der Neuheit seiner Vorstellungen, die ja schon im Altertum vorhanden gewesen waren, als an der völlig anderen geistigen Situation, in der er sie vertrat. Während die geistige Welt der Antike, insbesondere des Hellenismus, von Meinungsvielfalt und Toleranz geprägt gewesen war, herrschte jetzt eine alle Bereiche umfassende Ideologie, die in dem Wahn, im Besitz der absoluten Wahrheit zu sein, abweichende Meinungen - notfalls gewaltsam - unterdrückte. Die Konsequenzen der Thesen des Kopernikus, auch wenn sie von ihm selbst nicht so gesehen wurden, bechränkten sich aber nicht auf wissenschaftliche Detailfragen bezüglich der Bewegung der Himmelskörper, sondern berührten die Grundlagen der christlichen Weltanschauung. Für die monotheistischen Religionen ist der Mensch als Ebenbild Gottes der Mittelpunkt und das Ziel der Schöpfung, die Erde als sein Wohnort die Bühne des Heilsgeschehens. Im heliozentrischen Weltbild wurde die grundsätzliche Trennung von Himmel und Erde, die auch die Philosophie des Aristoteles bestimmt, aufgegeben. Die Erde war nun einer unter mehreren Planeten, diese umgekehrt andere Erden. Daraus ergab sich sofort die Frage, ob auch diese Welten von Menschen bewohnt seien, die von Adam abstammten, der Erbsünde unterworfen wären und eines Heilands bedürften. Die Fixsternsphäre, die bisher die Welt begrenzt und die Sterne bei ihrem täglichen Umschwung mitgeführt hatte, wurde dafür nicht mehr benötigt. Dann brauchten diese aber auch nicht mehr alle in der gleichen Entfernung zu stehen. Sie konnten sich in einem unbegrenzten Raum verteilen und selbst Sonnen mit Planeten sein. Wo war dann aber Platz für Gott und die himmlischen Heerscharen?

Die Reaktion auf die Veröffentlichung von “De revolutionibus” war zunächst schwach und zwiespältig. Während sich die neue Lehre in England unter dem Einfluß von Thomas Digges und William Gilbert (“De magnete”) rasch verbreitete, wurde sie in Deutschland nur zögerlich aufgenommen. Hier gehörten zu ihren Anhängern Michael Mästlin, der Lehrer Keplers, und Christoph Rothmann, der Astronom des Landgrafen Wilhelm IV von Hessen-Kassel. Auch in Italien fand das heliozentrische System nur wenige Anhänger, darunter allerdings den “rotglühenden Kopernikaner” (Dreyer) Giordano Bruno. Er ging über die Thesen des Kopernikus noch wesentlich hinaus und postulierte die unendliche Ausdehnung des Universums mit einer ebenfalls unendlichen Vielfalt von Welten. Die Erde war für ihn ein Stern wie der Mond und die Planeten, die Fixsterne betrachtete er als Sonnen und nahm so in vielem spätere Erkenntnisse vorweg, doch handelte es sich um bloße Spekulationen, die durch keinerlei Beobachtungen gestützt wurden. Er endete wegen dieser und anderer Ketzereien 1600 in Rom auf dem Scheiterhaufen.

Die geringe Resonanz des Werkes von Kopernikus in der Öffentlichkeit war zu einem großen Teil darauf zurückzuführen, daß der sehr schwierige Text nur von wenigen Fachleuten gelesen und verstanden werden konnte. Auch das gefälschte Vorwort trug dazu bei, in ihm nur die Ausarbeitung sehr spezieller mathematischer Hypothesen für astronomische

Berechnungen zu sehen. Von den meisten der Fachkollegen wurde zwar das technische Verfahren benutzt, das dahinter stehende Weltbild aber abgelehnt. Diese Haltung war, vom wissenschaftlichen Standpunkt aus gesehen, auch durchaus berechtigt. Das mathematische Modell des Kopernikus gab die Beobachtungen nicht besser wieder als das des Ptolemäus. Es war diesem kinematisch gleichwertig, und dynamische Argumente, die allein eine Entscheidung zwischen beiden ermöglicht hätten, lagen noch nicht vor.

Die Reaktion der Theologen war unterschiedlich. Während die Katholiken, aus deren Reihen Kopernikus ja kam, sich zunächst weitgehend einer Stellungnahme enthielten, führten die Berichte über die neue Theorie bei den Protestanten, die in primitivem Fundamentalismus auf der wörtlichen Auslegung der Bibel bestanden ("Das Wort sie sollen lassen stahn ..."), zu heftiger Ablehnung.

Es ward gedacht eines neuen Astrologi, der wollte beweisen, daß die Erde bewegt würde und umginge, nicht der Himmel oder das Firmament, Sonne und Mond; gleich als wenn einer auf einem Wagen oder in einem Schiff sitzt und bewegt wird, meynete, er säße still und ruhete, das Erdreich aber und die Bäume gingen und bewegten sich. Aber es gehet jetzt also: wer da will klug sein, der muß ihm etwas eigenes machen, das muß das allerbeste sein, wie er's machet! Der Narr will die ganze Kunst Astronomiae umkehren! Aber wie die Heilige Schrift anzeigt, so hieß Josua die Sonne still stehen und nicht das Erdreich.
(Luthers Tischgespräche, herausgegeben von Aurifaber, \approx 1539)

Die Textstelle, auf die Luther sich bezieht, diente in der Folgezeit immer wieder als theologisches Argument. Es handelt sich um Josua 10, 12-13:

12. Da redete Josua mit dem Herrn des Tages, da der Herr die Amoriter dahingab vor den Kindern Israel und sprach vor dem gegenwärtigen Israel: "Sonne, stehe still zu Gibeon, und Mond im Tale Ajalon!"
13. Da stand die Sonne und der Mond still, bis sich das Volk an seinen Feinden rächte. Ist dies nicht geschrieben im Buch des Frommen? Also stand die Sonne still mitten am Himmel und verzog unterzugehen, beinahe einen ganzen Tag.

Sehr häufig zitiert wurde in diesem Zusammenhang auch Jesaja 38, 8:

Siehe, ich will den Schatten am Sonnenzeiger des Ahas zehn Stufen zurückziehen, über welche er gelaufen ist. Und die Sonne lief zehn Stufen zurück am Zeiger, über welche er gelaufen war.

Besonders eifrig im Kampf gegen das neue Weltbild war Philipp Melanchthon, der entscheidenden Einfluß auf die Lehre der Mathematik und der Naturwissenschaften an den protestantischen Universitäten hatte. In seinen "Initia doctrinae physicae" von 1549 führte er als Argumente gegen die Bewegung der Erde neben den erwähnten Bibelstellen auch das Zeugnis der Sinne und Beweise nach scholastischem Vorbild an, zum Beispiel: "Wenn ein Kreis sich dreht, bleibt sein Mittelpunkt unbewegt; aber die Erde ist der Mittelpunkt der Welt, daher ist sie unbewegt." - eine wahre Theologik! Auch mit seiner humanistischen Toleranz war es nicht weit her, denn 1541 schrieb er an einen Freund:

Manche halten es für eine hervorragende Leistung, eine so verrückte Sache zu machen, wie dieser preußische Sternforscher, der die Erde bewegt und die Sonne anheftet. Wahrlich, weise Herrscher sollten die Zügellosigkeit der Geister zähmen!

Zu solchen gewaltsamen Aktionen kam es allerdings zunächst trotz wachsender Ablehnung sowohl von protestantischer als auch katholischer Seite nicht, da man das Ganze immer noch mehr als akademische Streitfrage unter Gelehrten betrachtete. Für diese bestanden neben den theologischen auch die sachlichen Gegenargumente fort, die sich schon im Almagest finden und die auch Kopernikus nicht widerlegen konnte, so zum Beispiel das Zurückbleiben fallender Körper gegenüber der Oberfläche der bewegten Erde. Hinzu kam noch ein weiteres: das Fehlen der jährlichen Parallaxe der Fixsterne, das Kopernikus durch deren ungeheure Entfernung erklärte. Eine Entscheidung war nur durch genauere Beobachtungen zu erwarten.

C4. Tycho Brahe

Diese neuen Beobachtungen, die letztlich die Entscheidung für das heliozentrische Weltbild herbeiführten, waren das Werk eines Mannes, der selbst auf dem geozentrischen Standpunkt beharrte, nämlich Tyge (später latinisiert zu Tycho) Brahe. Er wurde am 14.12.1546 auf Knudstrup in der Landschaft Skåne, die heute zu Schweden gehört, als Sohn von Otto Brahe und Beate Bille geboren, stammte also beiderseits aus dem dänischen Uradel [64]. Sein Vater, der Kommandant der Festung Helsingør war, hatte ihn seinem Bruder, dem Vizeadmiral und Mitglied des Reichsrats Jørgen Brahe versprochen, dessen Ehe mit Inger Okse kinderlos geblieben war. Als nun nach dem ersten Sohn zunächst nur Töchter geboren wurden, wollte er diese Zusage nicht mehr einhalten, worauf der Onkel den Neffen nach Tåstrup entführte. Da aber in der Folge weitere Söhne hinzukamen und die Zahl der Kinder schließlich auf elf stieg, einigte man sich gütlich, und Tyge blieb bei seinem Onkel als dessen Erbe.

Dieser hatte ihn für die Laufbahn des Staatsmannes vorgesehen, deshalb begann Tyge Brahe 1559 an der Universität Kopenhagen mit dem Studium der Jurisprudenz, Philosophie und Rhetorik. Schon vorher war das Lateinische ihm neben dem Dänischen und dem Deutschen zur eigentlichen Muttersprache geworden, in der er bis an sein Lebensende Gedichte verfertigte. Eine Sonnenfinsternis am 21.8.1560 beeindruckte ihn wegen der genauen Vorhersage tief und weckte sein Interesse für Astronomie und Astrologie. Er kaufte sich eine lateinische Ausgabe des Almagest, die sich heute, mit seinen Anmerkungen, in der Universitätsbibliothek in Prag befindet.

Zur Vertiefung der Bildung war zu dieser Zeit der Besuch einer namhaften ausländischen (protestantischen) Universität unerlässlich. Brahe setzte daher 1562 sein Jurastudium in Leipzig fort. Begleitet wurde er von einem um nur vier Jahre älteren Tutor, Anders Sørensen Vedel, der später in Dänemark königlicher Historiograph wurde und die "Historia Danica" des Saxo Grammaticus ins Dänische übersetzte. Dieser hatte die undankbare Aufgabe, durch strenge Aufsicht seinen Schutzbefohlenen von der zu intensiven Beschäftigung mit der Astronomie und der Mathematik abzuhalten. Tycho gelang es daher nur mit Mühe, von Vedel Geld für einen Himmelsglobus zu erhalten, den man in der Hand halten und notfalls verstecken konnte und mit dessen Hilfe er die Sternbilder auswendig lernte. Weitere Instrumente konnte er sich nur durch Selbstbau verschaffen. Mit ihnen beobachtete er 1564 eine Konjunktion von Jupiter und Saturn und stellte dabei fest, daß sowohl die "Tabulae Alfonsinae" als auch die "Tabulae Prutenicae" sehr ungenau waren, wobei es ihm insbesondere auf astrologische Vorhersagen ankam. Er kam daher zu dem Schluß, daß ein Fortschritt nur durch genaue Beobachtungen zu erreichen sei. Kepler meinte später, daß damit die Erneuerung der Astronomie begonnen habe.

Als Tycho Brahe 1565 wieder nach Kopenhagen zurückbeordert worden war, kam es zu einem Zwischenfall, der seinem Leben eine Wendung gab. Frederik II stürzte von der Schloßbrücke. Zu dem Gefolge, das zur Rettung des Königs ins Wasser sprang, gehörte auch Jørgen Brahe. Während Frederik II keinen dauernden Schaden davontrug und später der großzügige Mäzen von Tycho Brahe wurde, starb der Onkel an den Folgen einer Erkältung, die er sich dabei zugezogen hatte. Damit war der junge Mann von einem lästigen Aufpasser befreit. Sein neuer Vormund war ein Onkel mütterlicherseits, Steen Bille, der selbst alchemistischen Neigungen anhing, liberal dachte und den Neffen wieder ins Ausland reisen ließ.

Diesmal wählte Tycho die Universität Wittenberg, mußte aber wegen der dort herrschenden Pest nach Rostock ausweichen, wo er auch Vedel wiedertraf. Dort beobachtete er am

28.10.1566 eine Mondfinsternis und sagte daraus den Tod des türkischen Sultans voraus. Er sollte damit auch recht behalten, allerdings hatte dieses Ereignis schon Monate vor der Finsternis stattgefunden. Eine andere Begebenheit dieses Jahres war für Brahe weniger erfreulich. Er duellierte sich am 29.12.1566 mit seinem Landsmann Mandus Parsberg, angeblich wegen eines Streites, wer von ihnen der bessere Mathematiker sei. Dabei verlor er einen Teil seiner Nase, der durch ein Silberplättchen ersetzt wurde und ständiges Einbalsamieren erforderte, was die ohnehin recht finstere Grundstimmung Brahes nicht heiterer machte.

Im nächsten Jahr kehrte er zu einem Besuch nach Dänemark zurück, fand aber bei seiner Familie eine recht ungnädige Aufnahme und reiste deshalb gleich wieder ins Ausland, diesmal nach Basel, Ingolstadt und Augsburg, mit dem Vorsatz, sich dort dauerhaft niederzulassen. Er hatte die Bekanntschaft der Brüder Hainzel, reicher Augsburger Kaufleute, gemacht, die ihm den Bau großer Instrumente finanzierten. Dazu gehörte ein Quadrant von 19 Fuß Radius, der allerdings 1574 umgeweht wurde, und ein Himmelsglobus von 5 Fuß Durchmesser. Wegen der Erkrankung seines Vaters kehrte er 1570 nach Dänemark zurück und lebte nach dessen Tod im folgenden Jahr bei seinem Onkel Steen Bille. Unter dessen Einfluß verlagerte sich sein Interesse von der Astronomie zur Alchemie bei gemeinsamen Versuchen, Gold zu machen.

Als er am Abend des 11.11.1572 aus dem Laboratorium kam, sah er im Sternbild Cassiopeia einen neuen Stern, der heller als Venus strahlte [65]. Das erweckte seine Begeisterung für die Astronomie aufs neue. Er versuchte, die Parallaxe des Objekts zu bestimmen, aber sie erwies sich als unmeßbar klein. Das neue Gestirn mußte sich also oberhalb der Sphäre des Mondes befinden, wo nach der Lehre des Aristoteles ewige Unveränderlichkeit herrschte. Zunächst zögerte er, seine Ergebnisse der Öffentlichkeit mitzuteilen, da ihm die Schriftstellerei als eine für einen Edelmann unpassende Tätigkeit erschien, änderte aber seinen Entschluß angesichts der Flut unsinniger Behauptungen, die im Druck erschienen, wie zum Beispiel die These von Beza, einem Freund Calvins, daß es sich um einen zweiten Stern von Bethlehem handle, der die Wiederkunft Christi und das Weltende ankündige. Brahe veröffentlichte seine Ergebnisse zusammen mit der Diskussion ihrer astrologischen Bedeutung in einem kleinen Buch "De Nova Stella", das 1573 in Kopenhagen erschien. Kepler bemerkte später dazu: "Wenn dieser Stern sonst nichts angezeigt hat, dann wenigstens einen neuen großen Astronomen." Über das Werk kam es auch zu einem langen brieflichen Kontakt mit dem schon erwähnten Landgrafen Wilhelm IV von Hessen-Kassel.

Ursprünglich hatte Brahe für das Jahr 1573 eine weitere Auslandsreise geplant, aber daraus wurde nichts. Zunächst erkrankte er, dann verheiratete er sich mit einer nicht-ebenbürtigen Frau namens Christine, über deren Herkunft nichts weiter bekannt ist. Obwohl keine kirchliche Trauung erfolgt war, war diese Ehe nach einem alten dänischen Gesetz, das bis 1683 galt, trotzdem rechtskräftig. Danach wurde eine Frau, die öffentlich mit einem Mann zusammenlebte, seine Schlüssel bewahrte und an seinem Tisch aß, nach drei Wintern als seine Ehefrau betrachtet. Die aus dieser Ehe hervorgegangenen Kinder, das erste wurde schon 1573 geboren, konnten allerdings nicht den Adelstitel erben.

In dieser Zeit setzte Brahe seine Beobachtungen in Herivad fort und hielt auf Wunsch des Königs auch Vorlesungen an der Universität von Kopenhagen, trug sich aber immer noch mit Auswanderungsplänen. 1574 reiste er zunächst nach Kassel, um sich das dortige Observatorium anzusehen, dann zur Buchmesse nach Frankfurt und weiter über Basel nach Venedig und schließlich wieder nach Augsburg, wo er den Himmelsglobus fertiggestellt vorfand. In Regensburg nahm er Kontakt mit Hagecius, dem Leibarzt Rudolfs II von Habsburg, auf, was später bedeutungsvoll werden sollte. Inzwischen hatte aber Wilhelm

IV an den dänischen König geschrieben und ihn zu Tycho Brahe als "Dänemarks Ruhm" beglückwünscht.

Frederik II, ein Anhänger der Astrologie, tat alles, um Dänemark diesen Mann zu erhalten. Er verlieh Tycho Brahe die im Sund gelegene Insel Hven [66], heute zu Schweden gehörig, als Lehen, dazu jährlich 500 "gute alte Taler" sowie die Einkünfte einer Domherrenstelle in Roskilde und eines Gutes in Norwegen. Niemals seit den Zeiten Babylons ist die Astronomie in solchem Umfang mit staatlichen Mitteln gefördert worden.

Im Jahre 1576 begann Brahe mit dem Bau der Sternwarte Uraniborg, die großzügiger ausgestattet war als irgend eine vorher [67]. Zu ihr gehörten eine eigene Papiermühle und Druckerei und sogar ein eigener Kerker. Er wurde auch benötigt, denn Tycho Brahe zog die ihm untertänigen Bauern schonungslos zu Dientsleistungen heran, bis sie rebellierten und sogar der König selbst sich ins Mittel legen mußte. An den Beobachtungen war eine so große Zahl von Assistenten beteiligt, daß später sogar eine Zweigsternwarte - Stjerneborg [68] - eingerichtet werden mußte. Zu ihnen gehörten Christian Søren Longomontanus (aus Langbjerg auf Alsen), der später Brahes Nachfolger als königlicher Astronom wurde, und sein künftiger Schwiegersohn Junker Tegnagel. In den ersten Jahren beteiligte sich sogar seine Schwester Sophia an den Beobachtungen - eine für eine junge Edeldame dieser Zeit höchst ungewöhnliche und unpassende Beschäftigung. Vier seiner Assistenten wurden übrigens später Bischöfe der Landeskirche - offenbar lieferte die Astronomie die richtige Vorbildung für die Beschäftigung mit den himmlischen Dingen.

Die Sternwarte enthielt auch ein großes Laboratorium, in dem er seinen alchemistischen Neigungen nachging und unter anderem Arzneien erfand, die sogar noch lange in der "Pharmacopia Danica" aufgeführt wurden. Ihr Nutzen für die Patienten war wegen der hohen Anteile von Quecksilber und gemahlene Edelsteinen fraglich, doch blieb der Schaden wegen der hohen Kosten auf sehr kleine Teile der Bevölkerung beschränkt. In dieser Tätigkeit unterstützte ihn Sophia auch noch nach ihrer Verheiratung bei Besuchen auf Hven.

Der Lebensstil Tycho Brahes war seinem Adelsstolz entsprechend aufwendig. Mehrfach wurde er auf seiner Insel von Staatsgästen besucht, so von James VI von Schottland und von Heinrich von Rantzau, dem königlichen Statthalter im Herzogtum Holstein, der selbst ein begeisterter Astrologe war und darüber ein Buch verfaßt hatte. Für die riesigen Unkosten von 75000 Talern reichte der Ertrag des Lehens nicht aus, daher gewährte Frederik II ihm weitere Einkünfte. Den damit verbundenen Verpflichtungen, zum Betrieb des Leuchtturms auf Kullen und der Instandhaltung einer Kapelle im Dom zu Roskilde, kam Brahe aber nicht nach, so daß der König immer wieder aushelfen mußte.

Die wichtigste Gegenleistung war die Erstellung von Horoskopen, so für den Thronfolger, den späteren Christian IV, der am 12.4.1577 geboren wurde, wobei Tycho für die aus dem Hause Mecklenburg stammende Königin Sophie auch eine deutsche Fassung schrieb. Offenbar war sein astrologischer Blick in die Zukunft aber doch nicht sehr deutlich, denn die Probleme, die er später mit diesem jungen Herrscher bekommen sollte, hat er nicht vorausgesehen. Im Laufe der Jahre hatte er allerdings ohnehin ein gewisses Mißtrauen gegen die Astrologie entwickelt. Die wöchentliche Erstellung von Horoskopen wurde für ihn zu einer lästigen Pflicht und seine Voraussagen immer düsterer, aber gerade deswegen trafen sie häufig ein. Noch heute nennt man in Dänemark einen Unglückstag, an dem alles schief geht, einen "Tyge Brahes dag".

Die Hauptinstrumente der neuen Sternwarte waren Vertikalquadranten von 2, $5\frac{1}{2}$ und 7 Fuß Radius, wobei die kleineren um die Vertikale gedreht werden konnten, sowie ein

Mauerquadrant mit einem Radius von $6\frac{3}{4}$ Fuß [69], mit dem Sternhöhen auf $10''$ genau gemessen werden konnten. Hinzu kamen Sextanten mit Radien bis zu $5\frac{1}{2}$ Fuß Radius [70] zur Messung von Sternabständen. Alle diese Instrumente hatten Ablesehilfen zur Erhöhung der Genauigkeit. Sie sind im Detail dargestellt in dem Buch „Astronomiae instauratae mechanica“ aus dem Jahre 1588. Noch vor ihrer Fertigstellung erschien 1577 ein heller Komet, dessen Positionen mit einem Kreuzstab [71] bestimmt wurden, der mittlere Fehler betrug dabei $4'$. Brahe konnte damit zeigen, daß die kleinste Entfernung dieses Objekts mindestens das Dreifache des Mondabstandes betragen mußte. Es konnte sich daher nicht um ein atmosphärischen Phänomen in der sublunaren Welt handeln, wie Aristoteles behauptet hatte. Da aus seiner Parallaxe zu anderen Zeiten eine Entfernung folgte, die größer war als die der Venus, konnten auch die Kristallsphären der Planeten nicht real sein.

Aus den Beobachtungen, die über 21 Jahre regelmäßig fortgeführt wurden, ergab sich ein verbesserter Wert für die Schiefe der Ekliptik von $23^{\circ}31\frac{1}{2}'$, wobei der Einfluß der Refraktion berücksichtigt worden war. Da das Ergebnis von dem des Kopernikus abwich, schickte Brahe später seinen Assistenten Elias Olsen nach Frauenburg, um die Polhöhe zu bestimmen, wobei sich zeigte, daß sie $2\frac{1}{4}'$ größer war, als Kopernikus angegeben hatte. Daß auch Brahes Wert noch um $2'$ zu groß ist, rührt daher, daß er die Sonnenparallaxe berücksichtigt, aber dafür den falschen antiken Wert von $3'$ übernommen hatte. Für die Exzentrizität der Sonnenbahn ergab sich 0.03584 und für die Länge des Apogäums $95\frac{1}{2}^{\circ}$.

Neben der Bewegung der Sonne wurde die des Mondes systematisch über viele Jahre verfolgt. Dabei entdeckte Brahe eine neue Unregelmäßigkeit, die Variation, und außerdem, daß die Neigung der Bahnebene des Mondes periodisch schwankt und die Regression der Mondknoten nicht gleichförmig ist. Um die erforderliche Genauigkeit der Mondpositionen zu erreichen, legte er einen neuen Sternkatalog an, der aus 21 Fundamentalsternen mit einem Fehler von weniger als $40''$ und daran angeschlossenen weiteren 788 Sternen mit einem Fehler von ungefähr $1'$ bestand. Dieser übertraf als erster bei weitem die Genauigkeit des Katalogs von Hipparch und Ptolemäus und diente ein Jahrhundert lang als Grundlage aller Sternkarten, so der berühmten „Uranometria“ von Bayer aus dem Jahre 1603 [72]. Durch Vergleich der Längen der Sterne mit den antiken Werten erhielt er für die Präzession der Äquinoktien den genauen Wert von $51''$ im Jahr.

Den Hauptgegenstand seiner Beobachtungen bildeten aber während der gesamten Zeit, nicht zuletzt wegen seiner astrologischen Interessen, die Planetenpositionen. Alle seine Ergebnisse faßte er 1583 zu einem Weltmodell zusammen, bei dem die Sonne um die Erde läuft, während sie gleichzeitig von den Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn umkreist wird [73], so daß die Erde nur noch Bewegungsmittelpunkt für Sonne und Mond ist. In gewissem Sinne nimmt es eine mittlere Stellung zwischen denen des Ptolemäus und des Kopernikus ein, wobei es dem letzteren kinematisch äquivalent ist. Neben den üblichen Argumenten der Anti-Kopernikaner für den geozentrischen Standpunkt war für Brahe von Bedeutung, daß die Fixsterne keine beobachtbare jährliche Parallaxe zeigten. Kopernikus hatte das mit ihrer großen Entfernung erklärt, aber da Brahe aus seinen Beobachtungen für sie einen Winkeldurchmesser von $1'$ annahm, ergab sich für ihn eine unplausible riesige Größe und zugleich eine unnötige Leere des Weltalls.

Tycho Brahe hielt dieses Weltmodell, das allerdings im wesentlichen schon im Altertum als „ägyptisches System“ bekannt gewesen war, für seine herausragende Leistung und geriet wegen der Priorität in heftigen Streit mit Reymers Bär, latinisiert zu Ursus, der der Sohn eines Schweinehirten aus Hennstedt in Dithmarschen war. Gefördert durch Heinrich von Rantzau erwarb er sich beträchtliche astronomische Kenntnisse und wurde schließlich sogar

der Vorgänger von Brahe im Amt des “mathematicus caesareus” bei Rudolf von Habsburg in Prag. Brahe beschuldigte die “bestia dithmarsica”, wie er ihn nannte, bei einem Besuch auf Hven 1584 seine Idee gestohlen zu haben und zog später auch Kepler in diesen Streit hinein.

Enthalten ist das neue Weltsystem in dem Buch “De mundi aetherei ...” über den Kometen von 1577, das 1588 erschien. Im gleichen Jahr starb sein großer Gönner und Förderer Frederik II, weil, wie Anders Søren Vedel in der Leichenrede bemerkte, “Seine Majestät leider das Trinken nicht lassen konnte”. Statt des erst elfjährigen Sohnes Christian übernahmen vier Regenten die Macht. Obgleich Tycho Brahe nach wie vor über große Beträge verfügen konnte, war die neue Regierung doch weniger großzügig und führte genauere Kontrollen durch. Das ließ in ihm wieder Auswanderungspläne wachwerden, wozu auch die intensive Korrespondenz mit dem Landgrafen Wilhelm IV beitrug.

Diese betraf allerdings nicht nur astronomische Gegenstände. Wilhelm IV besaß zum Beispiel einen Elch, der den Jagdwagen zog, und hätte das Gespann gern auf vier Elche erweitert. Er schrieb deswegen 1591 an Brahe, und dieser konnte tatsächlich auf dem Familiengut in Knudstrup einen weiteren Elch auftreiben. Das Tier wurde zunächst bis Karlskrona transportiert und im Hause eine Nichte untergebracht. Als aber eines Tages die Familie das Haus verlassen hatte, erstieg der Elch die Treppe zum Obergeschoß, wo er ein Faß mit Starkbier fand. Er betrank sich sinnlos, stürzte auf dem Rückweg die Treppe hinab und starb.

Die Situation Brahes verschlechterte sich erheblich nach der Thronbesteigung Christians IV im Jahre 1596. Der junge König teilte das astronomische Interesse seines Vaters nicht und war zudem von recht eigenwilliger Gemütsart. Es kam daher bald zu einem gespannten Verhältnis und schließlich zu Einkommensverlusten für Brahe. Da sein Gönner Wilhelm IV schon 1592 verstorben war, nahm er jetzt Kontakte zu Kaiser Rudolf II von Habsburg auf. Um aus der Reichweite von Christian IV zu kommen, verließ er 1597 Hven mit aller beweglichen Habe und setzte sich nach Rostock ab, von wo er Verhandlungen mit dem König zu führte. Als diese sich zerschlugen, zog er zunächst weiter nach Wandsbeck zu seinem Freund Heinrich von Rantzau. Im folgenden Jahr nahm er dann das Angebot Rudolfs II an und machte sich auf die Reise die Elbe hinab nach Prag, wo er 1599 als Nachfolger von Bär das Amt des “mathematicus caesareus” antrat.

Seine Erwartungen wurden allerdings nur zum Teil erfüllt. Sein Gehalt von 3000 Gulden im Jahr war zwar das höchste am Hof, wurde aber nur schleppend bezahlt. Da ihn das ständige Läuten der Kirchenglocken in der Stadt störte, zog er um in das Schloß Benatek, wodurch sich der Beginn der Beobachtungen noch weiter verzögerte. Hinzu kamen Schwierigkeiten in der Familie und mit den Assistenten. Longomontanus verließ ihn und kehrte nach Dänemark zurück, wo er später königlicher Astronom wurde. An seiner Stelle gewann Brahe 1600 Johannes Kepler mit der Zusage, daß dieser sein Nachfolger als kaiserlicher Mathematiker werden sollte, wenn auch nur für das halbe Gehalt. Die Zusammenarbeit der beiden grundverschiedenen Männer gestaltete sich sehr schwierig. Es kam immer wieder zu Zerwürfnissen, meist wegen finanzieller Probleme, wobei die Heirat von Brahes Tochter Elisabeth mit Tengenagel die Situation auch nicht vereinfachte.

Am 13.10.1601 nahm Brahe an einem Gastmahl des Barons von Rosenberg teil und kehrte krank nach Hause zurück, angeblich wegen Harnverhaltung. Er verfiel in ein heftiges Fieber, wobei ihn in wachen Augenblicken die Sorge quälte: “Ne frustra vixisse videar!” (Möge ich doch nicht vergebens gelebt haben!). Am Vorabend des 24.10. beauftragte er Kepler mit der Fertigstellung seines Lebenswerks, der Tabulae Rudolphinae, und starb bald darauf. Er wurde am 4.11.1601 mit großem Pomp in der Teyn-Kirche in Prag beigesetzt, wo sein Epitaph noch heute zu sehen ist [74].

C5. Johannes Kepler

Das Zerwürfnis mit Christian IV und die Aufgabe der Tätigkeit auf Hven ist von Tycho Brahe in der Folge sicher als ein großes Unglück angesehen worden, für die Astronomie war es aber ein Glücksfall. Ohne dieses Ereignis wäre es kaum zur Begegnung mit Kepler gekommen, in dessen Händen die Beobachtungen Brahes, ganz entgegen der Intention des Urhebers, zum entscheidenden Werkzeug für die Durchsetzung des heliozentrischen Weltbildes wurden.

Johannes Kepler wurde am 27.12.1571 (um 14³⁰) in Weil der Stadt geboren [75]. Er stammte aus einer einst angesehenen, jetzt aber heruntergekommenen Bürgerfamilie und war ein schwächliches, von Krankheit geplagtes Kind, aber trotz seines unregelmäßigen Schulbesuches zeigte sich bald seine große Begabung. Eine erste Berührung mit der Astronomie gab es, als ihm seine Mutter im Jahre 1577 den Kometen zeigte, der ja auch im Leben Brahes eine bedeutende Rolle spielte. Wegen Schwierigkeiten in der überwiegend katholischen Stadt zog die Familie nach Leonberg um, wo er 1583 das "Landexamen", eine Begabtenprüfung, bestand und deshalb ab 1584 die Oberschule in Adelberg und ab 1586 das Seminar in Maulbronn besuchte.

Nachdem er 1588 sein Baccalaureat erworben hatte, begann er 1589 mit dem Studium der Theologie an der Universität Tübingen. Die ersten zwei Jahre verbrachte er in der Artistenfakultät, wo Michael Mästlin sein Lehrer in Mathematik und Astronomie wurde. Daran schlossen sich drei Jahre in der theologischen Fakultät, aber die Engstirnigkeit seiner Lehrer und die Glaubensstreitigkeiten zwischen Lutheranern und Calvinisten waren nicht nach seinem Geschmack. Kurz vor dem Abschluß des Studiums nahm er daher auf Empfehlung von Mästlin eine Professur für Mathematik an der Stiftsschule der Steiermark in Graz an, behielt sich aber eine Rückkehr in die geistliche Laufbahn vor.

Er hatte nur sehr wenige Hörer, aber das wunderte seine Vorgesetzten nicht, "weil Mathematicum studium nit Jedermanns thuen ist", woran sich bis heute nicht viel geändert hat. Damit er aber für sein Gehalt auch die angemessene Gegenleistung erbringen würde, erhielt er 1595 zusätzliche Aufgaben: Unterricht in Rhetorik und Kalendermachen, einschließlich Wetterprognosen. Bei den letzteren hatte er eine ausgesprochen glückliche Hand. Er sagte einen strengen Winter voraus, der ebenso eintrat wie ein gleichfalls prophezeiter Türkenanfall, die allerdings sehr häufig vorkamen. Die Vorhersagen brachten ihn über die Astrologie wieder in Verbindung mit der Astronomie und dort zu Spekulationen über Zahl und Bahnen der Planeten, wobei er sich als Neuplatoniker und Zahlenmystiker zeigte.

Schon im folgenden Jahr 1596 erschien sein erstes großes Werk, der "Prodromus Dissertationium Cosmographicarum continens Mysterium Cosmographicum", meist als "Mysterium Cosmographicum" abgekürzt. In ihm vertrat er als erster offen, entgegen einer Weisung aus Tübingen, das kopernikanische Weltbild als physikalische Realität und nicht nur als mathematische Hypothese und deckte zugleich die Fälschung des Theologen Oslander auf. Er versuchte, die Anzahl der Planeten und ihre Abstände von der Sonne als a priori denknotwendig zu begründen, indem er zwischen je zwei von ihnen einen der platonischen Körper, also der regulären Polyeder, so einzuschieben, daß die Sphäre des einen ihn umschreibt, während die des anderen ihm einbeschrieben ist [76].

Saturn - **Würfel** - Jupiter - **Tetraeder** - Mars - **Dodekaeder** - Erde - **Iksaeder** - Venus
- **Oktaeder** - Merkur

Damit glaubte er den göttlichen Bauplan des Universums entdeckt zu haben: "Wenn Dich

ein Bauer fragen sollte, an welchem Haken der Himmel aufgehängt ist, daß er nicht herunterfällt, so kannst Du ihm leicht antworten.”

Daß die so bestimmten Abstände nur recht ungenau mit denen aus dem kopernikanischen System übereinstimmten, führte er auf fehlerhafte Beobachtungen und Rechnungen von Kopernikus zurück. Er versuchte weiterhin, einen Zusammenhang zwischen dem Abstand und der Umlaufdauer eines Planeten zu finden, allerdings zu dieser Zeit noch ohne Erfolg. Wegweisend war allerdings seine Begründung für die Existenz eines solchen Zusammenhanges. Er ging davon aus, daß die Sonne nicht nur der geometrische Mittelpunkt des Planetensystems ist, sondern daß von ihr eine “Kraft” ausgeht, die sich wie eine Strahlung im Raum ausbreitet und die Planeten in ihrer Bahn antreibt. Die “anima motrix”, die nach Aristoteles dem Himmelskörper innewohnt, wird durch eine von außen einwirkende “vis motrix” ersetzt. Allerdings ist diese Kraft nicht radial gerichtet, sondern die rotierenden Strahlen der Sonne wirken wie ein riesiger Besen und fegen die Planeten zur Seite.

Der Druck des Werkes erfolgte in Tübingen und wurde von Mästlin überwacht. An bedeutende Gelehrte wurden nach der Sitte der Zeit Kopien versandt, so an Tycho Brahe, von dem er sich Daten erhoffte, und an Galilei. Verständnis fand er nur bei Brahe, der ihm eine Assistentenstelle anbot, während der Briefwechsel mit Galilei recht einseitig blieb.

Am 27.4.1597 heiratete er trotz eines ungünstigen Horoskops Barbara Mühleck, eine zweifache Witwe (“von schlichtem Gemüt und fettem Körper”), die Freunde für ihn ausgesucht hatten. Sie war geizig, depressiv und hatte kein Verständnis für seinen Beruf. Von ihren fünf Kindern starben drei schon früh. Schon 1598 begann auf Befehl von Erzherzog Ferdinand II, dem späteren Kaiser, die Verfolgung und Vertreibung der Protestanten, ein katholischer Vorläufer der heutigen “ethnischen Säuberungen”. Die Schule wurde geschlossen, Kepler mußte nach Ungarn fliehen, durfte aber 1599 mit einer Sondergenehmigung zurückkehren, da man hoffte, er würde zum Katholizismus konvertieren, weil er aus seiner protestantischen Gemeinde ausgeschlossen worden war. Dazu war er allerdings nicht bereit, und da er kaum noch Hörer fand, nahm er das Angebot von Tycho Brahe an und reiste am 1.1.1600 ab nach Benatek. Am 4.2.1600 kam es zum Treffen mit Brahe, und Kepler übernahm von Longomontanus die Berechnung der Bahn des Mars, des schwierigsten unter den gut beobachtbaren Planeten. Das Verhältnis der beiden eigenwilligen Männer war von Anfang an gestört, auch wegen finanzieller Probleme, und es kam zu einem Zerwürfnis. Kepler kehrte für kurze Zeit nach Graz zurück, aber die beiden waren abhängig voneinander, und nach der Aussöhnung zog er im Oktober endgültig mit der Familie nach Prag.

Nach dem Tode von Tycho Brahe wurde er 1602 dessen Nachfolger als “mathematicus caesareus”, wenn auch nur zum halben Gehalt. Nach großen Schwierigkeiten mit den Erben Brahes gelang es ihm, sich in den Besitz des Beobachtungsmaterials zu setzen. Er selbst war wegen eines Augenfehlers kein guter Beobachter - das Keplersche oder astronomische Fernrohr, das ein Ergebnis seiner Arbeiten zur Optik und speziell zur Refraktion (1611) war, hat er nicht selbst gebaut, sondern erst der Jesuit Scheiner (1613), ein heftiger Gegner Galileis.

Seine Haupttätigkeit blieb aber die Bestimmung der Bahn des Mars relativ zur Sonne. Aus den von Brahe beobachteten Oppositionen dieses Planeten in den Jahren von 1580 bis 1600 berechnete er zunächst in vierjähriger Arbeit einen Exzenter mit Äquant, der die Messungen bis auf eine Abweichung von maximal 8' wiedergab. Jeder andere Astronom seiner Zeit hätte sich damit zufriedengegeben, nicht so Kepler: “Es geziemt uns, denen die göttliche Güte einen so sorgfältigen Beobachter wie Tycho Brahe gegeben hat, daß in seinen Beobachtungen ein Fehler von 8' bei den Berechnungen des Ptolemäus entdeckt

werden konnte, dieses Geschenk Gottes mit dankbarem Sinn anzuerkennen, indem wir uns bemühen, die wahre Gestalt der himmlischen Bewegungen herauszuarbeiten.”

Er begann daher gänzlich von vorne, indem er die Bahnen von Erde und Mars, die in die Beobachtungen in verschlungener Form eingehen, zu entwirren versuchte. Dazu benutzte er die Tatsache, daß der Mars nach einer siderischen Umlaufsdauer wieder an der gleichen Stelle im Raum steht, während sich die Position der Erde verändert hat. Aus dem umfangreichen Beobachtungsmaterial von Brahe erhielt er so eine große Anzahl von Positionen, aus denen sich die genaue Erdbahn ergab. Ein entsprechendes Verfahren lieferte dann auch die Marsbahn. Während bei der Erde die Darstellung durch einem Exzenter mit Äquant hinreichend genau war, galt das nicht für den Mars. Nach mühevollen Versuchen mit anderen Kurven erhielt er schließlich als Bahn eine Ellipse, in deren einen Brennpunkt die Sonne steht, das erste Keplersche Gesetz. Es stellt, anders als die Theorie des Kopernikus, einen vollständigen Bruch mit der antiken Vorstellung idealer Kreisbahnen dar. Für die Durchlaufung der Bahnkurve hatte er schon vorher das zweite Keplersche Gesetz gefunden: Der Fahrstrahl (“radius vector”) von der Sonne zum Planeten überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen. Diese Ergebnisse lagen 1604 vor, aber wegen der Ebbe in der kaiserlichen Kasse konnte das Werk “Astronomia nova”, in dem er neben der Lösung des Problems auch die vergeblichen Versuche beschreibt, erst 1609 erscheinen.

Die sehr anschauliche Formulierung der beiden Gesetze läßt nicht die völlig neuartigen mathematischen Schwierigkeiten erkennen, die bei ihrer Anwendung auftreten. Da die Abstände im Sonnensystem in dieser Zeit ebenso wenig wie in der Antike gemessen werden konnten, war die einzige Größe, die letztlich mit der Beobachtung verglichen werden konnte, der Positionswinkel $\varphi(t)$ des Planeten relativ zur Apsidenlinie, die wahre Anomalie [77]. Aus den beiden Keplerschen Gesetzen für die Bahn des Planeten P in Polarkoordinaten:

$$r(\varphi) = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \varphi}$$

mit der großen Halbachse a und der (numerischen) Exzentrizität e , sowie:

$$r^2 \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2\pi ab}{T} = \frac{2\pi a^2 \sqrt{1 - e^2}}{T}$$

mit der Umlaufsdauer T ergibt sich durch Kombination für die gesuchte Funktion $\varphi(t)$ die Differentialgleichung

$$\frac{1}{(1 + e \cos \varphi)^2} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2\pi}{T} (1 - e^2)^{-3/2} ,$$

die sich sofort integrieren läßt:

$$\int_0^\varphi \frac{d\varphi}{(1 + e \cos \varphi)^2} = \frac{2\pi}{T} (1 - e^2)^{-3/2} t .$$

Die (elementare) Auswertung des Integrals führt zu

$$\arccos \left(\frac{e + \cos \varphi}{1 + e \cos \varphi} \right) - \sqrt{1 - e^2} \frac{e \sin \varphi}{1 + e \cos \varphi} = \frac{2\pi}{T} t .$$

Das ist eine transzendente Gleichung für $\varphi(t)$, die sich zwar nicht in geschlossener Form, aber iterativ auflösen läßt.

Kepler, dem diese analytischen Hilfsmittel natürlich noch nicht zur Verfügung standen, ging einen anderen Weg. Er betrachtete einen Kreis vom Radius a , dessen affines Bild die Bahnellipse ist, den Exzenter, und auf ihm einen “Ersatzplaneten” Q, der synchron mit P umläuft. Mit der Apsidenlinie bildet sein Radiusvektor zum Mittelpunkt des Exzenters den Winkel u , die exzentrische Anomalie. Für sie erhielt Kepler auf geometrischem Wege die wesentlich einfachere Kepler-Gleichung

$$u - e \sin u = \frac{2\pi}{T} t ,$$

die ebenfalls transzendent ist und von ihm iterativ gelöst wurde. Eine Auflösung in der Form einer Fourier-Reihe gelang erst um 1800 Friedrich Wilhelm Bessel mit Hilfe der von ihm eingeführten und nach ihm benannten Funktionen $J_n(x)$:

$$u(t) = \frac{2\pi}{T} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_n(ne)}{n} \sin(n \frac{2\pi}{T} t),$$

aber die numerische Auswertung dieses Ausdruck ist im allgemeinen auch nicht einfacher als die der Kepler-Gleichung.

In den folgenden Jahrzehnten dehnte Kepler die Berechnung der Bahnen auf die übrigen Planeten und den Mond aus. Die Ergebnisse veröffentlichte er 1627 in Erfüllung des Versprechens, das er Brahe gegeben hatte, als "TABULAE RUDOLPHINAE quibus astronomicae scientiae temporum longiquitate collapsae restauratio continentur. A Phoenice illo astronomorum TYCHONE" [77,78].

Im Jahre 1611 dankte Rudolf II als Kaiser ab. Sein Nachfolger Mathias war weder an Astronomie noch an Astrologie interessiert. Kepler nahm daher Verhandlungen mit den Landständen von Oberösterreich wegen der Stelle eines "Landschaftsmathematikus" an der Hochschule in Linz auf. Im folgenden Jahr starb seine Frau, dann Rudolf II, und er zog nach Linz um, blieb aber trotzdem noch kaiserlicher Mathematiker mit einem Teil des Gehalts, der allerdings nur sehr unregelmäßig gezahlt wurde. Im Jahre 1611 entschloß er sich seiner Kinder wegen zu einer zweiten Ehe und zog dabei elf Kandidatinnen in Betracht. Mit seinen Freunden diskutierte er sehr gründlich deren Vorzüge und Nachteile in Form einer, wie man heute sagen würde, Evaluation. Er entschied sich schließlich für die vierundzwanzigjährige kinderliebe Waise Susanna, mit der er auch eine, im Gegensatz zur ersten, glückliche zweite Ehe führte.

Umzug und Eheschließung machten eine Neueinrichtung seines Hausstandes in Linz erforderlich. Dazu gehörte auch die Anschaffung eines Weinvorrates. Dieser wurde in den gebräuchlichen Fässern geliefert, die die Form von Abschnitten eines dreiaxigen Ellipsoids hatten. Um nicht übervorteilt zu werden, sah er sich genötigt, das Volumen dieser recht komplizierten Körper zu berechnen und entwickelte dabei die nach ihm benannte Faßregel, die im wesentlichen mit der Simpson-Regel zur näherungsweise Berechnung von Integralen übereinstimmt und exakt gilt, wenn der Querschnitte des Körpers eine quadratische Funktion der Längskoordinate ist:

$$V = \frac{h}{6} (Q_a + 4Q_m + Q_e).$$

Dabei ist h die Länge des Körpers, Q_a der Querschnitt der einer Stirnfläche, Q_e der der anderen und Q_m der bei $h/2$. Den Beweis mit vielen Anwendungen veröffentlichte er 1615 als "Nova stereometria doliorum vinarium" in Linz, eine deutschsprachige Kurzfassung erschien 1616 und hatte den durchaus nicht kurzen Titel "Auszug aus der uralten Messekunst Archimedes und deroselben newlich in Latein ausgegangenen Ergentzung, betreffend Rechnung der körperlichen Figuren, hohlen Gefäßen und Weinfässer, sonderlich des Österreichischen, so under allen den artigsten Schick hat."

In den folgenden Jahren schrieb er drei Bücher, zunächst ein Lehrbuch der kopernikanischen Astronomie in Frage-und-Antwort-Form, "Epitome Astronomiae Copernicanae", dessen drei Teile 1618, 1620 und 1621 in Linz erschienen. Es kam 1633 auf den "Index librorum prohibitorum". 1619 folgte ein Buch über Kometen mit viel astrologischer Spekulation. Sein Verhältnis zur Astrologie war allerdings zwiespältig. In seinen Anfängen hielt er sich an die überlieferten Regeln, aber die Ereignisse in seinem Leben stimmten nicht mit den Prognosen überein. Er versuchte deshalb umgekehrt, den Zeitpunkt seiner Geburt zu korrigieren, schließlich sogar durch eine berechnete Empfängniszeit zu ersetzen

und kam dafür auf den 16.5.1571, 4³⁷. Danach wäre er ein in der Hochzeitsnacht empfangenes Siebenmonatskind gewesen, wogegen gute Gründe sprachen. Mit zunehmendem Alter wurde es ihm mehr und mehr zur Last, Horoskope stellen zu müssen, aber: "Es ist zwar die Astrologia ein unvernünftig Töchterlein der würdigen Mutter Astronomia, allein die Mutter müßte darben, wenn die Tochter nichts erwürbe!"

Im gleichen Jahre erschienen auch als Fortsetzung des "Mysterium Cosmographicum" die "Harmonices Mundi", ein Buch voller Zahlenmystik und wilder Spekulationen über die Musik der Sphären, von dem nur eine Seite von Bedeutung geblieben ist, denn sie enthält das dritte Keplersche Gesetz: Die Kuben der großen Halbachsen der Planetenbahnen verhalten sich wie die Quadrate der Umlaufsdauern. Die Jahre von 1616 bis 1621 wurden überschattet dadurch, daß Keplers Mutter, die allerdings von boshafter und zänkischer Natur war, von feindseligen Nachbarn als Hexe denunziert und in Leonberg in den Kerker geworfen wurde. Kepler gelang es nur durch rastlose Bemühungen und den Einsatz seines Stellung als kaiserlicher Mathematikus, sie vor dem Scheiterhaufen zu bewahren.

Die Hexenverfolgung, die von allen christlichen Glaubensgemeinschaften betrieben wurde, ist eines der schrecklichsten Beispiele religiösen Wahns. Sie wird gern als eine Verirrung des "finsternen Mittelalters" dargestellt, ist aber eine Erscheinung der frühen Neuzeit. Ausgelöst wurde sie durch die Bulle "Summis Desiderantis Affectibus", die "Hexenbulle", von Papst Innozenz VIII aus dem Jahre 1484 und den darauf fußenden "Hexenhammer" der beiden deutschen Dominikanerpatres Sprenger und Institoris, aber auch auf protestantischer Seite haben insbesondere Martin Luther und Johannes Bugenhagen in hohem Maße zur Förderung dieses christlichen Massenwahns beigetragen, der allein in Deutschland fast hunderttausend Opfer forderte. Erst die Aufklärung hat, gegen den heftigen Widerstand der Geistlichkeit beider Konfessionen, diesen bestialischen Ritualmorden ein Ende gesetzt. Die letzten beiden offiziellen Prozesse fanden 1775 in Kempten und 1782 in Glarus, dem Wirkungsort von Zwingli, statt, also etwa zur Zeit von Goethes Italienreise. Hauptanklagepunkt war zu dieser Zeit immer noch der angebliche Geschlechtsverkehr mit dem Teufel!

Keplers Stellung in Linz wurde 1626 unhaltbar wegen der Protestantenvverfolgung nach dem Beginn des Dreißigjährigen Krieges und dem Regierungsantritt von Ferdinand II (1619). Er brachte deshalb seine Familie nach Regensburg und ging selbst nach Ulm wegen des Drucks der Rudolphinischen Tafeln. Sie stellen ein Handbuch zur Berechnung der Positionen der Himmelskörper auf der Grundlage der Beobachtungen von Brahe dar, waren für ein Jahrhundert das Standardwerk und förderten durch ihre unübertroffene Genauigkeit die Verbreitung des kopernikanischen Weltbildes, obgleich sie natürlich immer noch keinen dynamischen Beweis enthielten.

Keplers letzte Jahre waren geprägt von verzweifelten Versuchen, in den Wirren des Dreißigjährigen Krieges die Vollendung seines Werkes und das materielle Überleben seiner Familie zu sichern, wobei seine Ängste manchmal auch übertrieben waren. Er bemühte sich vergeblich, mit Hilfe des astrologiegläubigen Wallensteins, dem er als jungen Mann das Horoskop gestellt hatte, seine Außenstände zu erhalten und wurde sogar von 1628 bis 1630 sein Leibastronom, und vor allem -astrologe, in Sagan in Schlesien, aber vergeblich. Auf der Reise nach Regensburg zum Reichstag starb er am 15.11.1630 an Erschöpfung und starker Erkältung. Seine Grabschrift hatte er selbst geschrieben:

"Mensus eram coelos, nunc terrae metior umbras;
Mens coelestis erat, corporis umbra iacet."

Sie wurde von Reinhold Schneider ins Deutsche übertragen:

“Himmelslicht hab ich gemessen, jetzt meß ich die Schatten der Erde.
Himmlischer Art mein Geist - Schatten mein Leib, der hier liegt.”

C6. Galileo Galilei

Galileo Galilei wurde am 15.2.1564 in Pisa als Abkömmling eines vornehmen, aber verarmten Florentiner Geschlechts geboren [80]. Sein Vater, Musiker und Mathematiker, wollte ihn den Handel als Beruf ergreifen lassen, aber da sich schon früh seine wissenschaftliche Begabung zeigte, wurde statt dessen das lukrative Studium der Medizin gewählt. Er begann sein Studium 1581 an der Universität in Pisa und fiel bald durch seine Begabung, aber auch durch sein Diskusstalent und seine Lust zur Kritik an Autoritäten auf, die ihm bei seinen Mitstudenten den Necknamen "Streithammel" einbrachten.

Im folgenden Jahr beobachtete er während eines Gottesdienstes die Schwingungen einer Lampe, die von der Decke des Doms herabhing und stellte fest, daß die Schwingungsdauer trotz abnehmender Auslenkung erhalten blieb. Er setzte diese Erkenntnis bei der Pulsmessung ein, aber im übrigen nahm sein Interesse an der Medizin ständig ab, dafür wuchs das an der Mathematik. Die Teilnahme an einer Euklid-Vorlesung am Hofe des Großherzogs der Toskana beeindruckte ihn stark. Es gelang ihm, den Vater zur Zustimmung zum Wechsel des Studienfaches zu bewegen, aber der Geldmangel zwang ihn 1585 zum Abbruch des Studiums. Die folgenden vier Jahre verbrachte er im elterlichen Hause, beschäftigte sich aber weiterhin intensiv mit der Mathematik und den Naturwissenschaften.

Im Jahre 1589 erhielt er für drei Jahre eine Professur für Mathematik und Astronomie in Pisa. Das Gehalt war sehr gering, konnte aber durch Privatunterricht aufge bessert werden. Im Gegensatz zu seinen Kollegen gab er sich allerdings nicht mit der Interpretation der antiken Autoren zufrieden, sondern stellte auch eigene Untersuchungen an, insbesondere Fallversuche, der Legende nach am schiefen Turm. Er kam zu dem Ergebnis, daß im Gegensatz zur Lehre des Aristoteles alle Körper gleich schnell fallen, wenn man den Luftwiderstand berücksichtigt. Dafür führte er auch ein Gedankenexperiment an: Zwei gleichartige Körper, die locker verbunden sind, müßten nach Aristoteles doppelt so schnell fallen wie bei gelöster Verbindung, ein offensichtlich absurdes Ergebnis.

Um die Fallzeiten zu vergrößern und sie damit leichter meßbar zu machen, ließ er Kugeln geneigte, glattpolierte Rinnen in Buchsbaumholz hinabrollen und stellte fest, daß die Laufzeiten sich wie die Wurzeln aus den zurückgelegten Strecken verhielten. Wenn sich an eine solche absteigende schiefe Ebene wieder eine ansteigende anschloß, so stieg die Kugel, unabhängig von deren Neigung wieder bis zur ursprünglichen Höhe, bei abnehmendem Neigungswinkel legte sie also immer größere Strecken zurück. Er folgerte daraus, daß sie auf einer anschließenden waagerechten Ebene, genauer gesagt einem Großkreis parallel zur Erdoberfläche, bei Vernachlässigung der Reibung mit konstanter Geschwindigkeit bis ins Unendliche laufen würde - eine erste Formulierung des Trägheitsprinzips.

Diese Versuche erschienen seinen Kollegen als unerwünschte, wenn nicht gar gefährliche Neuerungen und waren nicht dazu angetan, seine Beliebtheit zu vergrößern. Nach dem Tode seines Vaters im Jahre 1591 gab er daher seine Professur in Pisa auf und nahm 1592 eine andere, diesmal für sechs Jahre bei wesentlich höherem Gehalt, in Padua an, das zur Republik Venedig gehörte. Seine Vorlesungen betrafen eine Fülle von Gegenständen, von der Astronomie bis zum Festungsbau, und hatten starken Zulauf, deshalb wurde sein Vertrag um zunächst weitere sechs Jahre und schließlich auf Lebenszeit verlängert.

Wie er 1597 in einem Brief an Kepler schreibt, war er schon einige Jahre vorher zu einem Anhänger des kopernikanischen Systems geworden. Seine erste astronomische Entdeckung machte er 1604, als ein neuer Stern im Sternbild Schlangenträger erschien und

er zeigen konnte, daß dieser jenseits der Planetensphären stehen mußte. Berühmt wurde er aber durch seine Entdeckungen mit dem Fernrohr, das 1608 in Holland erfunden worden war. Ohne daß er über genauere Informationen verfügte, gelang es ihm nach einigen Versuchen, ein funktionsfähiges Instrument zu bauen. Er ordnete dazu in einem Tubus eine Konvex- und eine Konkavlinse so an, daß ein aufrechtes vergrößertes Bild entstand (Galilei-Fernrohr) [81]. Damit erreichte er dreißigfache Vergrößerung, allerdings bei gegenüber heutigen Maßstäben sehr geringer Bildqualität.

Galilei war nicht der einzige, vielleicht auch nicht der erste, der das Fernrohr auf den Himmel richtete, aber sicher besaß er die größte geistige Unabhängigkeit und Einsicht in die astronomische Bedeutung. Seine erste Reihe von Entdeckungen veröffentlichte er 1610 im "Sidereus Nuncius" ("Sternenbote"). Sie betrafen hauptsächlich den Mond, auf dem er Täler und Berge erkannte, deren Höhe er aus den Schattenlängen berechnete. Die dunklen Flächen deutete er als Meere, konnte allerdings keine Wolken finden. Die Abweichung von der nach Aristoteles einzig möglichen idealen Kugelform rief sofort Gegner auf den Plan, so delle Colombe, der zwar nicht die Existenz der Täler bestritt, aber behauptete, daß sie mit völlig durchsichtigem Kristall ausgefüllt seien. Galilei antwortete darauf mit der ironischen Gegenbehauptung, daß darüber noch zehnmal so hohe Berge emporragten, allerdings ebenfalls aus Kristall und daher auch nicht beobachtbar.

Mit dem dem Teleskop vervielfachte sich die Anzahl der sichtbaren Sterne, die Milchstraße konnte teilweise in viele Einzelsterne aufgelöst werden. Die überraschendste Entdeckung machte Galilei aber am 7.1.1610, nämlich die der Monde des Jupiter, die er zu Ehren seines Gönners die Mediceischen Sterne nannte. Später setzte sich dafür nach einem Vorschlag von Kepler die Bezeichnung Satelliten durch. Die besondere Bedeutung dieser Entdeckung lag darin, daß sie unwiderlegbar zeigte, daß die Erde nicht der einzige Bewegungsmittelpunkt war und daß der Jupiter mit seinen Satelliten als verkleinertes Sonnensystem im Sinne des Kopernikus betrachtet werden konnte [82]. Das erregte den heftigen Widerstand der Aristoteliker, zum Beispiel von Libri und Cremonini, die "bewiesen", daß diese Objekte gar nicht existieren könnten und sich deshalb weigerten, überhaupt durch das Fernrohr zu sehen.

Die letzte Entdeckung in Padua war die des Saturnrings, den Galilei allerdings wegen des geringen Auflösungsvermögens seines Instruments als zwei Monde zu beiden Seiten des Planeten deutete. Um sich die Priorität zu sichern, gab er die Neuigkeit nach der Sitte seiner Zeit in Form eines Anagramms, eines Buchstabenrätsels, bekannt:

SMAISMRMILMEPOETALEUMIBUNENUGTTAURIAS,

mit dem Kepler sich vergeblich abmühte. Durch Umstellen der Buchstaben entsteht:

ALTISSIMUM PLANETAM TERGEMINUM OBSERVAVI

("Ich habe den höchsten Planeten in dreifacher Gestalt beobachtet"). Im Sommer 1610 nahm er am Hofe des Großherzogs der Toskana in Florenz die Stelle eines Hofastronomen an, die großzügig dotiert und mit keiner Lehrverpflichtung verbunden war. Dort machte er noch im gleichen Jahr eine weitere wichtige Entdeckung, nämlich die der Phasen der Venus. Sie zeigten, daß dieser Planet ein dunkler Körper ist, der von der Sonne beleuchtet wird und insofern der Erde gleicht. Diese Beobachtung widerlegte zwar das ptolemäische System, war aber mit dem tychonischen vereinbar wie alle rein kinematischen Effekte. Zur gleichen Zeit entdeckte er auch die Sonnenflecke, veröffentlichte seinen Fund aber erst 1612. Inzwischen waren sie auch von Johannes Fabricius in Emden und dem Jesuitenpater Christoph Scheiner in Ingolstadt gesehen und 1611 beschrieben worden, wurden allerdings als Vorübergänge kleiner Körper vor der Sonnenscheibe gedeutet. Galilei wies nach, daß sie

sich auf der Sonnenoberfläche selbst befinden mußten und daß die Sonne rotiert, was viele Argumente gegen eine Rotation der Erde widerlegte. Wegen des Streits um die Priorität kam es zu erbitterter Feindschaft zunächst mit Scheiner und dann mit dem Jesuitenorden insgesamt.

Um der wachsenden Feindseligkeit zuvorzukommen, machte Galilei 1611 einen kurzen Besuch in Rom und wurde dort auch sehr ehrenvoll aufgenommen, ließ sich aber auf eine Kontroverse über das Verhältnis von naturwissenschaftlicher Erkenntnis einerseits und der Autorität von Bibel und Kirche andererseits ein, die sich zu dieser Zeit immer weiter herausbildete und letztlich bis in die Neuzeit andauert. Im gleichen Jahr erschien ein Traktat, das die Jupitermonde als "der Heiligen Schrift zuwider" bezeichnete, und 1614 predigte der Dominikaner Caccini gegen Galilei nach dem Text (Apostelgeschichte 1,11): "Viri galilei, quid statis aspicientes in coelum?" ("Ihr Männer von Galiläa, was stehet ihr und sehet gen Himmel?"), wobei er die Mathematik als Erfindung des Teufels darstellte. Im folgenden Jahr erfolgte schließlich eine anonyme Denunziation bei der Inquisition.

Galilei hielt es daher für zweckmäßig, ein zweites Mal nach Rom zu reisen und seine Sache zu verteidigen, aber zu Beginn des Jahres 1616 erschien ein Gutachten der Inquisitionskommission: "daß die die Lehre, daß die Sonne das Zentrum der Welt und unbeweglich ist, falsch und absurd ist, formal ketzerisch und entgegen der Heiligen Schrift, wogegen die Lehre, daß die Erde nicht das Zentrum der Welt sondern bewegt ist und außerdem eine tägliche Bewegung hat, philosophisch falsch und absurd und theologisch zumindest irrig ist." Galilei wurde durch Kardinal Bellarmin aufgefordert, besagte Meinung nur noch als mathematische Hypothese zu vertreten, und 1620 wurde das Werk von Kopernikus "De revolutionibus" neben anderen "bis zur Korrektur" auf den "Index librorum prohibitorum gesetzt".

In den kommenden Jahren war Galilei schon wegen seiner schwachen Gesundheit kaum aktiv und hielt sich zurück, aber als 1618 drei Kometen erschienen, entspann sich ein Streit mit dem Jesuiten Grassi, der sich bald auf das philosophische Gebiet ausdehnte. Galileis abschließender Beitrag war 1623 die Schrift "Il Saggiatore", in dem die kopernikanische Ansicht nur dünn verhüllt vertreten wurde, um dem Edikt von 1616 zu genügen, doch wurde das Werk von Papst Urban VIII, dem es gewidmet war, freundlich aufgenommen. Galilei machte sich daher an seine große astronomische Abhandlung "Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano". Es hat die Form einer viertägigen Diskussion zwischen dem Kopernikaner Salviati, dem Aristoteliker Simplicio und dem gebildeten Laien Sagredo, in der beide Seiten ihre Argumente vorbringen, wobei aber Sagredo meistens dem Salviati zustimmt, während Simplicio keine gute Figur macht. Formal war das Werk zwar antikopernikanisch, aber die wirkliche Meinung des Verfassers war kaum verhüllt. Trotz des Imprimatur in Florenz und Rom gelang es daher den Jesuiten recht bald, den Papst zum Eingreifen zu bewegen, insbesondere da man ihn überzeugte, daß mit dem Simplicio er selbst gemeint sei.

Galilei wurde daher 1633 nach Rom vor das Inquisitionstribunal zitiert unter der Beschuldigung, sich nicht an die Auflage von 1616 gehalten zu haben, wobei wahrscheinlich ein gefälschtes Dokument benutzt wurde. Bei dem Verhör am 21.6.1633 wurde ihm mit der Folter gedroht, wenn er nicht widerriefe: "Et ei dicto quod dicat veritatem, alias devenietur ad torturam." Am folgenden Tag wurde das Urteil verkündet, und er mußte auf den Knien abschwören "der Lehre - falsch und der Heiligen Schrift zuwider - daß die Sonne der Mittelpunkt der Welt ist und daß sie sich nicht von Osten nach Westen bewegt und daß die Erde sich bewegt und nicht der Mittelpunkt der Welt ist; ebenso, daß eine Meinung aufrechterhalten und als wahrscheinlich betrachtet werden kann, nachdem sie als im

Gegensatz zur Heiligen Schrift erklärt worden ist.“ Daß er beim Aufstehen gesagt haben soll “Eppur se muove!” (“Und sie bewegt sich doch!”), ist natürlich eine Fabel.

Das Urteil lautete auf lebenslängliche Gefangenschaft im Kerker, die aber bald in Isolation auf seinem Landgut in Arcetri bei Florenz umgewandelt wurde, sowie Verbot der Beschäftigung mit der Astronomie. Er wandte sich daher wieder physikalischen Untersuchungen zu. Das Ergebnis waren die “Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla mecanica & i movimenti locali” [83]. Im folgenden Jahr starb seine Tochter, eine Nonne, die ihn gepflegt hatte, und er erblindete. Die “Discorsi”, die er seinem Schüler Viviani diktieren hatte, wurden durch den Grafen von Noailles nach Leyden gebracht und dort 1638 gedruckt. Galilei starb am 8.1.1642.

Das Urteil gegen Galilei und das Verbot der heliozentrischen Lehre wurden umgehend in der ganzen katholischen Christenheit verbreitet und auch durchgesetzt, soweit die Macht der Inquisition (“officium sacrum”) reichte.

Dieses Unterdrückungsinstrument der katholischen Kirche, dem die Protestanten nichts Entsprechendes entgegenzusetzen hatten, war durchaus wirksam. Allein in Spanien fielen ihm zwischen ein und zwei Millionen Menschen zum Opfer, die in irgendeiner Weise von der Lehrmeinung der Kirche abwichen (“Ketzer”). Sie wurden in den Folterkernern der Inquisition gefangengehalten und bei besonderen Anlässen im Rahmen eines Autodafe (Massenhinrichtung mit Volksfestcharakter) verbrannt [84]. Diesem Treiben setzten erst die französischen Truppen unter Marschall Soult und General Lasalle ein Ende. Ihre Berichte über die Eroberung der Inquisitionsgefängnisse in Toledo 1808 und Madrid 1809 ähneln sehr denen über die Befreiung der Konzentrationslager der Nationalsozialisten 1945.

In der Folge kam die naturwissenschaftliche Forschung in den katholischen Ländern fast zum Erliegen. Das führte zu einer Rückständigkeit auf wissenschaftlichem und technischem Gebiet, deren Auswirkungen teilweise bis in die Gegenwart spürbar sind. Im Laufe des nächsten Jahrhunderts wurde die Situation für die katholische Kirche unhaltbar. Bezeichnend ist, daß die jesuitischen Missionare in China, wie Adam Schall [84], die ihr Ansehen am Hof in Peking in hohem Maße ihrer Tätigkeit als Astronomen verdankten, dort ab dem Ende des 17. Jahrhunderts das kopernikanische Weltsystem lehrten. Ein offizieller Rückzug war aber nicht mehr möglich. Erst im Jahre 1835 - in Deutschland fuhr die erste Eisenbahn von Nürnberg nach Fürth - wurden in der neuen Ausgabe des Index librorum prohibitorum die Werke von Kopernikus, Kepler, Galilei und Newton nicht mehr aufgeführt - bezeichnenderweise ohne jeden Kommentar.

D. Astronomie der Neuzeit

Das Todesjahr Galileis ist zugleich - zumindest im julianischen Kalender, der zu dieser Zeit in England noch galt - das Geburtsjahr Newtons, und doch gehören diese beiden im Rückblick verschiedenen Zeitaltern an. Das Jahr 1642 bildet für die Astronomie, aber ebenso für die Physik, die Naturwissenschaften insgesamt und darüberhinaus für das Geistesleben allgemein eine Wasserscheide. Natürlich ist die Festlegung auf ein einzelnes Jahr in gewissem Maße willkürlich. Man könnte auch 1633, das Jahr des Inquisitionsprozesses gegen Galilei, oder 1648, das Ende des Dreißigjährigen Krieges, wählen.

Das wesentliche Kennzeichen des neuen Zeitalters ist die zunehmende Säkularisierung des Geisteslebens, also die rasch abnehmende Bedeutung religiöser Sichtweisen, die sich bis heute fortsetzt und auch außereuropäische Kulturen stark beeinflusst. In der Geschichte der Astronomie gab es schon immer Phasen mit starker und schwacher religiöser Bindung, oder anders gesagt, Priester- und Laienastronomie. Im ersten Fall, der bei der ägyptischen und babylonischen Astronomie vorlag, überwiegt das bewahrende Element. Grundsätzlich neue Ideen sind selten, aber dafür ermöglicht eine langdauernde Tradition die sorgfältige Sammlung und Ordnung von Beobachtungen über große Zeiträume. Das ist gerade in der Astronomie von Bedeutung, da die Zeitdauer vieler kosmischer Phänomene so groß ist, daß sie in einem Menschenleben nicht hinreichend untersucht werden können. Im zweiten Fall, der erstmals bei den griechischen Naturphilosophen auftrat, sind Einzelpersonen, nicht eine Hierarchie, tätig. Sie kommen häufig zu höchst individuellen neuen Anschauungen, die aber oft nur unzureichend durch Beobachtungen gestützt werden.

Ideal ist natürlich eine Kombination aus beiden, wie sie im Hellenismus vorlag, wo einerseits staatliche Einrichtungen wie das Museion in Alexandria die erforderlichen Mittel bereitstellten und die Kontinuität sicherten, andererseits die Wissenschaftler frei von ideologischen Einflußnahmen waren. Ähnlich lagen die Verhältnisse auch in der arabisch-islamischen Astronomie, wo trotz der einseitigen religiösen Ausrichtung des Staates die Wissenschaft sich weitgehend frei entwickeln konnte. Hierzu trug wohl auch bei, daß der Islam keine hierarchisch organisierte Kirche mit ihrer Machtfülle kennt.

Im Abendland, wo die christliche Ideologie das geistige Leben absolut beherrschte, gab es bis zur Renaissance eine nennenswerte Wissenschaft weder außerhalb noch in innerhalb der Kirche. Die dann entstehenden Universitäten gingen meist aus Klosterschulen hervor, und ihre Lehrer waren Mitglieder des Klerus - Dominikaner wie Albertus Magnus und Franziskaner wie William von Ockham. Die Astronomie dieser Zeit war daher wieder eine Priesterwissenschaft, die sich bis zum Beginn der Neuzeit ausschließlich mit der antiken Tradition beschäftigte und keinerlei neue Ideen hervorbrachte.

Mit dem Aufstieg des Humanismus kam es dann im 15. Jahrhundert immer stärker zur Kritik an Autoritäten. Auf religiösem Gebiet löste sie schließlich die protestantische Reformation aus, die allerdings an der Autorität der Bibel nur noch entschiedener festhielt und so zu einer fundamentalistischen Wissenschaftsfeindlichkeit kam. Die Glaubensspaltung schwächte aber insgesamt die Macht der Kirche und damit ihre beherrschende Stellung im Geistesleben.

An den Universitäten stellten die Laien bald die Mehrheit der Studenten und einen ständig wachsenden Anteil der Lehrer. Entsprechend wandelte sich die Astronomie in dieser Zeit zu einer Laienastronomie, wenn auch die Beziehungen zur Kirche insbesondere wegen des Kalenderproblems zunächst eng blieben. Nach der gregorianischen Kalenderreform 1582

[86] wurde diese Verbindung allerdings schnell schwächer, und die Entwicklung grundlegend neuer Ideen durch Laien wie Kepler und Galilei führte sehr bald zur unvermeidlichen Konfrontation, die im Inquisitionsprozeß gegen Galilei gipfelte. Die durch die Spaltung und die dadurch ausgelösten inneren Kämpfe, insbesondere den Dreißigjährigen Krieg, bewirkte Schwächung der Kirche hatte allerdings zur Folge, daß die Versuche, die neuen Erkenntnisse zu unterdrücken, erfolglos blieben und die christliche Ideologie sich gezwungen sah, eine Position nach der anderen aufzugeben, zunächst gegenüber der Astronomie, dann gegenüber der Geologie und schließlich der Biologie - ein Prozeß, der bis in unsere Zeit fort dauert ("Kansas is the name of the star").

D1. Von Galilei bis Newton

Zwischen dem Erscheinen der “Discorsi” von Galilei (1638) und dem der “Principia” von Newton (1687) liegen fast fünfzig Jahre, in denen keine grundlegend neue astronomische Entdeckung gemacht wurde. Trotzdem veränderte sich in diesem Zeitraum das Weltbild sehr stark. Zur Widerlegung von Galileis Thesen veröffentlichte der Jesuit J.B.Riccioli 1651 seinen “Almagestum Novum”, in dem er 49 Argumente für und 77 gegen das kopernikanische Weltbild anführte und letztlich als Kompromiß die Annahme des Tychonischen Weltsystems befürwortete [87]. Obwohl dieses Werk in großer Auflage erschien und weit verbreitet war, konnte es doch den Niedergang der ptolemäischen Astronomie nicht aufhalten.

Das aristotelische System, das in vielen Punkten unhaltbar geworden war, wurde an fast allen Universitäten, ausgenommen die jesuitischen Hochschulen in den südlichen Ländern, abgelöst durch das des René Descartes (“Cartesius”, 1596-1650) [88]. Dieser Mathematiker und Philosoph von hohen Graden war ursprünglich ein Anhänger des kopernikanischen Weltbildes gewesen. Als gläubiger Katholik fühlte er sich aber nach dem Inquisitionsprozeß gegen Galilei gezwungen, diesen Standpunkt zumindest formal aufzugeben. Grundlegend war für ihn, im Gegensatz zum Glauben an Autoritäten, der kritische Zweifel. Er glaubte, daß wahre Erkenntnis allein durch logisches Denken gewonnen werden könne und wandte diese Idee auch bei der Konstruktion eines neuen Weltsystems auf mechanistischer Grundlage an.

Nach dieser Theorie ist das gesamte Universum von einer dünnen Flüssigkeit erfüllt, die aus dem Staub besteht, der von den Teilchen bei ihren Zusammenstößen erzeugt wird und in Wirbeln um die Sonne und die anderen Himmelskörper rotiert, aber nicht direkt wahrgenommen werden kann [89]. Diese Wirbel nehmen die Planeten auf ihren Bahnen mit sich, entsprechend erzeugen kleinere Wirbel um die Planeten die Bewegung der Satelliten. Dadurch, daß die Erde sich relativ zur wirbelnden Flüssigkeit in ihrer Umgebung in Ruhe befindet, wie ein Boot, das von der Strömung eines Flusses mitgenommen wird, glaubte Descartes dem kirchlichen Dogma von der unbewegten Erde Genüge tun zu können. Aus seiner mechanistischen Wirbeltheorie leitete er durch reine Deduktion eine Fülle von Phänomenen her. Er entwickelte auf dieser Basis auch eine Theorie des Lichts und der Farben und gab mit Hilfe des Brechungsgesetzes von Snellius eine Erklärung des Regenbogens.

Wie vor ihm Aristoteles und nach ihm die idealistische Naturphilosophie, glaubte er, unmittelbar aus letzten (metaphysikalischen) Gründen die Welt durch bloßes Denken erklären zu können. Sein System war, wie das des Aristoteles, in der Lage, fast alle Erscheinungen zu erklären und somit letztlich nicht falsifizierbar, aber wie dieses auch unfähig, quantitative Vorhersagen, wie etwa die Keplerschen Gesetze, über neue Phänomene zu machen, und wie dieses hat es zur Entwicklung der Naturwissenschaft nichts Bleibendes beigetragen. Es beherrschte trotzdem die Lehre an den philosophischen Fakultäten der Universitäten, zum Beispiel auch der 1665 gegründeten Christiana Albertina zu Kiel, bis in die zweite Hälfte des 18. Jahrhunderts.

Außerhalb der akademischen Welt überwog jedoch zunehmend die Philosophie des Francis Bacon (“Baco of Verulam”, 1561-1627). Er vertrat in seinem Hauptwerk “Novum Organon” von 1620 den entgegengesetzten Standpunkt, daß alle Naturerkenntnis allein aus der Erfahrung folgt und Experiment und Forschung die einzige Basis der Naturwissenschaft bilden. Diese muß dem praktischen Leben dienen und zur Beherrschung der Natur führen: “Wissen ist Macht”.

a) Beobachtungen mit dem Teleskop

Praktische Beobachtungen statt akademischer Diskussionen waren es auch, die dem kopernikanischen System fast unmerklich zum Durchbruch verhelfen, und ihr Werkzeug war das Fernrohr, das seit dieser Zeit unlösbar zum Bild des Astronomen gehört. Ursprünglich war es ein Spielzeug, mehr zufällig kurz nach 1600 von Brillenmachern in den Niederlanden erfunden, das um 1608 herum in ganz Europa bekannt wurde. Galilei konstruierte im gleichen Jahr ein solches Instrument nach dem Hörensagen und machte damit seine sensationellen Entdeckungen am Himmel. Er war damit nicht der einzige und vielleicht nicht einmal der erste, erregte aber die größte Wirkung in der Öffentlichkeit und hatte bald zahlreiche Nachahmer. Kepler erklärte als erster 1611 die Wirkungsweise mit Hilfe eines noch ungenauen Brechungsgesetzes und konstruierte das nach ihm benannte Fernrohr. Er selbst war allerdings nicht in der Lage, ein solches Instrument zu bauen, das geschah erst später durch Fontana und Scheiner.

Während das Galileische Fernrohr aus einer Sammellinse als Objektiv und einer Zerstreuungslinse als Okular besteht und aufrecht stehende Bilder liefert, ist beim Keplerschen Fernrohr auch das Okular eine Sammellinse, die als Lupe zur Betrachtung des primären Bildes in der Brennebene dient. Daß das Bild auf dem Kopf steht, macht das Instrument für den terrestrischen Gebrauch ungeeignet, spielt aber für astronomische Zwecke keine Rolle [90]. Für beide Typen ist die Vergrößerung des Seh winkels gegeben durch das Verhältnis von Objektiv- zu Okularbrennweite, die entscheidenden Vorteile des Keplerschen Teleskops liegen aber einerseits in seinem wesentlich größeren Gesichtsfeld, andererseits in der Tatsache, daß das Zwischenbild in der Brennebene reell ist. Das letztere spielt zwar unmittelbar für die visuelle Beobachtung keine Rolle, ermöglicht aber Messungen, auf die später noch eingegangen werden wird.

Durch geeignete Wahl der Brennweiten sind theoretisch beliebige Vergrößerungen möglich. Es zeigt sich aber, daß die nutzbare Vergrößerung durch Bildfehler stark beschränkt wird. Aus der genaueren Betrachtung des Strahlenganges folgt, daß achsenferne parallele Strahlen sich in einem Brennpunkt schneiden, der näher an der Linse liegt als der für achsennahe Strahlen [91], eine Erscheinung, die als sphärische Aberration bezeichnet wird. Das Bild eines punktförmigen Objekts, etwa eines Sterns, in der Brennebene wird daher nicht wieder ein Punkt, sondern ein kleines Kreisscheibchen sein. Stärkere Vergrößerung läßt nur dessen Durchmesser anwachsen, ohne das Auflösungsvermögen zu verbessern. Die sphärische Aberration läßt sich für achsenparallele Strahlen vermeiden, wenn man als Linsenoberfläche nicht Teile einer Kugel, sondern eines Hyperboloids verwendet (asphärische Linsen), die allerdings sehr viel schwieriger herzustellen sind. Sie haben zusätzlich den Nachteil, daß sie den Fehler für Strahlen, die schräg durch das Objektiv gehen, noch vergrößern.

Als Ausweg bleibt nur die Möglichkeit, das Öffnungsverhältnis von Objektivdurchmesser zu Brennweite zu verkleinern, also abzublenden. Damit aber dabei der für die Helligkeit maßgebliche Durchmesser erhalten bleibt, muß gleichzeitig die Brennweite vergrößert werden. Dieses Verfahren führte in der Folgezeit zu Fernrohren immer größerer Länge. Sie konnten keinen festen Tubus mehr haben, der auch dem Wind zuviel Angriffsfläche geboten hätte, und wurden durch offene Konstruktionen ersetzt [92,93], die allerdings nur sehr schwierig zu handhaben waren. Christiaan Huygens begann zum Beispiel mit einem Instrument von 12 Fuß Länge und einem Objektiv von 5 cm Durchmesser, also einem Öffnungsverhältnis von 1:60. Später benutzte er sogar Fernrohre mit 45, 60 und 120 Fuß Länge.

Das Ziel der fehlerfreien Abbildung wurde aber trotzdem nicht erreicht. Außer der sphärischen gibt es nämlich auch noch eine chromatische Aberration. Sie rührt daher, daß der

Brennpunkt für rotes Licht wegen des kleineren Brechungsindex weiter von der Linse entfernt liegt als der für blaues Licht. Die Folge sind wieder, in diesem Fall farbige, Scheibchen als Bilder. Newton war der Meinung gewesen, daß dieser Fehler grundsätzlich unvermeidbar sei, und hatte deshalb sein Spiegelteleskop konstruiert. Erst sehr viel später gelang Dollond 1757 die Konstruktion achromatischer Objektive aus mehreren Linsen unterschiedlicher Glasarten. Auf ähnliche Weise hatte schon vorher Huygens die Abbildungseigenschaften des Okulars durch Zusammensetzung von zwei plankonvexen Linsen (Huygens-Okular) verbessert.

Trotz der für heutige Begriffe sehr schlechten Bildqualität gelang den Beobachtern in diesen Jahren eine Fülle von Entdeckungen. Huygens fand 1655 mit seinem 12 Fuß-Teleskop einen kleinen Stern, der den Saturn in $16^d 4^h$ umkreist, den Saturnmond Mimas. Er glaubte übrigens, daß keine weiteren Himmelskörper mehr gefunden werden könnten, da jetzt die Zahl 12 erreicht sei - ein Glaube, der sehr bald widerlegt wurde. Im folgenden Jahr erkannte er die Natur des Saturnrings und verschlüsselte seine Entdeckung nach dem Brauch der Zeit in einem Anagramm, dessen Lösung er 1659 im "Systema Saturnium" bekanntgab. Dabei erklärte er auch das zeitweise Verschwinden des Ringes, das Galilei noch alarmiert hatte ("Frißt der Saturn seine Kinder?"), als einen optischen Effekt [94].

Schon vorher hatte Hevel ("Hevelius", 1611-1687) die Berge und Täler auf dem Mond kartiert ("Selenographia", 1647). Er war ein wohlhabender Danziger Brauer und Ratsherr, der einige Jahre in Leyden studiert hatte und sich ein großes Observatorium mit eigener Druckerei einrichtete [95]. Die Topographie des Mondes war zu dieser Zeit besser bekannt als die der Erde, wo von ganzen Kontinenten nur die Küstenlinien vermessen worden waren. Einige der Namen, die Hevelius den Gebirgszügen und Ebenen auf dem Mond gab, wie Apenninen, Alpen oder Mare Serenitatis, haben sich bis heute erhalten, andere wurden durch die Bezeichnungen von Riccioli abgelöst. Mit der Methode von Brahe, also ohne teleskopische Visierhilfen, stellte er einen Katalog von 1500 Sternen zusammen. Sein Hauptinteresse galt allerdings den Kometen, über die er zwei große Werke veröffentlichte, den "Prodromus Cometicus" 1654 und die "Cometographia" 1668.

Einer der erfolgreichsten Beobachter war Domenico Cassini (1625-1712) [96]. Er wurde in Norditalien geboren und verfügte über relativ gutes venezianisches Glas. In den Jahren 1665 und 1666 entdeckte er die Rotation von Jupiter und Mars und veröffentlichte 1668 genaue Tabellen für die Jupitermonde. Auf Veranlassung Picards (1620-1682) lud ihn Ludwig XIV nach Paris ein und übertrug ihm die Leitung des Baus des Observatoriums, der 1671 abgeschlossen wurde. Cassini war Picard an Ideenreichtum unterlegen, aber ein fleißiger Beobachter und verstand sich auf geschickte Öffentlichkeitsarbeit.

Als eine Sonnenfinsternis in Aussicht war, lud der Astronom CASSINI die Stadtväter und Finanzleute, denen er etwas bieten wollte, zur Beobachtung ins Pariser Observatorium ein. Leider kamen die hohen Gäste zu spät. Doch der Bürgermeister tröstete sie, als man die Treppe hinaufstieg: "Das tut nichts, ich kenne Herrn Cassini gut. Er will Geld von uns, da wird er schon so gefällig sein und uns die Angelegenheit noch einmal von vorne vorführen."

In seiner Pariser Zeit entdeckte Cassini vier weitere Monde des Saturn: Japetus 1671, Rhea 1672, Dione und Thetis 1684, sowie 1675 eine dunkle Trennlinie im Saturnring, die später nach ihm die Cassinische Teilung genannt wurde. Die Wiederholung seiner Beobachtung der Jupitermonde mit erhöhter Genauigkeit führte zu einer wesentlichen Entdeckung. Der junge dänische Astronom Ole Rømer (1644-1710), den Picard 1671 von einer Reise zu den Resten von Brahes Uraniborg nach Paris mitgebracht hatte, stellte 1675 fest, daß die Verfinsterung der Monde beim Eintritt in den Schatten des Planeten schneller erfolgten,

wenn Erde und Jupiter sich näherten, langsamer, wenn sie sich entfernten. Er führte das auf eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts zurück und bestimmte die Laufzeit des Lichts von der Sonne zur Erde zu ungefähr 11 Minuten. Nach seiner Rückkehr nach Kopenhagen wurde er Hofastronom von Christian IV, mit dem Tycho Brahe sich seinerzeit entzweit hatte.

Er richtete ein Observatorium auf dem Rundetårn [97] im Zentrum Kopenhagens ein. Da er von dort oben einen umfassenden Blick über die Stadt hatte, betraute ihn sein königlicher Herr zugleich mit dem Amt des Feuerwehrrhauptmanns. Im Turm befinden sich auch einige der von ihm konstruierten kunstvollen Uhrwerke. In seiner Pariser Zeit waren sie als Geschenke Ludwigs XIV an ausländische Potentaten gesandt worden. Eine Remineszenz daran findet sich in Hans Christian Andersens Märchen "Nattergalen".

Für Fixsterne ergeben sich aus Fernrohrbeobachtungen unmittelbar keine neuen Erkenntnisse, denn wegen der riesigen Entfernungen sind ihre Winkeldurchmesser so klein, daß ihre Bilder in der Fokalebene - bei hinreichender Abbildungsqualität - punktförmig bleiben. Informationen über Radien und Oberflächendetails von Sternen - außer natürlich der Sonne - werden auch heute noch auf indirektem Wege erhalten. Die Fernrohrbeobachtung liefert aber trotzdem zwei wesentliche Vorteile. Zunächst wird die Helligkeit des Bildpunktes enorm gesteigert, da an die Stelle des Pupillendurchmessers des Beobachters der des Objektivs tritt. Man kann also sehr viel lichtschwächere Objekte beobachten. Zum andern bewirkt die Vergrößerung des Seh winkels, daß Richtungsunterschiede zwischen zwei Sternen im gleichen Maße vergrößert erscheinen, was die Meßgenauigkeit entsprechend erhöht. Das Fernrohr wirkt dann also als Visierhilfe und wurde in dieser Weise zum Beispiel von Robert Hooke verwendet [98].

Hevelius war in diesem Punkt allerdings anderer Meinung. Er besaß so scharfe Augen, daß er Sterne 7. Größenklasse sehen konnte und in der Lage war, Richtungsunterschiede von 1' zu erkennen. Zur Entscheidung des Streits zwischen ihm und Hooke wurde 1679 Halley nach Danzig geschickt, um an ausgewählten Sternen unter identischen Bedingungen mit Hevelius Vergleichsmessungen durchzuführen. Die Unterschiede betrugen meistens nur einige Bogen Sekunden und erreichten nie eine Bogenminute, die Zukunft gehörte allerdings trotzdem der teleskopischen Beobachtung.

Für die Messung sehr kleiner Richtungsunterschiede bot das astronomische (Keplersche) Fernrohr aber noch einen anderen Vorteil. In seiner Brennebene, in der das reelle Bild entstand, konnte gleichzeitig ein Fadenkreuz aus dünnen Metalldrähten angebracht werden, das die Festlegung der Position erheblich verbesserte. Es wurde 1667 von Picard bei der Messung von Meridiankreisbögen zur Bestimmung des Erdradius verwendet. Schon vorher hatten 1640 William Gascoigne, 1659 Christiaan Huygens und 1667 Adrien Auzout statt dessen einen mit einer Mikrometerschraube verschiebbaren dünnen Metallfaden benutzt (Fadenmikrometer). Auf diese Weise ließen sich sehr genau Abstände von Doppelsternen und Planetendurchmesser bestimmen.

In der gebildeten Öffentlichkeit führten die Fernrohrbeobachtungen, die gleichzeitig zu einer Liebhaberei wurden, allmählich zu einer Änderung des Weltbildes. Die Erde wurde als Planet wahrgenommen, die anderen Himmelskörper, insbesondere der Mond, als andere Erden ("Welten") mit Bergen und Tälern. Über die Möglichkeit des Lebens auf diesen Welten wurde auch in den Salons eifrig diskutiert. Schon Huygens hatte in seinem "Cosmotheoros", der erst 1698, also posthum, veröffentlicht wurde, eine solche Möglichkeit als

wahrscheinlich angesehen. Die größte Popularität besaßen jedoch die “Entretiens sur la pluralité des mondes” von Fontenelle, die 1686 erschienen [99]. In ihnen belehrt der Verfasser die Marquise von G. über das Planetensystem nach kopernikanischer Auffassung und beschäftigt sich auch mit den möglichen Bewohnern der Planeten, ist aber so vorsichtig, sie nicht als Menschen zu bezeichnen, um nicht in Konflikt mit den Anschauungen der Kirche (Adam und Eva, Sündenfall usw.) zu geraten.

Um 1700 war der Kampf um das Weltsystem grundsätzlich entschieden, obwohl es, insbesondere für die Erdbewegung, noch keine direkten Beweise gab. Für die Astronomen bestand das wesentliche Argument in der Übereinstimmung der Beobachtungen mit der Newtonschen Theorie bei sehr hoher Genauigkeit. Die weitgehende Annahme des kopernikanischen Weltsystems war allerdings nicht immer gleichbedeutend mit der Übernahme der Theorien Newtons. Schon Cavalieri 1632 und Torricelli 1644 hatten das Trägheitsprinzip diskutiert, Pierre Gassend (“Gassendi”) führte dafür sogar schon das Beispiel eines Reiters an, der einen Ball senkrecht in die Luft wirft und im Weiterreiten wieder auffängt - ein Experiment, das in leicht abgewandelter Form auch heute noch zum Standardrepertoire der Anfängervorlesung in Physik gehört - und Borelli hatte 1665 ausführlich Zentralkräfte betrachtet. Noch 1669 aber erklärte Huygens die Gravitation mit Hilfe der Wirbeltheorie von Descartes, indem er davon ausging, daß die mit der Geschwindigkeit v die Erde auf Kreisen umlaufende Materie des Wirbels auf Körper an der Oberfläche eine Zentralbeschleunigung ausübt, die gleich der von Galilei gemessenen Schwerebeschleunigung ist:

$$\frac{v^2}{r} = g .$$

Daraus kann man dann auf die Wirbelgeschwindigkeit v schließen, die allerdings auf keine Weise meßbar ist.

b) Ausbreitung der Wissenschaft

Die Beobachtungen mit dem Fernrohr waren aber nicht die einzigen praktischen Untersuchungen, die in dieser Zeit angestellt wurden. Eine große Zahl von Wissenschaftlern, genauer gesagt Wissenschaftsliebhabern, untersuchte eine Fülle von Erscheinungen vom Magnetismus, wie William Gilbert, der Leibarzt der Königin Elizabeth I. von England, bis zum Luftdruck, wie Torricelli und Otto von Guericke. Zugleich wurde, insbesondere von Gassendi, die Lehre des Atomismus nach Demokrit neu belebt und beeinflusste auch Newton. Es ist aber zu bemerken, daß diese Beiträge fast ausschließlich aus England, Frankreich und den Niederlanden kamen. Durch den Dreißigjährigen Krieg war Deutschland weitgehend zerstört und von seinen Nachbarn ausgeplündert (Pannekoek). In Italien, besonders stark im Kirchenstaat, etwas weniger in Norditalien, machte sich die Unterdrückung jeder geistigen Regung durch die katholische Kirche bemerkbar und führte zur Stagnation.

Frankreich war zwar auch ein katholisches Land, aber der absolute Monarch Ludwig XIV wußte seine Unabhängigkeit vom Vatikan zu bewahren. Wirtschaftliche Beweggründe (Merkantilismus) waren unter Umständen wichtiger als religiöse, und der Astronom Adrien Auzout konnte es wagen, die Lehre des Kopernikus entgegen dem Urteil des Inquisitionsgerichts als weder absurd, noch theologisch falsch zu bezeichnen.

Schon seit der Renaissance und zunehmend seit dem Dreißigjährigen Krieg hatte in der Gesellschaft die Wertschätzung der Praxis gegenüber der Theorie zugenommen. Begonnen hatte diese Entwicklung im Hochmittelalter einerseits mit der Ausbreitung der Klöster. Im Gegensatz zu den ersten Jahrhunderten des Christentums und zu anderen Religionen (Buddhismus) waren die Mönche keine Einsiedler oder Säulenheiligen (Pfahlsitzer) und

zogen auch nicht bettelnd als Sozialparasiten durch das Land, sondern widmeten einen großen Teil ihrer Zeit praktischer Arbeit ("Ora et labora!"). Sie trugen damit wesentlich zu technischen Verbesserungen und einer höheren Kulturstufe bei. Andererseits kam es in den neu entstehenden Städten zur Arbeitsteilung und zum Aufstieg der Handwerker, die eine relativ große Freiheit besaßen ("Stadtluft macht frei") und sogar an der Regierung des Gemeinwesens beteiligt waren. Auf die Dauer wurde so das primitive feudalistische System der Ritter, deren Hauptbeschäftigung Fehde und Jagd waren, und ihrer Leibeigenen zurückgedrängt. Dazu trug auch der Kontakt mit der islamischen Welt bei, in deren großen Städten handwerkliche Kunst und technisches Wissen viel weiter entwickelt waren als im Abendland.

Einen ersten Höhepunkt erreichte diese Entwicklung in der Renaissance, in der ja viele Traditionen der hellenistischen Kultur wieder belebt wurden und das Bürgertum gegenüber Adel und Klerus eine wachsende Bedeutung erlangte. Damit ging seit dem 16. Jahrhundert einher eine zunehmende Geringschätzung der an den Universitäten betriebenen Buchgelehrsamkeit, die nur zu oft auf scholastisches Geschwätz hinauslief. Der Fortschritt vollzog sich daher außerhalb der Hochschulen und wurde getragen von einzelnen Bürgern, für die, wie bei den Handwerkern, die Frage nach dem Nutzen der Tätigkeit für die Gesellschaft im Vordergrund stand. Sie hatten großes Interesse an technischen Prozessen, was zu einer mechanistischen Auffassung der Natur beitrug. Die große Zahl dieser Wissenschaftler und ihrer Beiträge täuscht allerdings ein wenig. Auch im vorangehenden Jahrhundert hatte es neben Kopernikus, Brahe und Kepler viele Gelehrte gegeben, deren Beiträge sich aber auf fruchtloses Theoretisieren beschränkten und die daher heute weitgehend unbekannt sind.

Diese an Zahl schnell zunehmenden Wissenschaftler schlossen sich außerhalb der Universitäten zu wissenschaftlichen Gesellschaften, den Akademien, zum Erfahrungsaustausch zusammen. Als erste entstand in England 1645 ein Vorläufer der Royal Society. Da zu dieser Zeit das Land von wissenschaftsfeindlichen fundamentalistischen Protestanten (Cromwell) beherrscht wurde, fanden ihre Zusammenkünfte zunächst geheim statt. Die offizielle Gründung erfolgte 1662, erster Vorsitzender ("Sekretär") wurde der aus Bremen stammende Oldenburg. Ab 1666 gab die Gesellschaft die "Philosophical Transactions of the Royal Society" heraus, die bis auf den heutigen Tag erscheinen. Die Treffen dienten dem Austausch von Erfahrungen, es fanden aber auch praktische Vorführungen statt. Für diese war zuständig Robert Hooke (1635-1703), ein universell begabter, aber auch sehr ehrgeiziger Mann ("the universal claimant"), der später häufig mit Newton in Streit geriet. In seinem Tagebuch fand sich das Ziel der Gesellschaft:

"To improve the Knowledge of natural things and all useful Arts, Manufactures, Mechanick practices, Engynes and Inventions by experiments (not Meddling with Divinity, Metaphysics, Moralls, Politicks, Grammar, Rhetorick or Logick)."

Während es spätestens mit dem Inquisitionsprozeß gegen Galilei zu einer Trennung von Wissenschaft und Kirche gekommen war, begann jetzt auch eine getrennte Entwicklung von Natur- und Geisteswissenschaften, die zur Entstehung der "zwei Kulturen" im Sinne des Wissenschaftshistorikers C.P.Snow, also einer geisteswissenschaftlich-literarischen und einer naturwissenschaftlich-technischen, führte, die für unsere heutige Gesellschaft kennzeichnend ist.

Parallel zur Royal Society in England entstand in Frankreich die Academie des Sciences, zu deren Mitgliedern Auzout, Picard, Cassini und Römer gehörten. In Florenz war schon

1657 die Academia del Cimento gegründet worden. Sie erregte bald den Unwillen des Vatikans - es wurden sogar Experimente gemacht! - und wurde deshalb 1667 geschlossen. Das französische Muster wurde in vielen der deutschen Kleinstaaten nachgeahmt, so zum Beispiel in Preußen mit der Berliner Akademie der Wissenschaften, deren erster Präsident Leibniz war. In einem Punkt bestand aber zwischen England und Frankreich ein wesentlicher Unterschied: Im absolutistischen Frankreich war die Akademie eine staatliche Einrichtung, die Mitglieder wurden vom König ernannt und erhielten "Pensionen". Zur Erhöhung des monarchischen Glanzes wurden auch ausländische Mitglieder ernannt und besoldet. Die Royal Society dagegen war ein Zusammenschluß von Privatleuten, die die erforderlichen Mittel selbst aufbrachten, und völlig unabhängig von der Regierung.

D2. Isaac Newton

Nature and Nature's Laws lay hid in Night.
God said: *Let Newton be!* and All was *Light*.
(Alexander Pope)

Isaac Newton wurde am 4.1.1643 (nach dem damals in England noch gültigen julianischen Kalender also am 25.12.1642) in Woolthorpe in Lincolnshire zu Beginn des "Civil War" geboren. Sein Vater war schon vor seiner Geburt gestorben, und seine Mutter mußte den Freibauernhof allein bewirtschaften. Er war ein schwächliches Kind, entwickelte früh handwerkliches Geschick und Neigung zum Lesen, zeigte sich aber völlig unfähig zur Übernahme des elterlichen Anwesens ("zu dumm zum Schafehüten"). Auf Anraten seines Lehrers ließ ihn seine Mutter daher ein Studium aufnehmen [100].

Im Juni 1661 trat er in das Trinity College in Cambridge ein. Zunächst lag er hinter seinen jüngeren Mitstudenten zurück, machte aber bald große Fortschritte, besonders in der Mathematik, so daß er die Elemente des Euklid als "trivial" abtat. Anfang 1665 wurde er Bachelor of Arts, im gleichen Jahr brach aber in Cambridge die Pest aus, die Universität wurde für zwei Jahre geschlossen, und Newton kehrte nach Woolthorpe zurück. Die Pestjahre 1665-66 waren die wissenschaftlich fruchtbarste Zeit seines Lebens, wie er selbst schreibt:

"Denn in diesen Tagen war ich in meinem besten Alter für Entdeckungen und kümmerte mich mehr um Mathematik und Philosophie als zu irgendeiner Zeit danach."

In der Mathematik legte er in dieser Zeit die Grundlagen für die Differential- und Integralrechnung sowie für die Reihenentwicklung, in der Optik entdeckte er die Dispersion des Lichts. Durch ein Loch im Fensterladen eines abgedunkelten Raumes ließ er Sonnenlicht durch ein Prisma fallen und beobachtete auf der gegenüberliegenden Wand ein geisterhaftes Farbenband, das er das "spectrum", also das "Gespenst", des Lichts nannte [101]. Dieses Wort bezeichnet seitdem in allen Kultursprachen eine bunte Vielfalt und hat seine ursprüngliche Bedeutung völlig verloren, wurde aber noch von Goethe in der wörtlichen Übersetzung verwendet. Als erster erkannte Newton, daß das weiße Licht, völlig entgegen dem unmittelbaren Gefühl, nicht etwas Einfaches, sondern aus einer Fülle farbiger Lichter zusammengesetzt ist, die sich beim Durchgang durch das Prisma wegen ihrer unterschiedlichen Brechungsindizes ("differentielle Refrangibilität") trennen. Er überprüfte diese Theorie, indem er zeigte, daß einerseits beim Ausblenden einer bestimmten Farbe eine weitere Brechung keine Änderung mehr bewirkt und andererseits die getrennten Farben bei Wiedervereinigung, zum Beispiel durch eine Sammellinse, ein, wenn auch unvollkommenes ("schmutziges"), Weiß ergeben. Noch hundert Jahre später konnte Goethe sich mit dieser Entdeckung nicht abfinden und versuchte, allerdings vergeblich, sie in seiner Farbenlehre zu widerlegen.

Von noch größerer Bedeutung aber war seine Entdeckung der Gravitation. Nach einer Anekdote, die er selbst in höherem Alter gern erzählte, die aber kaum den Tatsachen entsprechen dürfte, kam ihm, als er im Garten liegend einen fallenden Apfel betrachtete und gleichzeitig über sich den Mond sah, die Erkenntnis, daß die Bewegung beider Körper die gleiche Ursache hat, nämlich eine Anziehung durch die Erde [102]. Durch Vergleich der Beschleunigungen kam er zu dem Ergebnis, daß die Kraftwirkung mit dem Quadrat des

Abstandes von der Erde abnimmt. Dieses Resultat verallgemeinerte er dann und folgerte, daß zwischen allen Körpern eine Anziehung besteht, die allgemeine Gravitation, die den Massen direkt und dem Quadrat ihres Abstandes umgekehrt proportional ist.

Für die Kreisbahn des Mondes ist, wie schon vorher Huygens gezeigt hatte, eine Zentripetalbeschleunigung der Größe v^2/r erforderlich. Dabei ist r der Abstand des Mondes und v seine Geschwindigkeit. Die letztere ergibt sich daraus, daß der Umfang $2\pi r$ der Kreisbahn in einem (siderischen) Monat, also in $T = 27.32$ Tagen durchlaufen wird, daher ist:

$$v^2/r = 4\pi^2 r/T^2 = 0.00272 \text{ m/s}^2 .$$

Andererseits beträgt die Fallbeschleunigung des Apfels, wie schon Galilei festgestellt hatte, 9.81 m/s^2 . Das Verhältnis beider ist also $(60.0)^2$, während sich für das Verhältnis von Mondentfernung und Erdradius 60.3 ergibt.

Die Analogie zwischen der Bewegung des Mondes um die Erde und der eines fallenden Apfels führte Newton später in einem Gedankenexperiment noch weiter [103]. Wird von einem hohen Berg ein Geschöß horizontal abgefeuert, so fällt es bei geringer Geschwindigkeit fast senkrecht unter dem Abschußort auf die Erde zurück. Mit wachsender Geschwindigkeit entfernt sich der Aufschlagspunkt auf die Erdoberfläche immer weiter, und bei einer bestimmten Geschwindigkeit fällt das Geschöß in einer Kreisbahn um die Erde herum.

Der von Newton benutzte Zahlenwert für den Erdradius war allerdings ungenau und hatte eine Abweichung von etwa 10% zur Folge. Deshalb führte er seine Untersuchungen zunächst nicht weiter, da er die Kritik insbesondere von Robert Hooke fürchtete, der ebenfalls ein solches Abstandsgesetz gefunden hatte und die Priorität beanspruchte. Zu diesem Zeitpunkt waren allerdings von Snellius und Picard schon genauere Werte gemessen worden, die Newton aber nicht kannte, da sie erst 1671 veröffentlicht wurden.

Nach seiner Rückkehr nach Cambridge wurde Newton 1667 Fellow und 1668 Master of Arts. Im folgenden Jahr überließ ihm sein Lehrer Isaac Barrow die eigene Professur für Mathematik, den noch heute existierenden "Lucasian chair". 1672 wurde Newton Fellow of the Royal Society, nachdem er dort sein Spiegelteleskop [104] präsentiert hatte. Zu dessen Konstruktion kam er, weil er der irrigen Ansicht war, daß Brechungsindex und Dispersionsvermögen für alle Substanzen im gleichen Verhältnis ständen und deshalb eine Korrektur der chromatischen Aberration von Linsen nicht möglich sei. An den Sitzungen der Gesellschaft nahm er allerdings nur selten teil und verbrachte seine Zeit bis 1687 fast ausschließlich in Cambridge, wobei sich sein Interesse von der Dynamik mehr zur Mathematik und Alchemie verlagerte.

In der Royal Society wurde in diesen Jahren, insbesondere von Robert Hooke, Edmund Halley und Sir Christopher Wren (Architekt von St.Paul's Cathedral), intensiv über das den Planetenbahnen zugrundeliegende Kraftgesetz diskutiert. Man war seit 1674 in der Lage, mit Hilfe der Formel von Huygens für die Zentrifugalkraft zu beweisen, daß aus dem dritten Keplerschen Gesetz eine Abhängigkeit der Zentralkraft proportional zu $1/r^2$ folgt, allerdings nur für den Sonderfall einer Kreisbahn. Wren setzte deshalb 1684 einen Preis von von 40 Schilling aus für den Nachweis, daß das auch für den allgemeinen Fall der Kepler-Ellipse gilt. Bei einem Besuch Halleys in Cambridge stellte sich heraus, daß Newton die Lösung dieses Problems schon 1679 gefunden, aber nicht bekanntgemacht hatte.

Es blieb noch die sehr viel schwierigere Aufgabe, umgekehrt aus diesem Abstandsgesetz als notwendige Bahn die Kepler-Ellipse mit ihrem Sonderfall des gleichförmig durchlaufenen Kreises herzuleiten. Halley reiste 1684 ein zweites Mal zu Newton, der angeblich

sein Manuskript verlegt hatte, und bedrängte ihn, seine Ergebnisse zu rekonstruieren und zu veröffentlichen. Zu diesem Zeitpunkt lag der wesentliche Teil der Theorie fertig vor. Die letzte Schwierigkeit bestand in dem Nachweis, daß eine kugelsymmetrische Massenverteilung wie die Erde auf andere Körper so wirkt, als ob ihre gesamte Masse in ihrem Mittelpunkt vereinigt wäre. Die dafür nötige Entwicklung von Berechnungsmethoden für mehrdimensionale Integrale war erst 1685 abgeschlossen. Die engültige Fertigstellung erforderte ein weiteres Jahr höchster geistiger Anstrengung, in dem Newton so häufig auf Essen und Schlaf verzichtete, daß er ernste Gesundheitsschäden davontrug, aber 1686 konnte er vor der Royal Society den ersten Teil als “Propositiones de Motu” vortragen. Dem unermüdlichen Drängen Halleys und seinem Versprechen, die Druckkosten aus eigener Tasche zu bezahlen, ist es zu verdanken, daß 1687 die “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica”, wenn auch in kleiner Auflage, in Cambridge erschienen [105].

Das Werk besteht aus drei Büchern. Im ersten werden, ohne speziellen Bezug zur Astronomie, die Grundlagen der Dynamik gelegt, im zweiten wird die Bewegung von Körpern im widerstehenden Medium, insbesondere in Flüssigkeiten, betrachtet und die Wirbeltheorie von Descartes als unhaltbar nachgewiesen. Das dritte Buch mit dem Titel “The System of the World” sollte ursprünglich eine populäre Darstellung der astronomischen Folgerungen enthalten, um auch mathematischen Laien einen Zugang zu ermöglichen, aber da Newton eine fruchtlose Diskussion mit inkompetenten Kritikern befürchtete, zog er es vor, den Gegenstand, wie in der Geometrie des Euklid, in der Form von Axiomen und Theoremen (“more geometrico”) zu behandeln, um den Leserkreis auf Personen mit der nötigen mathematischen Vorbildung zu beschränken.

In diesem letzten Teil weist Newton nach, daß als Folge des Gravitationsgesetzes die Himmelskörper sich umeinander auf Kegelschnitten bewegen, so daß neben den Kepler-Ellipsen auch Parabeln und Hyperbeln möglich sind. Die Anwendung auf den Kometen von 1680 zeigte, daß dessen Bahn eine Parabel oder eine sehr langgestreckte Ellipse sein muß. Mit Hilfe des dritten Keplerschen Gesetzes bestimmt Newton aus den Umläufen der Satelliten (Monde) um die Planeten und ebenso der Planeten um die Sonne deren relative Massen, zum Beispiel Sonne/Jupiter = 1067 (1047), Sonne/Saturn = 3021 (3530), Sonne/Erde = 170000 (324000). In Klammern sind die modernen Werte angegeben, das Ergebnis für die Erde ist besonders ungenau, weil zu dieser Zeit die Entfernung der Sonne (die Sonnenparallaxe) noch nicht mit hinreichender Genauigkeit bekannt war. Die Masse des Erdmondes läßt sich auf diese Weise nicht ermitteln. Newton bestimmt sie aus der Tatsache, daß bei zwei Himmelskörpern nicht der eine den anderen, sondern beide den gemeinsamen Schwerpunkt umlaufen. Das gilt natürlich auch für die Sonne im Verhältnis zu den Planeten, so daß auch sie eine, wenn auch wegen ihrer riesigen Masse sehr kleine, Bewegung ausführt. Daß diese Tatsache nicht von den Antikopernikanern als Argument gegen das heliozentrische Weltbild benutzt wurde, hat eine einfache Ursache: Wer in der Lage war, die Newtonsche Theorie zu verstehen, war ohnehin Kopernikaner.

Die Rotation der Erde um ihre Achse führt dazu, daß auf jeden ihrer Massenpunkte neben der Gravitation auch die Zentrifugalkraft wirkt. Der Erdkörper wird daher eine solche Form annehmen, daß die Gesamtkraft auf seiner Oberfläche senkrecht steht, er wird also abgeplattet sein. Newton berechnet als Abplattungsverhältnis 1:230, der exakte Wert, in den auch die Massenverteilung im Erdinnern eingeht, ist 1:298. Mit der Abplattung im Zusammenhang steht auch die Präzession der Äquinoktien. Die Erde stellt einen rotierenden symmetrischen Kreisel dar, dessen Achse schief zur Senkrechten auf ihrer Bahn, der Ekliptik, steht. Die Sonne übt daher durch ihre Anziehung auf den Äquatorwulst ein Drehmoment aus, das die Kreiselachse aufzurichten sucht und dazu führt, daß diese um die Vertikale auf einem Kegel umläuft (“reguläre Präzession des schweren Kreisels”).

Newton gibt eine näherungsweise Theorie dieses recht komplizierten Vorgangs, daß sein Zahlenwert von 50" pro Jahr mit der Beobachtung übereinstimmt, ist angesichts der sehr ungenau bekannten Sonnenentfernung wohl eher zufällig.

Newton gelang als erstem eine befriedigende Erklärung der Gezeiten. Erde und Mond bewegen sich im Laufe eines (siderischen) Monats um ihren gemeinsamen Schwerpunkt, der allerdings wegen der sehr unterschiedlichen Massen noch im Innern der Erde liegt. Während sich für den Mittelpunkt der Erdkugel die Anziehungskraft des Mondes und die Zentrifugalkraft wegen der Rotation um den Schwerpunkt aufheben, überwiegt auf der dem Mond zugewandten Seite die Gravitation, auf der abgewandten Seite ist es umgekehrt [106]. Es bilden sich deshalb auf beiden Seiten Flutberge aus, unter denen sich die Erde wendet. Sie laufen daher scheinbar mit dem Mond um die Erde um. Die entsprechenden Flutberge auf dem Mond haben schon vor langer Zeit dazu geführt, daß er der Erde stets dieselbe Seite zukehrt. Außer dem Mond übt auch die Sonne Gezeitenkräfte auf den Mond aus. Dadurch entstehen, je nach Zusammenwirken, Spring- und Nippfluten.

Während das Zweikörperproblem, also die Bewegung von zwei Himmelskörpern unter dem Einfluß ihrer wechselseitigen Massenanziehung um den gemeinsamen Schwerpunkt, exakt lösbar ist und auf die Keplerschen Gesetze führt, gilt das für das Dreikörperproblem nicht. Wenn zwei Planeten zugleich die Sonne umlaufen, wirkt auf jeden von ihnen außer der Anziehungskraft der Sonne auch die des anderen. Diese ist aber gegenüber der der Sonne so klein, daß sie als Störung betrachtet werden kann und in erster Näherung dazu führt, daß sich die Bahnellipse, genauer gesagt ihre Apsidenlinie, im Laufe der Zeit langsam dreht. Diese Erscheinung war schon vorher an der Bahn des Saturn beobachtet worden und fand jetzt ihre Erklärung durch die Einwirkung des massereichen Nachbarn Jupiter. Auch die Regression der Mondknoten, also die Drehung der Knotenlinie, konnte Newton als Störung durch die Sonne erklären.

Die Berechnung des Verhaltens eines Systems von $N \geq 3$ Körpern für sehr große Zeiträume ist auch heute noch ein schwieriges Problem. Dabei können chaotische Effekte und Instabilitäten auftreten. Newton konnte darüber nur Vermutungen anstellen und glaubte, daß das Planetensystem schon nach wenigen Jahrtausenden in Unordnung geraten würde, wenn nicht Gott eingreifen und das himmlische Uhrwerk wieder aufziehen würde. Das trug ihm heftige Kritik von Leibniz ein, der sich Gott nicht als einen so unfähigen Uhrmacher vorstellen mochte. Die beiden führten gleichzeitig einen erbitterten Streit um die Priorität bei der Entwicklung der Infinitesimalrechnung, der die Mathematiker auf dem Kontinent und in England lange Zeit in zwei Lager spaltete und in dem Newton selbst eine unrühmliche Rolle spielte. Er hatte unter anderem zur Folge, daß die Engländer an der unzureichenden Formulierung Newtons festhielten und deshalb wenig zur Weiterentwicklung beitrugen.

Das wesentliche Ergebnis der "Principia" ist, daß in der neuen Mechanik mit der Gravitation als alleiniger Ursache sich nicht nur die Keplerschen Gesetze und das heliozentrische System streng begründen lassen, sondern daß eine Fülle weiterer Erscheinungen ohne Zusatzannahmen folgt.

Die "Principia" begründeten in England Newtons Ruhm und machten ihn schlagartig zu einer Person des öffentlichen Interesses. Die Reaktion auf das Werk war auch bei Nicht-Physikern wie John Locke und Lord Halifax sehr positiv. Bald nach der Fertigstellung brach 1693 bei Newton eine schwere Gemütskrankheit aus, wahrscheinlich verursacht durch fortgesetzte Überarbeitung, vielleicht aber auch die Folge einer Quecksilbervergiftung bei seinen alchemistischen Experimenten. Nach seiner Erholung gab er sein zurückgezogenes Gelehrtenleben an der Universität Cambridge auf und übernahm öffentliche Ämter. Er wurde 1696 "Warden of the Mint", 1699 sogar "Master of the Mint", ab 1701 Vertreter der

Universität Cambridge im Parlament und 1703 Präsident der Royal Society [107]. In den Parlamentsprotokollen findet sich allerdings nur ein Antrag des Abgeordneten Newton, nämlich der, ein bestimmtes Fenster zu schließen, weil es zöge. Seine Aufgabe als Münzdirektor war es in erster Linie, die durch betrügerische Manipulationen [108] geschädigte Währung zu sanieren, wozu auch die Strafverfolgung der Münzfälscher gehörte, die er mit unerbittlicher Strenge durchführte. Er erwies sich dabei als ebenso genialer Organisator wie Wissenschaftler. 1705 wurde er in den Adelsstand erhoben.

Seine wissenschaftliche Arbeit setzte er zwar fort, konzentrierte sich aber im wesentlichen auf die Optik und publizierte 1704 sein Werk "Opticks", zum Teil auch veranlaßt durch den Tod 1703 seines ständigen Widersachers Robert Hooke. Er fand keine Zeit für eine Neuauflage der "Principia" und überließ diese Aufgabe seinem Schüler Roger Cotes, den er sehr schätzte und bei dessen Tod 1716 er sagte: "If Mr. Cotes had lived we might have known something".

Einen erheblichen Teil seiner Zeit widmete er in diesen Jahren auch der Theologie, insbesondere der biblischen Chronologie. In einem Brief an den Theologen und Philosophen Bentley versuchte er einen Gottesbeweis zu führen, indem er von der Tatsache ausging, daß alle großen Körper des Sonnensystems sich in fast der gleichen Ebene im gleichen Drehsinn auf fast vollkommenen Kreisen um die Sonne bewegen. Diese Anordnung, meinte er, könne nicht zufällig entstanden sein, und schloß auf die Notwendigkeit eines genialen Konstrukteurs. Dieses Argument wurde durch die Nebularhypothese von Kant und Laplace widerlegt, taucht aber bis in unsere Zeit regelmäßig bei noch unerklärten Zusammenhängen als "intelligent design" oder "anthropozentrisches Prinzip" wieder auf. Danach kann die Welt nicht zufällig, sondern nur als geplante Schöpfung entstanden sein, die von Anfang an den Menschen als Endzweck hatte - wie der Kreationismus ein als Wissenschaft verkleideter religiöser Glaube.

Als Newton am 3.3.1727 starb und in Westminster Abbey beigesetzt wurde, war er für seine Landsleute ein beinahe übermenschlicher Genius geworden. Schon zu seinen Lebzeiten hatte sein erbitterter Gegner Leibniz gesagt: "Nimmt man die Mathematik vom Anfang der Welt bis auf die Zeit als Newton lebte, so war das, was er getan hat, die größere Hälfte." Noch emphatischer war der Nachruf von Lagrange: "Newton war das größte Genie, das es je gegeben hat, und auch das glücklichste, denn es gibt nicht mehr als ein Weltsystem zu entdecken". Newton sah seine Rolle sehr viel bescheidener:

"Ich weiß nicht, wie ich der Welt erscheinen mag, aber mir selbst kommt es vor, als wäre ich wie ein Knabe gewesen, der am Ufer des Meeres spielt und sich damit ergötzt, dann und wann einen glatteren Kiesel oder ein hübschere Muschel als gewöhnlich zu finden, während der große Ozean der Wahrheit noch ganz unentdeckt vor mir lag."

Die Newtonsche Dynamik

Die überragende Leistung Newtons, ist die Grundlegung der modernen Naturwissenschaft, insbesondere der Physik einschließlich der Astronomie, durch eine revolutionäre Änderung des Konzepts im Vergleich zur herrschenden aristotelischen Naturphilosophie. Sie bildet den wesentlichen Teil des ersten Buches der "Principia".

Newton beginnt mit einer Diskussion der Begriffe von Raum und Zeit. Für ihn ist der Raum absolut, unbegrenzt, unendlich ausgedehnt und leer. Er ist homogen - kein Punkt ist vor den anderen ausgezeichnet - und isotrop - keine Richtung ist vor den anderen ausgezeichnet. Den Punkten des Raumes lassen sich durch Wahl eine Koordinatensystems

Zahlentripel (Länge, Breite, Höhe) zuordnen, aber diese Wahl ist willkürlich. Der Raum wird also in Beziehung gesetzt zu einem mathematischen Modell, nämlich einem affinen linearen Vektorraum. Diese Mathematisierung, auf die ja schon der Titel “Philosophiae naturalis principia mathematica” hinweist, ist ein wesentliches Kennzeichen nicht nur der Physik, sondern zunehmend der gesamten modernen Naturwissenschaft und macht mathematischen Laien den Zugang häufig schwer, manchmal sogar unmöglich. Sie war aber nicht völlig neu. Schon über dem Portal der Platonischen Akademie hieß es: “Kein der Mathematik Unkundiger durchschreite dieses Tor!”, und von Galilei stammt die Erkenntnis: “Das Buch der Natur ist in der Sprache der Mathematik geschrieben”. Neben den absoluten Raum, aber von ihm völlig unabhängig, tritt bei Newton die absolute Zeit. Sie ist ebenfalls homogen - kein Zeitpunkt ist vor den anderen ausgezeichnet (“Was du heute kannst besorgen, kannst du auch verschieben auf morgen”). Beide sind meßbar, der Raum mit Maßstäben, die Zeit mit Uhren.

Im absoluten Raum und der absoluten Zeit bewegen sich die Körper, ganz im Sinne des Atomismus, der zu dieser Zeit, insbesondere durch Gassendi, wieder aufgenommen wurde. Das Wort “Körper” bezeichnet bei Newton das, was wir heute einen Massenpunkt nennen, nämlich ein Objekt, dessen Abmessungen klein sind gegenüber seinen Abständen zu anderen Objekten. Man kann ihm deshalb in guter Näherung einen bestimmten Ort und damit einen Ortsvektor \mathbf{r} zuordnen, der sich bei der Bewegung des Körpers ändert: $\mathbf{r}(t)$. Ausgedehnte Körper lassen sich dann aus solchen Massenpunkten zusammensetzen.

Im Gegensatz zur aristotelischen Physik hat ein Körper keinen “inneren Bewegter”, also kein Bestreben, etwa seinen “natürlichen Ort” anzunehmen. Er agiert nicht, sondern reagiert nur auf Einwirkungen von außen, ist “träge”. Fehlt eine solche Einwirkung, wird auf ihn also keine “Kraft” von außen ausgeübt, so gehorcht er dem Trägheitsprinzip (Abb.xx):

Lex I: “Jeder Körper beharrt in seinem Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.”

Das Ungewöhnliche und dem natürlichen Gefühl Zuwiderlaufende ist, daß der Zustand der geradlinig-gleichförmigen Bewegung dem der Ruhe völlig gleichwertig ist und keines Bewegers (“motor”) bedarf. Falls aber von außen eine Kraft auf den Körper einwirkt, gilt das Bewegungsgesetz:

Lex II: “Die Änderung der Bewegung ist der einwirkenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt.”

Mit der “Änderung der Bewegung” ist im wesentlichen die Änderung der Geschwindigkeit gemeint. Eine Einwirkung auf den Körper führt also nicht unmittelbar, wie man vermuten könnte, zu einer Änderung seines Ortes, sondern zunächst nur zur Änderung seiner Geschwindigkeit. Damit entsteht aber das mathematische Problem, wie eine veränderliche Geschwindigkeit definiert werden soll, da durch das Verhältnis von Weg und Zeit natürlich nur eine mittlere Geschwindigkeit festgelegt wird. Eine exakte Definition ist nur als Grenzwert möglich, also mit Hilfe der Differentialrechnung:

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{x}}{dt} .$$

Die Newtonsche Dynamik bedarf daher schon zu ihrer Formulierung nicht-elementarer mathematischer Hilfsmittel, was ein wirkliches Verständnis für mathematische Laien sehr

erschwert. Nach der *Lex secunda* ist die Geschwindigkeitsänderung der einwirkenden Kraft proportional. Wirken also auf einen Körper zwei andere gleichartige ein, die sich am gleichen Ort befinden, so verdoppelt sich die Wirkung. Betrachtet man andererseits einen Körper, der aus einer engen Verbindung zweier gleichartiger Körper besteht, so ruft eine äußere Einwirkung an ihm nur die halbe Geschwindigkeitsänderung wie an einem einzelnen dieser Körper hervor. Die Menge der Materie, kurz die Masse genannt, ist hier verdoppelt. Als Bewegungsgröße definiert Newton daher das Produkt aus der Masse m und der Geschwindigkeit \mathbf{v} . Dann erhält das Bewegungsgesetz die Form

$$\frac{d}{dt}(m\mathbf{v}) = \mathbf{F} .$$

Gewöhnlich ist die Masse eines Körpers nicht veränderlich. Mit der Definition der Beschleunigung $\mathbf{a} = d\mathbf{v}/dt$ ergibt sich die übliche Formulierung

$$m \mathbf{a} = \mathbf{F} \quad , \quad \text{“Kraft ist Masse mal Beschleunigung”} .$$

Der einfache Wortlaut täuscht über die begriffliche Schwierigkeit dieser Aussage und ihre weitreichenden Konsequenzen. Sie besagt nämlich folgendes: Kennt man zu jedem Zeitpunkt die Kraft \mathbf{F} , die auf einen Körper der Masse m ausgeübt wird und im allgemeinen von seiner Lage und seiner Geschwindigkeit relativ zu seiner Umgebung abhängen wird, so gilt für seinen Ort $\mathbf{r}(t)$ die Bewegungsgleichung

$$m \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F}(\mathbf{r}, \frac{d\mathbf{r}}{dt}, t) .$$

Sind zu einem bestimmten Zeitpunkt, den man immer als 0 annehmen kann, sein Ort $\mathbf{r}(0)$ und seine Geschwindigkeit $\mathbf{v}(0)$ bekannt, so ist damit seine gesamte weitere Bewegung für alle Zeitpunkte festgelegt (determiniert). Das Newtonsche Bewegungsgesetz ist also kausal-deterministisch, im völligen Gegensatz zur finalen (teleologischen) Physik des Aristoteles, bei der der Körper ein bestimmtes Ziel anstrebt.

Die Umgebung, die auf den Körper eine Kraft ausübt, ist nach dem Newtonschen atomistischen Modell der Welt ebenfalls aus Massenpunkten zusammengesetzt. Ihre Wechselwirkung muß durch den leeren Raum hindurch (Fernwirkung, “action at a distance”) und deshalb momentan erfolgen, während sie bei allen früheren Theorien durch den direkten Kontakt der Körper zustande kam. Vorbild dafür war für Newton die magnetische Kraft, die zu dieser Zeit großes Interesse fand. Aus Symmetriegründen muß dabei für die Wechselwirkung von zwei Körpern das Reaktionsprinzip gelten:

Lex III: “Die Wirkung ist stets der Gegenwirkung gleich, oder die Wirkungen zweier Körper aufeinander sind stets gleich und von entgegengesetzter Wirkung.”

Es wird häufig mit dem Schlagwort “actio = reactio” wiedergegeben und lautet formelmäßig

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21} .$$

Dabei ist \mathbf{F}_{ik} die Kraft, die auf den i . Massenpunkt vom k . ausgeübt wird. Bei der Hinzunahme weiterer Körper entsteht das Problem, daß auf jeden von ihnen gleichzeitig mehrere Kräfte wirken. Für ihre Zusammensetzung gilt der Parallelogrammsatz:

Corollarium I: “Zwei Kräfte, die am gleichen Massenpunkt angreifen, setzen sich zur Diagonalen des von ihnen gebildeten Parallelogramms zusammen. ”

Damit lassen sich die Bewegungen einer beliebig großen Anzahl N von Massenpunkten beschreiben. Aus den Bewegungsgleichungen

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \sum_{k \neq i} \mathbf{F}_{ik}$$

zusammen mit den Anfangsbedingungen

$$\mathbf{r}_i(0) = \mathbf{r}_{i0} \quad , \quad \mathbf{v}_i(0) = \mathbf{v}_{i0}$$

ergeben sich die Bahnen $\mathbf{r}_i(t)$ der einzelnen Körper für beliebige Zeiten, sind also determiniert. Bei konsequenter Anwendung des atomistischen Weltbilds (Demokrit: "Wirklich sind nur Atome und Leeres"), die Newton noch fernlag, folgt daraus die mechanistische Vorstellung der Welt als gigantisches Uhrwerk, dessen Gang determiniert ist und die Möglichkeit eines freien Willens ausschließt - eine Auffassung, die mit den monotheistischen Religionen, insbesondere dem Christentum, natürlich unvereinbar ist. In der modernen Physik, die ja weitgehend mit den Vorstellungen Demokrits übereinstimmt, stellt sich das Problem im gleichen Maße. Hier ist zwar die Entwicklung nur statistisch-kausal und daher nicht determiniert, aber ebenfalls nicht durch Willensentscheidungen beeinflussbar - die ineinander greifenden Zahnräder des Uhrwerks werden letztlich durch Würfelbecher ersetzt.

Benutzt man statt des ursprünglichen Koordinatensystems im absoluten Raum ein anderes, das sich dagegen mit einer konstanten Geschwindigkeit bewegt, so behalten die Bewegungsgleichungen ihre Form bei. Auf Grund von Messungen lassen sich also solche Systeme, die man Inertialsysteme nennt, weil auch in ihnen das Trägheitsgesetz gilt, nicht von dem ursprünglichen unterscheiden. Da in der Physik nur Aussagen sinnvoll sind, die grundsätzlich durch Messungen überprüft werden können, ist das Konzept des absoluten Raumes letztlich unphysikalisch. Der leere Raum besitzt also in sich eine gewisse Relativität, die Galilei-Relativität, die den Unterschied zwischen Ruhe und Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit aufhebt.

Die Theorie Newtons ist begrifflich nicht einfach. Der Kosmologe Hermann Bondi sagt dazu: "Einstein's contribution has a name for being difficult, but this is quite wrong. Einstein's contribution is very easy to understand, but unfortunately it rests on the theories of Galilei and Newton which are very difficult to understand!"

Besonders problematisch ist die Annahme von Fernkräften beziehungsweise einer momentanen Ausbreitung der Kraftwirkung, die ein wenig an Telepathie erinnert. Sie löste bei den Zeitgenossen, zum Beispiel Huygens, heftige Kritik aus, weil man darin eine Abkehr von mechanischen Modellen und eine teilweise Rückkehr zu den okkulten Vorstellungen der Scholastik sah. Diese Bedenken wurden von Newton sogar in gewissem Maße geteilt, aber er setzte ihnen seine Methode wissenschaftlicher Erkenntnis entgegen, die für die gesamte moderne Naturwissenschaft maßgeblich wurde. Danach wird zunächst induktiv aus den Beobachtungen eine Hypothese gewonnen (Generation), aus der dann durch strenge mathematische Deduktion weitere Erscheinungen hergeleitet werden, die im Experiment überprüft werden können (Verifikation oder Falsifikation). Jede logisch konsistente Hypothese ist zulässig, sofern sie die Beobachtungen wiedergibt. Es kommt nicht darauf an, ob sie aus (metaphysikalischen) "ersten Prinzipien" abgeleitet werden kann. Das galt für Newton insbesondere für die Gravitation, die er nicht, wie Huygens und andere, aus metaphysikalischen Überlegungen heraus zu "erklären" versuchte ("Hypotheses non fingo!").

Das Problem wurde erst von Albert Einstein wieder aufgenommen und in gewissem Sinne gelöst. Er zeigte 1905 in seiner speziellen Relativitätstheorie, daß die Existenz einer

Fernwirkung eng mit der einer absoluten Zeit verknüpft ist, und brachte 1915 in der allgemeinen Relativitätstheorie die Gravitation in Zusammenhang mit der Struktur von Raum und Zeit.

D3. Himmelsmechanik

Die Newtonsche Theorie der Dynamik und der Gravitation fand zunächst nur in England eine langsame Annahme. Während die Lehrbücher immer noch das System des Descartes darstellten, setzte sich an den Universitäten die Newtonsche Lehre bis zu seinem Tod allgemein durch. Auf dem Kontinent beherrschte lange der Kartesianismus das Feld. Das lag zum Teil an der anderen Mentalität, die durch die politischen Verhältnisse beeinflusst wurde. Die mangelnde Freiheit des Einzelnen, die Bindungen, denen er unterworfen war, förderten den Hang zum Theoretisieren statt aktiver Handlungen und führten zum Rationalismus. Demgegenüber entwickelte sich in England, wo der politische Spielraum der Bürger weit größer war, ein mehr praktisches Denken und eine Neigung zum Pragmatismus. Zur zögernden Haltung der kontinentalen Wissenschaftler trug auch bei, daß sich aus Gradmessungen in der Umgebung von Paris, im Gegensatz zur Newtonschen Abplattungstheorie, scheinbar eine Verlängerung der Erde zu den Polen hin ergeben hatte, die allerdings auf einer zu kurzen Basislinie beruhte. Auch Newtons optische Untersuchungen überzeugten nicht, da zunächst das experimentelle Geschick bei ihrer Überprüfung fehlte und eine recht erfolgreiche Theorie des Regenbogens schon von Descartes gegeben worden war.

Die Situation veränderte sich aber am Ende des 17. Jahrhunderts, als es wegen der Verschuldung des absolutistischen Staates zu einem wirtschaftlichen und militärischen Zurückfallen Frankreichs gegenüber England kam. Das führte zu einer zunehmend kritischen Haltung gegenüber den politischen und wirtschaftlichen Verhältnissen insbesondere bei der stark an Bedeutung gewinnenden Mittelklasse. Sie litt unter der ständig wachsenden Steuerlast und sah das liberale England als Vorbild, ihr Widerstandsgeist führte schließlich zur Revolution. Einer der Wortführer dieser kritischen Denkweise war Voltaire. In seinen "Briefen aus England" aus den Jahren 1728-1730 beschrieb er die englischen Verhältnisse (Quäker, Kirche, Parlament, Wirtschaft, Impfung) und beschäftigte sich dabei auch mit den Philosophen Bacon und Newton, insbesondere dem Vergleich des letzteren, dessen pompöse Beisetzung ihn sehr beeindruckt hatte, mit Descartes:

"Ein Franzose, der nach London kommt, findet alle Dinge beträchtlich verändert, in der Philosophie wie überhaupt. Er verließ die Welt ausgefüllt, er findet sie hier leer. In Paris sieht man das Universum als aus Wirbeln feinsten Materie bestehend; in London sieht man nichts davon. Bei uns ist es der Druck des Mondes, der die Gezeiten des Meeres erzeugt; bei den Engländern ist es das Meer, das vom Mond angezogen wird ... Darüberhinaus stellt man fest, daß die Sonne, die in Frankreich überhaupt nicht in die Angelegenheit verwickelt ist, hier fast ein Viertel beizutragen hat. Bei unseren Kartesianern geschieht alles durch Druck, was nicht leicht verständlich ist; bei Monsieur Newton geschieht alles durch Anziehung, deren Ursache auch nicht besser bekannt ist. In Paris stellt man sich die Erde als Melone vor; in London ist die auf beiden Seiten abgeplattet."

Nach seiner Rückkehr nach Frankreich entwarf er, unterstützt durch seine frühere Geliebte Emilie Marquise du Chatelet, eine fähige Mathematikerin und Naturphilosophin, eine gemeinverständliche Einführung in die Physik Newtons, die 1733 unter dem Titel "Éléments de la philosophie de Neuton" [109] erschien. Sie war von großer Wirkung. Während noch 1730 Johann Bernouilli den Preis der Akademie der Wissenschaften für die Darstellung der Planetenbewegung auf kartesischer Grundlage erhielt und erst 1732 Maupertuis eine Abhandlung über die Figur der Erde nach der Newtonschen Theorie vorlegte, wurde 1740 der Preis für die Erklärung der Gezeiten schon zwischen dem Kartesianer Euler und den Newtonianern Daniel Bernouilli und Maclaurin geteilt. Nach diesem Zeitpunkt wurden

Arbeiten auf der Basis der Wirbeltheorie von der Akademie nicht mehr berücksichtigt. An den Universitäten des Kontinents blieb der Kartesianismus aber noch lange vorherrschend.

Für diesen Meinungsumschwung gab es einen wichtigen Grund. Die französischen Mathematiker neigten zwar als Rationalisten eher dem idealistischen Weltbild von Descartes als dem pragmatischen von Newton zu. Dabei spielte auch die Kontroverse zwischen Leibniz und Newton eine gewisse Rolle. Während aber das System des Descartes fast alles (im Nachhinein) erklären, aber fast nichts vorhersagen konnte, eröffnete Newtons Theorie der Mathematik, insbesondere der sich stürmisch entwickelnden Infinitesimalrechnung, ein weites Feld von Anwendungen als Folgerungen eines einheitlichen Grundgesetzes, die zudem direkt an der Erfahrung überprüft werden konnten. Dadurch kam es bald zu einer völligen Umkehrung der Verhältnisse. Während im saturierten England der Fortschritt stagnierte, führten die Bestrebungen zur Änderung der Situation in Frankreich zu einem rasanten Ausbau der Theorie durch eine Reihe genialer Mathematiker und mathematischer Physiker, dem England kaum etwas entgegenzusetzen hatte.

Dazu trug auch bei, daß der Hang Newtons, trotz der von ihm entwickelten Fluxionsrechnung die Ergebnisse hauptsächlich "more geometrico" darzustellen, von seinen weit weniger genialen Nachfolgern beibehalten wurde. Auf dem Kontinent kam es dagegen, nicht zuletzt auch wegen des sehr viel zweckmäßigeren Infinitesimalkalküls von Leibniz ("calculus"), zu einer raschen Entwicklung von Analysis und analytischer Geometrie [110]. Wegen ihrer starken Formalisierung erlaubten diese Methoden zwar weniger unmittelbare Einsichten geometrischer Art, ließen sich dafür aber leichter zur Lösung komplexer Probleme einsetzen.

a) Das N -Körper-Problem

Ausgangspunkt für alle theoretischen Arbeiten auf dem Gebiet der Himmelsmechanik war Newtons Problem: für die zu dieser Zeit bekannten 18 Körper des Sonnensystems (Sonne, 6 Planeten, Erdmond, 4 Jupitermonde, 5 Saturnmonde, Saturnring) ihre Massen und Bahnen zu bestimmen. Es handelt sich um einen Sonderfall des N -Körper-Problems:

N Massenpunkte mit den Massen m_k bewegen sich unter dem Einfluß ihrer wechselseitigen Gravitation. Für die N Bewegungsgleichungen

$$m_k \frac{d^2 \mathbf{r}_k}{dt^2} = \sum_{j \neq k} G m_k m_j \frac{(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_k)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_k|^3}$$

mit den Anfangsbedingungen $\mathbf{r}_k(0) = \mathbf{r}_{k0}$, $\mathbf{v}_k(0) = \mathbf{v}_{k0}$ sind die Bahnen $\mathbf{r}_k(t)$ zu berechnen.

Für das Sonnensystem vereinfacht sich die Situation dadurch, daß die Masse der Sonne sehr groß gegenüber allen anderen ist. Man kann zeigen, daß sich die Aufgabe dadurch näherungsweise auf Dreikörperprobleme reduziert.

Für $N = 1$ ist das N -Körper-Problem trivial (freie Bewegung eines Massenpunktes), das für $N = 2$ entstehende Zweikörperproblem wurde von Newton vollständig gelöst, es ergeben sich dabei, mit einer leichten Modifikation wegen der endlichen Masse der Sonne, die drei Keplerschen Gesetze. Für $N = 3$ handelt es sich um das berühmte (berühmte) Dreikörperproblem, um dessen Lösung sich die bedeutendsten Mathematiker dieser Zeit vergeblich bemüht haben. Clairaut sagte dazu:

“Mag nun integrieren, wer kann ... Ich habe diese Gleichungen hier ohne weiteres aufgestellt, aber nur wenig Mühe an ihre Lösung verwendet, weil sie mir kaum behandelbar erschienen. Vielleicht erscheinen sie anderen vielversprechender. Ich habe sie aufgegeben und mich Näherungsverfahren zugewendet.”

Sein Verdacht sollte sich bestätigen, denn 1888 konnte Bruns zeigen, daß das Problem nicht allgemein integrabel, also in geschlossener Form lösbar ist. Möglich ist dagegen, wie Poincaré um 1890 bewies, eine Lösung durch konvergente Reihenentwicklungen und natürlich auch durch numerische Integration. Das letztere Verfahren wird heute in der Astronautik fast ausschließlich verwendet.

Bei solchen numerischen Untersuchungen zeigte sich, daß sich beim Dreikörperproblem eine außerordentlich große und kaum zu überschauende Vielfalt von möglichen Bahnen ergibt, bei denen beispielsweise auch einer der Körper aus einem ursprünglich gebundenen System hinausgeschleudert werden kann (Ejektionsbahn). Es wurden daher einfachere Sonderfälle untersucht, zum Beispiel das eingeschränkte Dreikörperproblem (“problème restreint”), bei dem die Masse eines der Körper sehr klein gegenüber den beiden anderen ist.

Auch das “problème restreint” kann nicht in geschlossener Form gelöst werden. Die beiden massereichen Körper bewegen sich natürlich auf Kepler-Ellipsen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt, die Bahn des dritten ist aber im allgemeinen sehr kompliziert. Es können sowohl Ejektions- als auch Einfangbahnen vorkommen. Das gilt auch für den häufig untersuchten weiteren Sonderfall, daß die beiden großen Körper Kreisbahnen mit konstanter Winkelgeschwindigkeit beschreiben. In diesem Fall vereinfacht sich die Rechnung ganz erheblich, wenn man sie in einem mitrotierenden Koordinatensystem durchführt. Der kleine Körper bewegt sich dann in einem statischen Kraftfeld, wobei allerdings noch die Zentrifugal- und die Corioliskraft hinzukommen.

Es gibt dann fünf Positionen, die Lagrange-Punkte L_1 bis L_5 , in denen der Körper in Ruhe verharren kann, weil die Gravitationskraft durch die Zentrifugalkraft kompensiert wird [111]. Von ihnen sind L_1 bis L_3 , die auf der Verbindungslinie der beiden großen Massen liegen, instabil. Ein Körper, der sich dort zunächst in Ruhe befindet, wird sich durch die unvermeidlichen Störungen schließlich herausbewegen und weitgestreckte Bahnen beschreiben. Im Gegensatz dazu sind die Lagrange-Punkte L_4 und L_5 stabil. Bei hinreichend kleinen Störungen wird der Körper also immer in der Nähe dieser Punkte bleiben. Im Sonnensystem ist dieser Fall näherungsweise realisiert in Bezug auf die großen Massen Sonne und Jupiter, wobei man außerdem die Bewegung der Sonne wegen ihrer überragenden Masse vernachlässigen kann. In zwei Punkten der Jupiterbahn, die dem Planeten um 60° vorangehen bzw. folgen, fand man seit 1906 zwei Gruppen von Kleinplaneten, die man die “Trojaner” nennt, weil sie nach Helden aus Homers Ilias benannt sind. Dabei finden sich in der einen Griechen, in der anderen Trojaner, wobei Patroklos und Hektor sich jeweils im feindlichen Lager aufhalten.

b) Himmelsmechanik im 18. Jahrhundert

Die Entwicklung der Himmelsmechanik (“*mécanique céleste*”, “*celestial mechanics*”) im 18. Jahrhundert wurde von einer Reihe der bedeutender Wissenschaftler getragen, die hervorragendsten sind:

Leonhard Euler (1707-1783)

Er wurde in Basel geboren, studierte bei Jakob und Johann Bernoulli und war befreundet mit dem Sohn Daniel des letzteren. Auf dessen Vermittlung wurde er - nach einem Studium der Theologie! - auf eine Professur in St.Petersburg berufen und 1727 auch Mitglied der

dortigen Akademie. Bedrückt durch die absolutistische Gewaltherrschaft wechselte er 1741 zu Friedrich II nach Preußen und reorganisierte die Berliner Akademie der Wissenschaften. 1763 erblindete er und kehrte 1766 nach St.Petersburg zurück, wo er 1783 starb. Erst ein Schlaganfall "verhinderte ihn, zu leben und zu berechnen". Er war überaus produktiv. Seine 800 Originalarbeiten mit Beiträgen zur Analysis und Himmelsmechanik, insbesondere zur Störungstheorie des Dreikörperproblems, füllen 25 Bände zu 600 Seiten.

Alexis Claude Clairaut (1713-1765)

Er wurde in Paris geboren und war ausgesprochen frühreif. Mit zehn Jahren beherrschte er die Infinitesimalrechnung und die Geometrie der Kegelschnitte, mit dreizehn Jahren schrieb er seine erste wissenschaftliche Arbeit und wurde mit achtzehn Jahren durch ein Buch über Geometrie Mitglied der Akademie der Wissenschaften. Er unternahm zusammen mit Maupertuis eine Reise nach Lappland zur Erdvermessung und veröffentlichte 1743 eine Reihe von Arbeiten über die Gleichgewichtsfiguren rotierender Körper. Sein wichtigstes Arbeitsgebiet war das Dreikörperproblem, speziell die Mondtheorie.

Seinen spektakulärsten Erfolg errang er aber bei der Bahnberechnung des Halleyschen Kometen. Von Halley war dessen Wiederkehr für das Jahr 1758 vorausgesagt worden, aber die Bahnstörungen durch die Planeten, insbesondere durch Jupiter und Saturn, bewirken, daß die Umlaufdauer nicht immer gleich lang ist. Der Komet war 1531, 1607 und 1682 beobachtet worden, hatte also einmal 76 und das andere Mal 75 Jahre für einen Umlauf gebraucht. Clairaut begann 1758 mit der Berechnung der Bahn durch numerische Integration, aber die Arbeit war so langwierig, daß er fürchtete, der Komet könne erscheinen, bevor er zu einem Ergebnis gekommen wäre. Er versicherte sich daher der Mithilfe von Mme. Lepaute, der Frau eines berühmten Uhrmachers, die eine begabte Mathematikerin war. Sie arbeiteten Tag und Nacht so hart, daß sie sich kaum Zeit zum Essen gönnten, und im November 1758 konnte Clairaut der Akademie der Wissenschaften mitteilen, daß die Umlaufdauer des Kometen sich durch die Störungen von Jupiter um 518 und die von Saturn um 100 Tage vergrößern würde und daß der Periheldurchgang am 13.4.1759 zu erwarten sei, bei einem möglichen Fehler von einem Monat. Die erste Sichtung erfolgte am 25.12.1758 durch den Amateurastronomen Palitzsch in Dresden, das Perihel durchlief der Komet am 12.3.1759, also 32 Tage vor dem berechneten Termin. Diese genaue Vorhersage wurde zu Recht als Triumph der Newtonschen Theorie angesehen und trug auch zur Verringerung der abergläubischen Kometenfurcht bei, die aber trotzdem bis heute (Komet Bopp-Hale) noch nicht verschwunden ist.

Clairaut war ein prominentes Mitglied der Pariser Gesellschaft, aber sein dortiges Engagement und die ständige Überarbeitung schwächten seine ohnehin angegriffene Gesundheit und führten zu seinem frühen Tod.

Jean-le-Rond d'Alembert (1717-1783)

Seinen Vornamen verdankt er der Pariser Kirche Jean-le-Rond, auf deren Stufen er ausgesetzt worden war. Sein adliger Vater legitimierte ihn später zwar, er wuchs aber bei Pflegeeltern auf. Er begann mit dem Studium der Rechtswissenschaften und der Medizin, wechselte jedoch zur Mathematik und wurde auf Grund einer mathematischen Abhandlung aus dem Jahre 1738 zwei Jahre später Akademiemitglied. Sein erstes bedeutendes Werk war der "Traité de Dynamique", in dem er das nach ihm benannte Prinzip aufstellte. Es folgten 1749 Arbeiten über Präzession und Nutation, gleichzeitig lieferte er Beiträge zur berühmten "Encyclopédie Francaise" von Denis Diderot, für die er auch das Vorwort schrieb und anlässlich seiner Aufnahme 1754 der Académie Francaise vortrug. Die Enzyklopädie war eines der Hauptwerke der Aufklärung ("Siècle des Lumières") und Wegbereiterin der Revolution, ihre Autoren, die Enzyklopädisten, überwiegend atheistische Rationalisten. Gegenüber Clairaut bestand ein heftiges Rivalitätsverhältnis, obgleich

d'Alembert im übrigen ein sehr freundlicher und bescheidener Mensch war, der extrem einfach bis ärmlich lebte und von seinem Gehalt seine Pflegemutter und mittellose Studenten unterstützte. Angebote von Monarchen lehnte er ab, mit der Ausnahme einer kleinen Pension von Friedrich II von Preußen, dem Vertreter eines aufgeklärten Absolutismus.

Gemeinsames Arbeitsgebiet von Euler, Clairaut und d'Alembert war die Mondtheorie. Die Berechnung der Mondbahn ist eine der schwierigsten Aufgaben der Himmelsmechanik und stellte die Theoretiker vor ganz neue Probleme. Während bei der Störungsrechnung für Planetenbahnen die Sonne wegen ihrer großen Masse für die ungestörte Bahn verantwortlich ist, tritt sie bei der Mondbahn umgekehrt als störender Körper auf, während die ungestörte Bahn auf die Anziehung durch die Erde zurückzuführen ist. Man hat es hier daher mit einer sehr großen störenden Masse zu tun, die sich aber gleichzeitig in sehr großer Entfernung befindet.

Da wegen der Nähe des Mondes sehr genaue Beobachtungen möglich sind, muß die Rechnung bis zu sehr kleinen Störtermen durchgeführt werden, von denen es andererseits eine sehr große Zahl gibt. Die wichtigsten Störungen waren schon von Newton behandelt worden, dabei hatte sich als schwierigstes Problem das Vorrücken des Perigäums gezeigt. Euler veröffentlichte 1746 noch unvollkommene Mondtafeln, d'Alembert und Clairaut legten ihre ersten Ergebnisse 1747 der Akademie der Wissenschaften vor. Alle drei erhielten, wie schon Newton, nur die Hälfte des beobachteten Effektes. Clairaut versuchte zunächst, die Abweichung darauf zurückzuführen, daß das Newtonsche Gravitationsgesetz für kleine Abstände nicht exakt gilt, fand aber später heraus, daß die Hinzunahme weiterer Störterme den Betrag wesentlich vergrößerte. Mit seiner 1752 veröffentlichten "Théorie de la Lune" gewann er den Preis der Petersburger Akademie. Zum gleichen Ergebnis kamen 1754 d'Alembert mit seinen "Récherches sur différents points importants du système du Monde" und Euler mit der "Theoria Motuum Lunae", die er 1772 noch wesentlich verbesserte.

Diese Arbeiten gaben zwar die Störungen in ihrer Abhängigkeit von der Zeit und der Lage der Knoten gut wieder, aber die numerische Übereinstimmung war nicht zufriedenstellend. Tobias Meyer (1723-1762) in Göttingen änderte deshalb die Theorie von Euler dadurch ab, daß er die Amplituden auf semiempirischem Wege, also durch Anpassung an die Beobachtungen, bestimmte und berechnete so Mondtafeln, die bis auf 1' - entsprechend 27 Seemeilen - genau waren. Er legte sie 1755 der britischen Admiralität vor. Sie wurden von Bradley mit den Messungen in Greenwich verglichen und daraufhin 1770 auf Kosten der Admiralität veröffentlicht, während die Witwe Meyers 3000 £ als Teil des 1713 ausgesetzten Preises erhielt.

Joseph Louis Lagrange (1736-1813)

Er wurde in Turin geboren, stammte aber aus einer französischen Familie. Schon in jungen Jahren wurde er als Professor an die Artillerieschule in Turin berufen und wirkte bei der Gründung der Turiner Akademie der Wissenschaften mit, in deren Schriftenreihe er mehrere Abhandlungen zur Variationsrechnung veröffentlichte. Sie machten auf Euler einen so großen Eindruck, daß er ihm die Mitgliedschaft in der Berliner Akademie verschaffte. 1764 erhielt Lagrange den Preis der Pariser Akademie für eine Abhandlung über Mondlibrationen, in der er das nach ihm benannte Prinzip der Mechanik aufstellte. 1766 wurde er auf Empfehlung d'Alemberts von Friedrich II von Preußen als Nachfolger von Euler zum Präsidenten der Berliner Akademie berufen mit der schmeichelhaften Begründung, daß der größte König Europas den größten Mathematiker Europas an seinem Hof zu haben wünsche. Er hatte dieses Amt bis 1787 inne und schrieb in dieser Zeit eine große Zahl von Abhandlungen, darunter seine berühmte "Mécanique Analytique", die aber erst 1788 nach seiner Rückkehr nach Paris erschien. Er hatte nach dem Tode

Friedrichs II die Einladung Ludwigs XVI angenommen, Mitglied der Pariser Akademie zu werden. In dieser Zeit begannen seine depressiven Anfälle, wahrscheinlich ausgelöst durch Überarbeitung. Nach der Revolution wurde er 1790 Präsident der Kommission für Maße und Gewichte, die das metrische System einführte. Er war jedoch, anders als sein Freund Lavoisier, in politischen Fragen sehr zurückhaltend und überstand diese Jahre unbeschadet. 1795 wurde er als Professor der Mathematik an die École Normale berufen, 1797 an die École Polytechnique und blieb bis zu seinem Tode in diesem Amt.

Pierre Simon Laplace (1749-1827)

Als Sohn eines kleinen Bauern wurde er in Beaumont in der Normandie geboren. Die Hilfe wohlhabender Nachbarn ermöglichte ihm das Studium an der örtlichen Militärschule, an der er anschließend Lehrer wurde. Mit achtzehn Jahren ging er nach Paris mit einem Empfehlungsschreiben an d'Alembert, von dem dieser aber keine Notiz nahm. Deshalb sandte ihm Laplace eine Arbeit über die Grundlagen der Mechanik, die d'Alembert so beeindruckte, daß er dem jungen Mathematiker eine Anstellung an der Pariser Militärakademie verschaffte. Die erste Arbeit von Laplace erschien 1766 in den Abhandlungen der Turiner Akademie und war rein mathematischer Natur, die weiteren behandelten auch Gegenstände aus der Mechanik und der Astronomie. Sie wurden zum großen Teil zusammengefaßt in seinem Hauptwerk "Mécanique Céleste", dessen fünf Bände von 1799 bis 1825 erschienen. In ihnen waren auch Arbeiten seiner Vorgänger zusammengefaßt, aber ohne Nennung der Autoren, was seine Ursache in seiner Eitelkeit hatte. Literarisch war er sehr gewandt und veröffentlichte 1796 die "Éxposition du Système du Monde", eine populäre Darstellung ohne Formeln oder Diagramme, die eine weite Verbreitung fand. Auf eigenen Wunsch wurde er 1799 Innenminister unter dem ersten Konsul der Republik, Napoleon Bonaparte, der ihn aber schon nach sechs Wochen "wegen Unfähigkeit" wieder entließ und durch seinen Bruder Lucien ersetzte. Laplace war Mitglied der Kommission für Maße und Gewichte, des Bureau des Longitudes, Professor an der École Polytechnique und politisch sehr anpassungsfähig. In Napoleons Kaiserreich wurde er Graf, nach der Rückkehr der Bourbonen Marquis und 1816 Mitglied der Académie Francaise als einer der 40 "Unsterblichen". Seine letzten Worte waren:

"Ce que nous connaissons est peu de chose, ce que nous ignorons est immense."

Ein wichtiger Fortschritt in der Entwicklung der Himmelsmechanik durch Lagrange und Laplace war die Unterscheidung von periodischen und säkularen Störungen. Periodische Störungen sind abhängig von der Position des betrachteten Himmelskörpers in seiner Bahn. Sie können relativ groß werden, aber für lange Zeiträume verschwindet ihr Mittelwert. Säkulare Störungen hängen dagegen nur von den Bahnelementen ab. Sie sind zwar häufig relativ klein, wachsen aber mit der Zeit monoton an. Die Unterscheidung zwischen beiden ist allerdings nicht immer eindeutig, es gibt einen Übergang von periodischen Störungen mit großer Periode zu säkularen.

Ein altes Problem der Himmelsmechanik, das schon von Kepler 1625 bemerkt und von Halley 1695 genauer untersucht worden war, bestand darin, daß Jupiter in seiner Bahn beschleunigt und Saturn verzögert wurde. Die beiden Planeten drifteten deshalb im Sonnensystem nach innen beziehungsweise außen, was bei unbegrenzter Fortdauer einschneidende Folgen haben mußte. Die französische Akademie der Wissenschaften machte dieses Problem 1748 und noch einmal 1752 zum Gegenstand einer Preisaufgabe. Beim ersten Mal erhielt Euler den Preis, obgleich sein Beitrag keine wirkliche Lösung darstellte. Lagrange machte sich 1763 an eine neuartige Behandlung des Dreikörperproblems und fand tatsächlich in beiden Fällen säkulare Terme, deren Betrag aber zu klein war. Laplace dehnte die Untersuchung auf alle bisher vernachlässigten Effekte höherer Ordnung aus und

fand, daß die säkularen Beiträge sich sogar aufhoben. Er konnte dieses Ergebnis 1776 sogar verallgemeinern und zeigen, daß die wechselseitige Anziehung der Planeten die großen Halbachsen a , Exzentrizitäten e und Bahnneigungswinkel i ihrer Bahnen nur innerhalb recht enger Grenzen schwanken ließ.

Laplace faßte seine Resultate 1784 in zwei Beziehungen zusammen:

$$\sum_k m_k a_k^{1/2} e_k = c \quad , \quad \sum_k m_k a_k^{1/2} \tan^2 i_k = c'$$

Danach gibt es sowohl für die Exzentrizitäten e_k wie für die Inklinationen i_k einen "pool", der nur zwischen den Planeten umverteilt werden kann, so daß diese Größen nie sehr große Werte annehmen können.

Das Sonnensystem ist danach für sehr große Zeiten stabil. Dabei geht aber wesentlich ein, daß alle Planeten die Sonne in fast kreisförmigen Bahnen in fast der gleichen Ebene und im gleichen Drehsinn umlaufen. Die Rechnung war allerdings nicht exakt, da immer noch eine Reihe sehr kleiner Terme, die zum Beispiel daher rühren, daß die Himmelskörper nicht starr sind und Gezeitenkräfte auftreten, vernachlässigt worden war. Die Stabilität der Bahnen gilt übrigens nicht für die kleinen Mitglieder des Sonnensystems wie Kometen und Kleinplaneten. Ihre Bahnelemente können sich in recht kurzer Zeit grundlegend ändern, bis hin zur Ejektion aus dem System, und können sogar ein chaotisches Verhalten zeigen.

Napoleon hatte dieses Ergebnis aus der "Exposition" erfahren. Er fragte Laplace, warum in seinem Werk, im Gegensatz zu dem Newtons, Gott nicht mehr vorkäme und erhielt die Antwort: "Sire, je n'avais plus besoin de cette hypothèse-là".

Damit waren aber die beobachteten Bahnstörungen von Jupiter und Saturn noch immer nicht erklärt, und Laplace vermutete als Ursache einen Kometen. Diesen Gedanken gab er aber 1773 auf, als er alten Beobachtungen von Hevelius entnahm, daß zu dessen Zeit die Rollen der beiden Planeten gerade vertauscht gewesen waren. Es mußte sich also um eine periodische Störung handeln, und 1784 konnte er zeigen, daß wegen einer Resonanz der Umlaufzeiten - zwei Umläufe des Saturn entsprechen fünf des Jupiter - diese beiden Planeten alle 59 Jahre in der gleichen relativen Position zur Sonne stehen. Das führt zu einer Akkumulation der Störungen, so daß auch Terme dritter Ordnung in den e_k berücksichtigt werden müssen, die zu periodischen Störungen mit einer Periode von 900 Jahren und einer Amplitude von 21' für Jupiter, 49' für Saturn führen. Aus dem anfänglichen Widerspruch zur Newtonschen Theorie war so eine glänzende Bestätigung geworden.

Einen ähnlichen Erfolg gab es auch in der Mondtheorie. Halley hatte 1693 aus dem Vergleich von antiken und modernen Finsternissen hergeleitet, daß sich in der Zwischenzeit die Umlaufsdauer und damit nach dem dritten Keplerschen Gesetz auch der Abstand des Mondes verringert haben mußte. Diese "säkulare Beschleunigung" des Mondes betrug zwar nur 10" im Jahrhundert, mußte aber, wenn sie wirklich eine säkulare Störung war, letztlich zum Absturz auf die Erde führen. Die Pariser Akademie setzte 1770 einen Preis für die Ableitung dieses Effektes aus der Gravitationstheorie aus. Er wurde Euler zugesprochen, der in seiner Abhandlung umgekehrt glaubte, die Unvereinbarkeit der Erscheinung mit der Newtonschen Theorie beweisen zu können und 1772 als Ursache ein dünnes widerstehendes Medium annahm, wodurch die Katastrophe unvermeidlich gewesen wäre.

Nach vielen vergeblichen Versuchen gelang es schließlich Laplace, den wirklichen Grund herauszufinden. Die Störung der Erdbahn durch die anderen Planeten führt zu einer langsamen Verringerung ihrer Exzentrizität und damit zur Vergrößerung des mittleren Abstandes von der Sonne. Dadurch wird die Störung der Mondbahn durch die Sonne kleiner,

und die Mondentfernung nimmt ab. Die Erscheinung kehrt sich im Laufe der Zeit wieder um, es handelt sich also um eine periodische Störung. Diese Theorie erklärt allerdings nur zwei Drittel der beobachteten Beschleunigung. Der Rest rührt daher, daß durch die Gezeitenreibung die Erdrotation verlangsamt und somit die Tageslänge, die ja die Zeiteinheit bildet, vergrößert wird, was eine scheinbare Beschleunigung bewirkt. Mit der Abbremsung der Erde ist wegen der Erhaltung des Drehimpulses zwar gleichzeitig eine Vergrößerung des Mondabstandes verbunden, deren Betrag aber vernachlässigt werden kann.

D4. Astronomie und Navigation

Für die Beschäftigung mit der Astronomie ist die wissenschaftliche Neugier nur einer der Beweggründe, historisch oft sogar der schwächste. Viel wichtiger waren im allgemeinen praktische Bedürfnisse: Kalender, Astrologie. Im 17. und 18. Jahrhundert spielte wegen der Eroberung und Kolonisation der Welt außerhalb Europas und der sich damit stürmisch entwickelnden Schifffahrt die Vermessung und Kartierung der Erdkugel und die Navigation auf den Ozeanen eine wichtige Rolle. Die Position auf der Erdkugel wird dabei festgelegt durch die geographische Länge und Breite.

Die Breite läßt sich sofort aus dem Meridiandurchgang eines Sterns mit bekannter Declination bestimmen, man benötigt dazu allerdings Sternkataloge. Der erste war schon von Hipparch zusammengestellt worden und wurde durch Tycho Brahe wesentlich erweitert und verbessert, doch bezogen sich beide nur auf den nördlichen Sternhimmel. Jetzt wurde aber auch die Navigation auf der Südhalbkugel wichtig und damit die Ergänzung der Sternkarten für südliche Breiten. Schon um 1600 hatten holländische Seefahrer einige Daten gesammelt, zu einer systematischen Vermessung des südlichen Himmels kam es, als 1676 Halley zu diesem Zweck nach St. Helena geschickt wurde. Er bestimmte die Positionen von 350 Sternen, die den Katalogen von Brahe und Hevelius als Anhang beigefügt wurden. Bei dieser Gelegenheit entdeckte er auch den Zusammenhang zwischen den Monsunwinden und der Erdrotation.

Im Gegensatz zur Bestimmung der Breite ist die der Länge ein schwieriges Problem. Das liegt daran, daß sich die Zuordnung von Punkten auf der Erd- und Himmelskugel durch die Rotation der Erde ständig verändert, in einer Stunde um 15° . Die Bestimmung der Länge läuft daher auf eine Zeitmessung hinaus. Während bei der Breite der Äquator eine natürliche Bezugsgröße ist, muß diese für die Länge durch Konvention festgelegt werden. Bis zum Beginn des 18. Jahrhunderts war der Bezugsmeridian der von Paris, da die dortige Sternwarte die bedeutendste Beobachtungsstätte war. Durch die politische Machtverschiebung, insbesondere auf den Meeren, die zur Vormachtstellung der Royal Navy und zur Eroberung vieler französischer Kolonien, besonders in Indien, führte, ging diese Vorrangstellung an die Sternwarte in Greenwich und deren Meridian über. Schon 1634 hatte Richelieu einen Preis für ein Verfahren zur Längenbestimmung ausgesetzt, 1714 verabschiedete das britische Parlament ein Gesetz, das eine Belohnung von 20000 £ auslobte für ein Verfahren, mit dem die geographische Länge auf See genauer als bis auf 30' bestimmt werden konnte.

Die Längenbestimmung auf See [112] geschieht dadurch, daß man zunächst die Ortszeit feststellt, das kann durch Beobachtung des Meridiandurchgangs eines Sterns mit bekannter Rektaszension erfolgen, und sie mit der Ortszeit von Greenwich vergleicht. Aus dem Zeitunterschied ergibt sich dann sofort ($1^h \hat{=} 15^\circ$) der Längenunterschied. Die Schwierigkeit liegt darin, die Ortszeit von Greenwich transportabel zu machen. Dazu bedarf es einer Uhr mit hinreichender Ganggenauigkeit auch bei monatelangen Seereisen.

Solche Uhren können von zweierlei Art sein, nämlich Apparate, die periodische mechanische Vorgänge wie Pendel- oder Federschwingungen benutzen, oder "kosmische" Uhren, bei denen periodische Vorgänge an Himmelskörpern beobachtet werden. Lange Zeit reichte angesichts der widrigen Bedingungen – rauhe See, starke Klimaunterschiede – die Genauigkeit mechanischer Uhren nicht aus, denn einem Uhrstandsfehler von einer Minute entspricht am Äquator eine Positionsungenauigkeit von 15 Seemeilen. Man war daher zunächst auf periodische Vorgänge am Himmel angewiesen.

Galilei hatte dafür die Bewegung der Jupitermonde um ihren Planeten vorgeschlagen, aber

die Beobachtungsprobleme und das Fehlen hinreichend genauer Tabellen verhinderten die praktische Anwendung. Besser geeignet war die Bewegung des Mondes unter den Sternen, die $13.2^\circ/\text{Tag}$ beträgt. Dazu war natürlich ein sehr genauer Katalog der Koordinaten von Sternen in der Umgebung der Mondbahn, also letztlich der Ekliptik, erforderlich. Aus ihnen konnte man dann mit Hilfe der sphärischen Trigonometrie (Pirat nur mit Abitur!) Rektaszension und Deklination des Mondes berechnen und mit denen in einer Mondtabelle vergleichen, wo sie in Abhängigkeit von der Greenwich-Zeit angegeben waren.

Mechanische Uhren gab es zwar schon seit dem Altertum, dabei handelte es sich jedoch überwiegend um Sand- und Wasseruhren, die sich nur zur Messung kurzer Zeitintervalle eigneten. Im Mittelalter wurden Räderwerke benutzt, die durch Gewichte angetrieben wurden, aber ihre Genauigkeit war gering. Schon Galilei hatte die Isochronie des Pendels erkannt, also die Tatsache, daß die Schwingungsdauer, jedenfalls für kleine Auslenkungen, unabhängig von der Schwingungsweite ist. Erst Huygens, dem "genialsten Uhrmacher aller Zeiten", gelang es 1656, Gewichtsantrieb und Pendel so zu kombinieren, daß die Schwingungen aufrechterhalten, aber nicht gestört wurden. Die zugehörige Theorie stellte er 1673 in seinem Buch "Horologium oscillatorium" zusammen.

Für endliche Auslenkungen ist die Bewegung eines Massenpunktes auf einem Kreisbogen im homogenen Schwerfeld nicht exakt isochron. Huygens konnte zeigen, daß das aber für die Bewegung auf einem Zykloidenbogen gilt, und konstruierte ein Zykloidenpendel, wobei er die Tatsache benutzte, daß die Evolvente einer Zykloide ebenfalls eine Zykloide ist. Die Konstruktion wurde auch von Harrison benutzt, konnte sich aber auf die Dauer nicht durchsetzen.

Die Pendeluhr wurde in der folgenden Zeit zum wichtigsten Instrument einer Sternwarte nach dem Teleskop. Sie eignete sich aber wegen der heftigen Schiffsbewegungen nicht für den Einsatz auf See. Huygens löste das Problem dadurch, daß er als regulierendes, also schwingungsfähiges, System eine Schraubenfeder verwendete. Die Idee stammte schon, wie viele andere, von Robert Hooke, auf den auch der Name "Chronometer" zurückgeht. Ein wirklich funktionstüchtiges Instrument, das den Bedingungen der "latitude act" des britischen Parlaments genügte, wurde von John Harrison [113] gebaut. Hier bestand die Schraubenfeder aus einer Verbindung mehrerer Metalle, um die Temperaturabhängigkeit zu beseitigen, und ein Selbstaufzug ("Remontoir") sorgte für gleichmäßige Federspannung [114]. Nachdem dieses Schiffschronometer sich auf Seereisen 1761 und 1765 bewährt hatte, erhielt Harrison dafür insgesamt 15000 £ des ausgesetzten Preises.

a) Sternwarten

Da die Ortsbestimmung auf See mit Hilfe der Positionen von Sonne und Mond oder der Meridiandurchgänge von Sternen erfolgte, wurden außer der Kenntnis der Standardzeit auch Tafeln der Sonnen- und Mondbewegung (Ephemeriden) und Sternkataloge von hoher Genauigkeit benötigt. Die Gewinnung dieser Daten wurde jetzt zur Aufgabe staatlicher Sternwarten mit Astronomen im öffentlichen Dienst. Ihre wichtigsten Instrumente waren Teleskope und Uhren in der Kombination des auf Ole Rømer zurückgehenden Meridiankreises, auch Passage- oder Transitinstrument genannt. Er besteht aus einem Fernrohrmäßiger Vergrößerung, das zwischen zwei Tragepfeilern in der Meridianabene bewegt werden kann und mit sehr genauen Teilkreisen versehen ist [115]. Für eine große Anzahl von Sternen werden damit der Zeitpunkt und die Höhe des Meridiandurchgangs gemessen und daraus ihre äquatorealen Koordinaten Rektaszension und Deklination bestimmt.

Die erste Einrichtung dieser Art entstand in Frankreich, nachdem 1664 Jean Picard (1620-1682) in einem Schreiben an Ludwig XIV darauf hingewiesen hatte, daß es im ganzen

Land kein Instrument zur exakten Breitenbestimmung gab. Daraufhin erging 1667 eine königliche Order zum Bau eines Observatoriums, zu dessen Direktor Domenico Cassini (1625-1712) ernannt wurde, während Picard als führender Experte die Stelle des ersten Beobachters erhielt. Seit 1679 veröffentlichte er als nautischen Almanach die "connaissance des temps". Sein Vorschlag, die Sternwarte mit einem Mauerquadranten von 5 Fuß Radius als Transitinstrument auszustatten, wurde erst 1683 unter seinem Nachfolger La Hire verwirklicht, da der Bau des pompösen Gebäudes zuviel Geld verschlungen hatte [116,117], dafür fehlten jetzt aber die Mittel zum Druck der Beobachtungen, was den Zugriff darauf sehr begrenzte.

In England kam es zu einer ähnlichen Entwicklung, als der Franzose St.Pierre Charles II ein Verfahren zur Längenbestimmung vorlegte. Zur Begutachtung wurde 1675 ein Komitee unter der Leitung von John Flamsteed (1646-1719) eingesetzt, auf dessen Vorschlag im gleichen Jahr mit dem Bau einer Sternwarte in Greenwich begonnen wurde [118].

Erster "Astronomer Royal" wurde Flamsteed [119] mit der Aufgabe "to apply himself with the most exact care and diligence to rectifying the tables of the motions of the heavens, and the places of the fixed stars, so as to find out the so much desired longitude of places for perfecting the art of navigation", sein Gehalt betrug allerdings nur 100 £ im Jahr. Er war deshalb auf einen Nebenerwerb angewiesen und mußte außerdem selber für die nötigen Instrumente und das Hilfspersonal sorgen (moderne Parallele: Drittmittelinwerbung). Er borgte sich zunächst von einem Freund einen Sextanten von 7 Fuß Radius nach der Bauart von Brahe oder Hevelius [120], aber mit Teleskopen mit Fadenkreuz als Visierhilfen, zu dessen Bedienung zwei Beobachter erforderlich waren. Mit diesem Instrument maß er von 1676-1688 die Winkelabstände einer großen Zahl von Sternen, dann baute er auf eigene Kosten mit Hilfe seines erfindungsreichen Assistenten Adam Sharp einen Mauerquadranten von ebenfalls 7 Fuß Radius, der aber über einen viel genaueren Teilkreis verfügte. Damit beobachtete er ab 1689 trotz seiner schwachen Gesundheit unermüdlich die Positionen von Mond, Sonne und Planeten und stellte außerdem einen Katalog von fast 3000 Fixsternen zusammen, die er nach Sternbildern und innerhalb derer nach wachsender Rektaszension ordnete und numerierte, zum Beispiel 61 Cyg. Die Genauigkeit betrug 10" gegenüber 1' des Katalogs von Brahe.

Flamsteed war ein Perfektionist, der fortwährend systematische Verbesserungen der Beobachtungstechnik durchführte und keine Messungen publizierte, wenn sie ihm noch nicht genau genug erschienen. Darüber kam es 1712 zum Streit mit Newton, der ihn drängte, Daten an Halley herauszugeben, und durch seinen Einfluß eine unbefugte Publikation erzwang. Auf die Klage Flamsteeds "Sir Isaac worked with the ore I dug" antwortete dieser "If he dug the ore, I made the gold ring". Flamsteeds Ergebnisse wurden erst 1725, also nach seinem Tode, durch seinen Assistenten Sharp als "Historia Coelestis Britannica" veröffentlicht.

Sein Nachfolger war Edmund Halley (1656-1742) [121]. Er beschäftigte sich schon als Schuljunge mit der Astronomie und veröffentlichte 1676 eine Arbeit über Planetenbahnen, in der er die Beschleunigung des Jupiter und die Verzögerung des Saturn behandelte. Im gleichen Jahr wurde er nach St.Helena (6° südlicher Breite) geschickt, um die Positionen von Sternen am Südhimmel zu messen, und gab 1678 einen Katalog mit 341 Sternen, allerdings von mäßiger Genauigkeit, heraus. Während dieses Aufenthalts machte er auch Pendelbeobachtungen, die die von Richer wenige Jahre vorher in Cayenne durchgeführten bestätigten, und beobachtete einen Merkurdurchgang vor der Sonne.

Er kam 1684 in Kontakt mit Newton, wirkte an der Herausgabe der "Principia" mit und wendete die neue Theorie 1695 auf die Bahnen von Kometen an. In seiner 1705 erschiene-

nen “Synopsis of Cometary Astronomy” untersuchte er 24 Kometen und fand dabei eine auffällige Ähnlichkeit der Bahnelemente der Kometen von 1456, 1531, 1602 und 1682. Er schloß daraus, daß es sich um dasselbe Objekt handelte, und sagte dessen Wiederkehr für etwa 1758 voraus. 1693 entdeckte er durch Vergleich mit antiken Finsternisbeobachtungen die säkulare Beschleunigung des Mondes. Weiterhin schlug er die Bestimmung der Sonnenparallaxe mit Hilfe der Venustransite in den Jahren 1761 und 1769 vor. Eine weitere wichtige Entdeckung Halleys war die der Sonnenchromosphäre anläßlich einer Sonnenfinsternis. 1718 stellte er fest, daß die wohlbekanntesten Sterne Sirius, Prokyon und Arktur ihre Winkelabstände von der Ekliptik seit der Antike und zum Teil sogar schon seit der Zeit Brahens verändert hatten.

“Was sollen wir jetzt sagen: Es ist kaum zu glauben, daß die Alten sich in einer so einfachen Sache getäuscht haben sollten, wobei drei Beobachter übereinstimmen. Da diese Sterne die auffälligsten am Himmel sind, sind sie wahrscheinlich der Erde am nächsten, und wenn sie irgendeine eigenen Bewegung haben, so könnte man sie bei ihnen am wahrscheinlichsten erkennen.”

Damit waren erstmals Eigenbewegungen (“proper motions”) von Sternen an der Himmelsphäre beobachtet worden. Die 1719 berechneten Mondtabellen wurde in ihrer endgültigen Form erst 1752 publiziert. Nach seiner Ernennung 1720 zum Nachfolger Flamsteeds entwickelte Halley keine besonderen Aktivitäten mehr, wozu außer seinem Alter auch der fast vollständige Mangel an Instrumenten beitrug, da die meisten als Eigentum Flamsteeds von dessen Erben entfernt worden waren.

Dritter Astronomer Royal wurde James Bradley (1693-1764) [122]. Neben dem Studium in Oxford betrieb er gleichzeitig Astronomie mit seinem Onkel James Pond, Rektor in Wanstead. 1718 wurde er von der Royal Society zum Fellow ernannt und 1721 Savilian Professor für Astronomie in Oxford. Zwischenzeitlich bezog er gleichzeitig Einkünfte aus zwei Pfarrstellen, die er nach seiner Berufung aufgeben konnte. Die Professur stellte offenbar zeitlich keine starke Belastung dar, denn er blieb bis 1732 in Wanstead und setzte seine Beobachtungen dort fort.

Die Behauptung Hookes, er habe am Stern γ Draconis eine jährliche Parallaxe von mehr als 30” gemessen, brachte Bradley dazu, sie gemeinsam mit seinem Freund Molyneux zu überprüfen. Dieser hatte in Kew einen Zenitsektor mit einem Teilkreis von 24 Fuß Radius aufgebaut. Dabei handelt es sich im Prinzip um einen Meridiankreis, der in beinahe senkrechter Position fest eingestellt ist. Für Sterne, die in diesem kleinen Blickfeld um den Zenit herum kulminieren, lassen sich kleine Veränderungen ihres Abstandes vom Himmelsnordpol beim Meridiandurchgang sehr genau messen. Nach der Berufung von Molyneux zur Admiralität setzte Bradley diese Untersuchungen allein fort. Die Messungen an γ Dra wurden im Dezember 1725 begonnen, und schon im Januar zeigte sich eine Verschiebung, die im Laufe eines Jahres bis auf 40” anwuchs und wieder verschwand. Der Gang mit der Jahreszeit war aber nicht der für eine jährliche Parallaxe zu erwartende, sondern um ein Vierteljahr dagegen verschoben.

Der Versuch, die Erscheinung durch eine Bewegung des Himmelsnordpols (Nutation) zu erklären schlug ebenfalls fehl, da sie auf Sterne auf entgegengesetzten Seiten des Pols auch entgegengesetzt hätte wirken müssen. 1728 erkannte Bradley, daß die Ursache in der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts und ihrer Zusammensetzung mit der wechselnden Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn lag (Radfahren bei Regen!).

Die Erleuchtung soll Bradley bei einer Bootsfahrt auf der Themse gekommen sein, als er sah, daß sich eine Windfahne am Mast trotz gleichmäßigem Wind bei jeder Kursänderung des Bootes drehte.

Damit war erstmals der unmittelbare Beweis für die Kreisbewegung der Erde erbracht. Zugleich konnte der Betrag der Lichtgeschwindigkeit genauer als von Römer bestimmt werden. Da die Aberrationskonstante den Wert $20''{,}47$ hat, muß sie das Zehntausendfache der Erdgeschwindigkeit betragen.

Bradley setzte auch nach dieser Aufklärung des Effektes seine Messungen fort und fand, daß der Stern nach einem Jahr nicht genau zur Ausgangsposition zurückgekehrt war, sondern davon um etwa $2''$ abwich. Diese Verschiebung wuchs in 9 Jahren auf $18''$ an, um dann in gleicher Weise wieder abzunehmen. Es lag also eine zweite Oszillation mit einer Periode von 18 Jahren vor, die mit der der Regression der Mondknoten übereinstimmt. Er deutete sie daher 1748 als eine Nutation ("Nicken") der Erdachse, hervorgerufen durch die wechselnde Anziehung des Mondes, die sich der Präzessionsbewegung überlagert. Genaue himmelsmechanische Rechnungen dazu wurden 1749 von Euler und d'Alembert durchgeführt und bestätigten Bradleys Vermutung.

Während der unmittelbare Meßfehler inzwischen auf die Größenordnung von $1''$ herabgedrückt werden konnte, zeigten diese Beobachtungen, daß alle direkten Messungen vor einem Vergleich mit der Theorie um den Einfluß von Präzession, Aberration und Nutation, der bis zu $30''$ betragen konnte, korrigiert werden mußten, ein Vorgang, der als Reduktion der Beobachtungen bezeichnet wird. Bradley fand keine Zeit, diese Arbeit selbst durchzuführen. Nach seinem Tode entstand ein Streit über die nachgelassenen Beobachtungsjournale zwischen seinen Erben und der Admiralität. Er wurde durch den Kompromiß beigelegt, daß sie der Universität Oxford übereignet wurden, die sie in den Jahren 1798-1805 herausgab, allerdings in unkorrigierter Form. Sie blieben daher für die Wissenschaft von geringem Nutzen, bis 1818 Bessel die Reduktion durchführte und sie als "Fundamenta Astronomiae ex observationibus viri incomparabilis James Bradley" publizierte.

Nach einem kurzen Zwischenspiel von Nathaniel Bliss (1700-1764) wurde Nevil Maskelyne (1732-1811) [123] der nächste Astronomer Royal. Sein Interesse galt insbesondere der der Masse der Erde. Schon Newton hatte durch plausible Annahmen über die Dichteänderung in Abhängigkeit von der Tiefe auf eine mittlere Dichte von $5\text{-}6\text{ g/cm}^3$ geschlossen, für eine direkte Bestimmung war aber die Messung der Gravitationswirkung zwischen zwei irdischen Körpern erforderlich. Sie wird durch die extreme Schwäche der Gravitationswechselwirkung erschwert, die zur Folge hat, daß auch heute noch die Gravitationskonstante von allen Fundamentalkonstanten die mit der größten Unsicherheit behaftete ist. Den ersten ungefähren Wert erhielten 1735 La Condamine und Bouguer bei ihrer Expedition nach Peru aus der Lotabweichung in der Nähe des Chimborasso. Erst Cavendish gelang es 1798 mit seiner Drehwaage, die Messung ins Labor zu verlegen.

Im 18. Jahrhundert wurde auch die Beobachtungstechnik durchgreifend verbessert. Der Fortschritt in der Uhrmacherkunst, sowohl in England (Harrison) als auch in Frankreich (Berthoud, Lepaute) und die damit verbundene Präzision bei der Metallbearbeitung trugen aber in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts auch wesentlich zur Entwicklung des Maschinenbaus und damit zum Entstehen einer mechanischen Industrie ("spinning Jenny") bei, was umgekehrt auf den Bau astronomischer Instrumente zurückwirkte.

Als Halley 1720 Direktor der Sternwarte Greenwich wurde, ließ er auf Regierungskosten neue Instrumente von Graham bauen, dessen Werkstatt auch einen Teil des großen Bedarfs an nautischen Instrumenten, insbesondere Sextanten, deckte. Sein Nachfolger Bradley war

damit nicht mehr zufrieden und ließ von Bird, dem Nachfolger Grahams, einen Meridiankreis von 8 Fuß zur Messung von Rektaszensionen und einen Mauerquadranten von ebenfalls 8 Fuß zur Bestimmung von Deklinationen herstellen.

Es gab aber auch wesentliche Fortschritte auf dem Gebiet der Optik. Newton war der irri- gen Ansicht gewesen, die chromatische Aberration ließe sich grundsätzlich nicht beseitigen, und hatte deshalb sein Spiegelteleskop konstruiert. Praktisch genutzt wurde diese Erfin- dung aber erst ab 1720, als es Short in Edinburgh gelang, Spiegel in reproduzierbarer Weise zu schleifen und zugleich durch Veränderung des Strahlengangs den Nachteil der Beobach- tung von der Seite her zu vermeiden. Trotz ihrer Lichtstärke blieben die Reflektoren jedoch den Amateuren vorbehalten, da man sie nicht leicht mit Teilkreisen verbinden konnte. Die Instrumente der Berufsastronomen waren nach wie vor Refraktoren, trotz deren kleiner Öffnungsverhältnisse, so hatte Bradleys Instrument nur einen Objektivdurchmesser von 10 cm.

Nachdem Newtons Vermutung über die chromatische Aberration experimentell widerlegt worden war, gelang es 1757 John Dollond, durch Kombination von Linsen aus Flint- und Kronglas achromatische Objektive zu bauen. Das führte im folgenden Jahrhundert zu einer enormen Entwicklung bei den astronomischen Fernrohren. Sein Sohn Peter ließ sich die Erfindung patentieren und gründete ein florierendes Unternehmen. Die Objektivdurch- messer blieben zwar auf 3-4 Zoll beschränkt, da man keine größeren Flintglasscheiben gießen konnte, aber auch so waren die Refraktoren den Reflektoren überlegen. Maskelyne ließ daher 1772 durch Ramsden, den Schwiegersohn Dollonds, Bradleys Instrumente mit Achromaten umbauen, wodurch der Fehler bei der Bestimmung des Meridiandurchgangs von einer Drittel- auf eine Zehntelsekunde verringert werden konnte. Ramsden lieferte auch beim Aufbau der Sternwarte in Palermo ein Instrument mit einem Vertikalkreis von 5 Fuß und einem Horizontalkreis von 3 Fuß an Piazzini, der damit von 1792-1802 die Positionen von 6748 Sternen vermaß. Die Fehler betragen nur wenige Bogensekunden. Bradley hatte zwar schon vorher eine größere Genauigkeit erreicht, aber das wurde erste nach der Reduktion durch Bessel klar.

b) Astronomische Expeditionen

Die Astronomie trug nicht nur dazu bei, Reisen auf der Erde über große Entfernungen zu ermöglichen, sondern zog daraus umgekehrt auch Nutzen. Größe und Figur der Erde können nicht durch Beobachtungen an einem Ort allein bestimmt werden, auch ein Teil des Himmelsgewölbes bleibt dort unsichtbar. Es wurden daher, im allgemeinen auf Regie- rungskosten, Expeditionen durchgeführt, die einerseits der Gradmessung, andererseits der Kartierung des Südhimmels dienten.

Bei den schon erwähnten Reisen von Richer 1671 nach Cayenne und Halley 1676 nach St.Helena war bei Pendelbeobachtungen ein Gangunterschied (Verlangsamung) gegenüber Paris um zwei Minuten pro Tag festgestellt worden. Dieser Effekt konnte nicht allein auf die Rotation (Zentrifugalkraft) zurückgeführt werden, sondern mußte auch auf einer Abplattung des Erdkörpers beruhen - in Übereinstimmung mit der Theorie Newtons, aber im Gegensatz zu der der Kartesianer. Eine Entscheidung konnte nur auf Grund von Gradmessungen bei möglichst verschiedenen geographischen Breiten getroffen werden. Bei Abplattung mußte der Meridianbogen, an dessen Enden der Unterschied der Lotrichtungen 1° betrug, zum Äquator hin kleiner werden. 1735 führten Bouguer und La Condamine eine Expedition nach Peru durch und maßen bei Quito (im heutigen Ecuador) eine Bogenlänge von 56753 Toise (Pariser Ellen) gegenüber 57057 bei Paris, was einer Abplattung von $1/279$ entspricht, die dem genauen Wert $1/298.25$ sehr nahe kommt. Noch vor ihrer Rückkehr

1743 waren Maupertuis und Clairaut nach Torneå in Lappland gereist und hatten dort, unter sehr ungünstigen Bedingungen, einen Wert von 75438 Toise, entsprechend einer Abplattung von $1/114$, erhalten, der allerdings ungenau war.

Der Erdradius selbst war schon im Altertum mit recht hoher Genauigkeit bekannt gewesen. Sie wurde 1617 durch Willibrord Snell ("Snellius", 1591-1626) auf 10^{-3} und 1671 durch Picard auf 10^{-6} gesteigert. Auch Entfernung und Radius des Mondes waren mit ähnlicher Genauigkeit bekannt. Im Gegensatz dazu war die Abschätzung der Sonnenentfernung völlig unsicher. Für die tägliche Parallaxe der Sonne hatte Hipparch einen Wert von $2'46''$ angegeben, noch Brahe ging von $3'$ aus, während Kepler auf weniger als $1'$ schloß. Die Wiederholung der Messung des Aristarch von Samos mit Hilfe des Terminators bei Halbmond 1630 durch Vendelinus ergab $15''$.

Eine direkte Messung der Sonnenparallaxe ist nicht einfach durchzuführen, aber da die Radienverhältnisse der Planetenbahnen im Sonnensystem sehr genau bekannt sind, genügt es, die Parallaxe eines Planeten, der der Erde nahekommt, zu messen. Dafür kommen in erster Linie Mars und Venus in Frage. Bei seiner Expedition nach Cayenne hatte Richer anlässlich der Marsopposition von 1672 durch Vergleich mit gleichzeitigen Beobachtungen von Cassini in Paris die Marsparallaxe zu $25''$ gemessen und daraus auf eine Sonnenparallaxe von $9''5$ geschlossen, während Lacaille noch 1751 von $10''5$ ausging.

Halley schlug deshalb 1691 als indirekte Methode die Beobachtung von Venusdurchgängen vor der Sonnenscheibe vor. Dieser Vorgang entspricht in gewisser Weise einer ringförmigen Sonnenfinsternis durch Vorbeigang des Mondes vor der Sonne. Er dauert etwa sieben Minuten, denen allerdings nur eine Winkeldifferenz von $22''$ entspricht, wobei für Beobachter in verschiedenen geographischen Breiten Unterschiede bis zu fünf Minuten auftreten [124]. Bei einer Meßgenauigkeit dieses Zeitintervalls auf wenige Sekunden sollte das Verfahren auf 1% genau sein. Venustransite sind allerdings seltene Ereignisse. Im Abständen von mehr als hundert Jahren treten sie in Paaren mit einem Abstand von acht Jahren auf, die nächsten sollten am 6.6.1761 und am 3.6.1769 stattfinden. Es wurde deshalb in internationaler Zusammenarbeit eine große Zahl von Expeditionen in meist sehr unwirtliche Gegenden entsandt.

Der erste Durchgang war in Asien und in der Nähe des Nordpols sichtbar. Es fuhren: Pingré zur Insel Rodrigues im Indischen Ozean, Chappe d'Auteroche nach Tobolsk in Sibirien, Maskelyne nach St. Helena, Mason und Dixon ("Dixieland"!) zum Kap der Guten Hoffnung, Le Gentil nach Pondicherry in Indien, Pater Hell aus Wien nach Vardö in Norwegen. Der Transit von 1769 war sichtbar wieder in der Nähe des Nordpols, im Pazifik, im westlichen Amerika und in Ostasien. Jetzt fuhren: Pingré nach San Domingo, Chppe d'Auteroche ins (wilde!) Kalifornien, wo er an der Pest starb, Wales zur Hudson Bay, Cook nach Tahiti und Pater Hell wieder nach Vardö. Viele dieser Reisen nahmen einen abenteuerlichen Verlauf. Dazu trug auch der Seekrieg zwischen England und Frankreich bei. Le Gentil kam wegen der Umwege, die er machen mußte, um englischen Kriegsschiffen auszuweichen, 1761 zu spät in Indien an, blieb bis 1769, um dann wegen Wolken nichts zu sehen. Die französische Admiralität hatte dagegen die Order ausgegeben, Captain Cook unbehelligt zu lassen, da er im Dienste der gesamten Menschheit tätig sei. Es ergaben sich bei diesen Expeditionen auch viele Nebeneffekte für andere Wissenschaften wie Geographie und Botanik, so entdeckte La Condamine 1738 den Cinchona-Baum, aus dessen Rinde das Chinin gewonnen wird.

Die Ergebnisse entsprachen allerdings nicht ganz den hochgespannten Erwartungen. Ein- und Austritt der dunklen Venus am Rand der Sonnenscheibe ließen sich bestenfalls auf zehn Sekunden genau festlegen, Länge und Breite vieler Stationen waren ungenau bekannt und

mußten von den Beobachtern selbst, zum Beispiel mit Hilfe der Jupitermonde, bestimmt werden. Es ergaben sich schließlich alle möglichen Werte zwischen $8''55$ und $8''88$, was aber trotzdem eine große Steigerung der Genauigkeit darstellte. Encke leitete aus der Gesamtheit der Beobachtungen einen Wert von $8''571$ ab, der moderne Wert ist $8''79418$ und entspricht einer Entfernung von 149579.9 km.

D5. Stellarastronomie

Lange Zeit beschränkte sich das Interesse der Astronomen auf die Körper des Sonnensystems. Die Fixsterne bildeten nur den Hintergrund für das wesentliche Geschehen, die Bewegung der Planeten und ihrer Monde. Zu deren Festlegung wurden Sternkataloge mit immer höherer Genauigkeit benötigt. Davon unabhängig war das Problem der Entfernung der Fixsterne. Die Vorstellung, sie seien alle an eine Sphäre gebunden, wurde im kopernikanischen System aufgegeben und jedem von ihnen ein individueller Abstand zugeschrieben, der sich bei der jährlichen Bewegung der Erde als Parallaxe bemerkbar machen sollte. Der Versuch ihrer Messung blieb das ganze 18. Jahrhundert hindurch vergeblich, führte aber zur Entdeckung der Aberration, der Nutation und der Eigenbewegung.

Die letztere war eine individuelle Eigenschaft eines Sterns. Schon vorher waren andere gefunden worden, nämlich die Farbe und die Helligkeit. 1596 entdeckte Fabricius den Lichtwechsel von α Cet. Da die Helligkeit von einem Maximum von 3^m in kurzer Zeit bis zur Unsichtbarkeit abnahm, war dieser Stern zunächst als Nova angesehen worden, aber nach seiner Wiederauffindung 1638 stellte man fest, daß die Helligkeit einen Zyklus mit einer Periode von ungefähr 11 Monaten durchläuft. Dieses Verhalten widersprach so sehr der Vorstellung von der Unveränderlichkeit der himmlischen Region, daß der Stern den Beinamen "Mira" erhielt: der Wunderstern. Das Wunder blieb allerdings kein Einzelfall. 1669 wurde die Veränderlichkeit von β Per (Algol) entdeckt, und 1783 bestimmte Goodricke seine Periode zu $2^d 20^h 49^m$, in ihr schwankt die Helligkeit um einen Faktor 4.

Nach der Erfindung des Fernrohrs fand man am Himmel auch nicht-sternartige Objekte, die als Nebel bezeichnet wurden. 1612 wurde der Andromedanebel beschrieben, 1619 der Orionnebel, der zunächst als Komet angesehen wurde. Im Katalog von Messier, den dieser anlegte, um solche Verwechslungen zu vermeiden, erhielten diese beiden Objekte die Nummern M31 und M42. Von den Berufsastronomen wurden sie eher als Kuriositäten angesehen und die Beschäftigung mit ihren Eigenschaften wie mit denen der Fixsterne den Amateuren überlassen, obgleich es gerade die von Galilei begonnene physische (deskriptive) Astronomie gewesen war, die letztlich dem kopernikanischen System zum Durchbruch verholfen hatte. Es blieb daher auch einem von der Last der Tradition freien Autodidakten überlassen, hier wesentliche Fortschritte zu erzielen.

Friedrich Wilhelm Herschel

Herschel wurde am 15.11.1738 in Hannover geboren [125]. Sein Vater war Militärmusiker, und er selbst ergriff 1753 den gleichen Beruf und nahm am Siebenjährigen Krieg teil. Wegen seiner schwachen Gesundheit gab er diese Tätigkeit 1757 auf und ging nach England, das mit Hannover in Personalunion verbunden war. Er ließ sich 1766 in Bath nieder, arbeitete als Orchestermusiker und Organist und war gleichzeitig ein sehr erfolgreicher Musiklehrer mit bis zu 35 Unterrichtsstunden in der Woche. Damit war aber sein Schaffensdrang noch nicht erschöpft. Nach einem Arbeitstag von 14-16 Stunden entspannte er sich durch die Lektüre von Lehrbüchern der Infinitesimalrechnung wie der "Fluxions" von Maclaurin. Über die Mathematik kam er zur Optik und zur Astronomie.

Während die Hauptinstrumente der großen Sternwarten Refraktoren - also Linsenfernrohre - waren, kamen für Amateurastronomen nur Spiegelfernrohre - Reflektoren - in Betracht, denn die Herstellung größerer schlierenfreier Glasblöcke war noch für lange Zeit eine schwierige Aufgabe. Herschel mietete zunächst ein kleines Spiegelteleskop von 2 Fuß Brennweite. Da leistungsfähigere Instrumente für ihn zu teuer waren, begann er 1773 mit

dem Selbstbau. Im Jahr davor hatte er seinen Bruder Alexander und seine Schwester Karoline (1759-1848) nach England geholt. Ursprünglich sollte die letztere eine Karriere als Sängerin beginnen, statt dessen führte sie ihm den Haushalt und half ihm bei seinen astronomischen Unternehmungen. Sie fütterte ihn zum Beispiel beim Spiegelschleifen, das bis zu 16 Stunden ohne Unterbrechung dauern konnte, um thermische Spannungen im Material des Spiegelrohrlings (einer Legierung aus $\frac{2}{3}$ Kupfer und $\frac{1}{3}$ Zinn) zu vermeiden, und hielt ihn durch Vorlesen wach, etwa des "Don Quichotte" oder der "Erzählungen aus 1001 Nächten".

Nach vielen Fehlversuchen beobachtete er 1774 mit seinem ersten brauchbaren Teleskop von 7 Fuß Brennweite den Orion-Nebel und begann damit seine astronomische Tätigkeit, blieb aber im Hauptberuf Musiker und arbeitete in den Pausen zwischen den Akten an seinen geliebten Instrumenten. Wegen der extremen Sorgfalt, die er beim Schleifen und Polieren der Spiegel anwendete, übertrafen seine Teleskope, wie sich beim direkten Vergleich zeigte, die von Greenwich an Auflösungsvermögen bei weitem. Hinzu kam, bedingt durch ihre Größe, eine gewaltige Steigerung der Helligkeit und der Vergrößerung auf das 200- bis 6000-fache. Sein Hauptinstrument war ein Reflektor von 20 Fuß Brennweite mit zwei Spiegeln von 12' und 19' Durchmesser. Mit ihm bestimmte er in den Jahren 1777-1781 die Rotationsdauern von Mars und Jupiter sowie die Höhe der Mondberge.

Sein Hauptinteresse galt aber den Fixsternen. Er schlug daher der Royal Society vor, zur Bestimmung der jährlichen Parallaxe eines Sterns statt der direkten Positionsbestimmung die wesentlich genauere Messung des Abstandes zu einem schwachen (und daher wahrscheinlich weit entfernten) Nachbarstern. Er begann mit einer Durchmusterung des Sternhimmels mit seinem 7 Fuß-Reflektor auf der Suche nach hellen Sternen mit einem schwachen Begleiter. Dabei entdeckte er am 13.3.1781 in der Nähe von α Geminorum ein ungewöhnlich helles Objekt, das er zunächst für einen Kometen hielt, da es einen endlichen Scheibendurchmesser zeigte und sich längs der Ekliptik bewegte. Er teilte seine Entdeckung dem "Astronomer Royal" Maskelyne mit, und es begann eine genaue Beobachtung des Objekts durch eine Reihe von Astronomen. Die Bahnberechnung nach einigen Monaten ergab aber näherungsweise eine Kreisbahn mit dem 19-fachen des Erdbahnradius. Es handelte sich also um einen Planeten in der doppelten Entfernung des Saturn, den ersten, der in historischer Zeit gefunden worden war.

Diese Entdeckung machte Herschel auf einen Schlag international berühmt. Er wurde "Fellow of the Royal Society" und erhielt ihre Goldmedaille, nachdem sich vorher einige Mitglieder lange seiner Aufnahme widersetzt hatten. Der König setzt ihm ein Ehrengeld von jährlich 200 £ aus, so daß er den Musikunterricht einstellen konnte. Für den Unterhalt der Familie reichte es allerdings nicht aus, und er mußte sich weiterhin durch das Schleifen und den Verkauf von Fernrohrspiegeln ein Zusatzeinkommen verschaffen. Von den 70 Exemplaren, die er bis 1795 verkaufte, hat nur eines zum Fortschritt in der Astronomie beigetragen: ein 7 Fuß-Teleskop für den Amtmann Schroeter in Lilienthal bei Bremen. Seine Dankbarkeit gegenüber dem König zeigte er dadurch, daß er dem neuen Planeten den Namen "Georgium Sidus" gab - ähnlich wie Galilei die "Mediceischen Gestirne" nach seinem Gönner benannte - aber der Name wurde außerhalb Englands nicht angenommen. Dort setzte sich neben dem Vorschlag "Herschel" schließlich der Name "Uranus" durch.

1786 zog die Familie nach Slough bei Windsor um, wo Herschel mit Unterstützung des Königs ein noch größeres Instrument mit 40 Fuß Brennweite und 59' Durchmesser aufbaute [xxx]. Arago nannte Slough später "le lieu du monde, ou il a été fait le plus de découvertes". Die meisten dieser Entdeckungen wurden aber mit dem 20 Fuß-Reflektor gemacht, da der Umgang mit dem Rieseninstrument mit seinen Balken, Seilen und Flaschenzügen in Höhen

bis zu 15 m offenbar zu mühselig und gefährlich war, außerdem verformte sich der Spiegel unter seinem Eigengewicht. Herschels finanzielle Probleme endeten 1788 dadurch, daß er eine Dame von beträchtlichem Vermögen heiratete. Karolines Tätigkeit beschränkte sich danach auf die unermüdliche Mithilfe, sowohl bei den nächtlichen Beobachtungen als auch bei der Auswertung am Tage.

Am 11.1.1787 entdeckte Herschel mit dem umgebauten 20 Fuß-Instrument zwei Satelliten des Uranus, Oberon und Titania, am 28.8.1789 mit dem großen Reflektor - am ersten Abend nach dessen Fertigstellung - den sechsten Mond des Saturn, Enceladus, und am 17.9. des gleichen Jahres den wesentlich schwächeren siebenten, Mimas. Die weiteren Untersuchungen wurden aber mit dem kleineren Instrument durchgeführt, so die Beobachtung von Sonnenflecken, von Ring und Streifen des Saturn und die Entdeckung der weißen Polkappen des Mars, da der Zustand des Riesenteleskops sich ständig verschlechterte. Es wurde daher 1811 außer Betrieb genommen und 1839 abgebrochen, nachdem es jahrelang ein Anziehungspunkt für zahlreiche Besucher gewesen war.

1801 reiste Herschel nach Paris, um mit Laplace zusammenzutreffen und sah auch Napoleon, dessen astronomische Kenntnisse er allerdings als gering einschätzte: "Er versucht den Eindruck zu erwecken, er wisse mehr als er weiß". Nach seiner Erkrankung 1818 war er kaum noch in der Lage, Beobachtungen durchzuführen, aber noch 1821, ein Jahr vor seinem Tode am 21.8.1822, legte er der Royal Society einen Katalog von Doppelsternen vor.

Sein Sohn John wurde ebenfalls ein bekannter Astronom, noch berühmter aber war seine Schwester Karoline, die erste Frau, die wesentliche Beiträge zur Astronomie geliefert hat, unter anderem durch die Entdeckung von acht Kometen, womit sie viele Jahre einen Rekord hielt. Nach dem Tode ihres geliebten Bruders kehrte sie nach Hannover zurück, katalogisierte die von ihm entdeckten Nebel und machte noch bis wenige Jahre vor ihrem Tode Beobachtungen.

Trotz der bedeutenden Entdeckungen im Sonnensystem war das Hauptarbeitsgebiet Herschels die Welt der Fixsterne, von denen die Sonne nur einer unter vielen ist. Um den Aufbau und die Dimensionen dieses Systems zu erkennen, waren vor allem Entfernungsbestimmungen erforderlich. Herschel untersuchte deshalb im Hinblick auf die Parallaxenbestimmung Doppelsterne und veröffentlichte 1782 einen Katalog mit 269, 1784 einen weiteren mit 434 Objekten. Darunter fanden sich viel mehr enge Paare, als es bei einer zufälligen Verteilung der Sterne über die Himmelsphäre der Fall gewesen wäre. Der hellste Stern in den Zwillingen, Castor, erwies sich zum Beispiel als ein Doppelstern, dessen Komponenten A und B einen Abstand von nur 5" hatten. Da im untersuchten Ensemble etwa 50 Sterne vom Typ A und 400 vom Typ B enthalten waren, ergab sich schon für das zufällige Auftreten einer so engen Kombination eine Wahrscheinlichkeit von 1:300000, tatsächlich wurden aber Hunderte gefunden. Daraus mußte man schließen, daß es neben den optischen Paaren, die bei sehr verschiedener Entfernung zufällig in der gleichen Richtung stehen, auch viele physische Doppelsterne gibt, die durch die Gravitation aneinander gebunden sind und sich umeinander bewegen. Diese Bewegung war schon 1784 von Michell behauptet worden und zeigte sich auch direkt bei der Wiederholung der Beobachtungen in den Jahren 1803 und 1804. Herschel fand, daß sich bei etwa 50 dieser Systeme die Richtung der Verbindungslinie gedreht hatte und erhielt zum Beispiel für Castor A und B eine Umlaufdauer von 342 Jahre, der moderne Wert beträgt 420 Jahre. Wenn auch die Meßgenauigkeit noch nicht zur Bestimmung der Bahnen ausreichte, das war erst 1827 der Fall, so zeigte sich doch schon die universelle Gültigkeit des Gravitationsgesetzes.

Die ursprüngliche Hoffnung Herschels, mit Hilfe von Doppelsternen Fixsternparallaxen

messen zu können, hatte sich also nicht erfüllt, da bei den häufigen physischen Paaren sich beide Sterne in gleicher Entfernung befinden. Dafür hatte er aber eine Entdeckung gemacht, die für ihn weit wichtiger war. Er war, wie er selbst sagte, wie Saul ausgegangen, seines Vaters Esel zu suchen, und hatte ein Königreich gefunden.

Sein nächster Versuch zielte darauf ab, nicht die jährliche Bewegung der Erde, sondern die der Sonne unter den Fixsternen zu finden. Wegen der wechselseitigen Gravitation kann sich ein System von Sternen nämlich nicht im Gleichgewicht befinden, sondern seine Mitglieder müssen relativ zueinander Bewegungen ausführen. In den schon von Halley entdeckten Eigenbewegungen sollte daher neben dem zufälligen auch ein systematischer Anteil enthalten sein, der die Sonnenbewegung widerspiegelt und den Herschel die systematische Parallaxe nannte. Diese Idee war schon vorher von Thomas Wright, Lambert und Tobias Mayer vertreten worden, aber das Datenmaterial hatte zur Durchführung nicht ausgereicht. Es müßte dann in der Bewegungsrichtung der Sonne einen Punkt geben, dem alle anderen Sterne im Mittel zustreben und den Herschel den "apex" der Sonnenbewegung nannte und ebenso einen Gegenpunkt, den "antapex". Aus Beobachtungsdaten von Maskelyne folgerte er, daß der Apex im Sternbild Herkules liegen müsse und schätzte sogar die Geschwindigkeit der Sonne ab. Sein Verfahren konnte nicht erfolgreich sein, weil er irrtümlich annahm, alle Sterne hätten die gleiche Leuchtkraft, während diese in Wirklichkeit um einen Faktor 100000 variiert. Moderne Beobachtungen haben aber ergeben, daß er zufällig dem richtigen Punkt recht nahe kam, der wirklich im Sternbild Herkules bei der Rektaszension $18^h 4^m$ und der Deklination 34° liegt, während die Geschwindigkeit der Sonne bei ihrem Umlauf um das Milchstraßenzentrum 20 km/s beträgt.

Damit war der Aufbau des Sternsystems angesprochen, unter anderem die Frage, ob es sich um die bloße Ansammlung einzelner Sonnensysteme oder eine übergeordnete Struktur handelt. Auch diese Problem war schon 1750 von Thomas Wright, 1755 von Kant und 1761 von Lambert behandelt worden.

Auf eine umfassende Struktur deutete die ungleichmäßige Verteilung der Sterne am Himmel hin, insbesondere die Milchstraße, die Herschel 1784 weitgehend in Einzelsterne auflösen konnte. Zur Entfernungsbestimmung wählte er, da keine direkten Parallaxen gefunden werden konnten, als Kriterium wieder die Helligkeit der Sterne. Dazu entwickelte er die Methode der Sterneichungen. Er teilte den Himmel in 683 Felder ein und zählte in jedem die Anzahl der Sterne der verschiedenen Größenklassen. Die Ungleichmäßigkeit der Verteilung interpretierte er als unterschiedliche Ausdehnung des Systems und leitete daraus eine mühlsteinförmige Gestalt der "Weltinsel" her. Ihm war dabei von Anfang an klar, daß die Voraussetzung gleicher Leuchtkraft für alle Sterne nicht zutreffen konnte und daß außerdem die starke Anhäufung von Sternen in bestimmten Richtungen nicht einen "Stachel" weit in den Raum hinaus, sondern einen echten Sternhaufen bedeuten mußte. Um 1817 gab er die Annahme, alle Sterne seien gleich hell, endgültig auf und schloß aus seinen Sternzählungen auf eine Überhäufigkeit schwacher Sterne.

Durch die Diskussion der Rolle von Sternhaufen wurde gleichzeitig eine andere Frage berührt, nämlich die nach der Natur der Nebel. Schon 1781 hatte der "Kometenjäger" Messier seinen Katalog von 103 Nebeln zusammengestellt, um Fehlmeldungen von Kometen durch Verwechslung mit diesen zu vermeiden. Herschel erweiterte die Sammlung auf 1000 Objekte, die er nach ihrem Aussehen in acht Klassen einteilte. Zunächst ging er dabei von der Annahme aus, daß sie sich bei genügend hoher Auflösung als Sternhaufen in großer Entfernung darstellen würden, also als "Weltinseln", wie schon Kant 1755 vermutet hatte, und meinte, er habe 1500 neue Universen entdeckt. Als er aber später auch Objekte mit in einem Stern im Zentrum fand, änderte er seine Ansicht und betrachtete zumindest

eine Reihe von ihnen als eine Art leuchtender Flüssigkeit. Es gab daneben auch Gebilde ähnlicher Art, in denen er keinen Zentralstern finden konnte und die ihn an Nordlichter oder elektrische Entladungen erinnerten. Da sie oft, wie Planeten, als grünliche Scheibchen erschienen, nannte er sie "planetarische Nebel". Bei allen diesen Objekten nahm er an, daß sie zu unserer eigenen Weltinsel, dem Milchstraßensystem, gehörten. Darin bestärkte ihn auch ihre Häufung zur Mitte der Milchstraße hin, für die es sonst keinen plausiblen Grund gegeben hätte. Die Vielfalt ihrer Formen deutete er als verschiedene Altersstufen, wobei er vermutete, daß Sterne aus solchen Wolken entstehen könnten.

Herschels Ideen von einer Vielzahl von Weltinseln mit Millionen von Sternen und ihrer zeitlichen Entwicklung standen im Einklang mit dem kritischen Rationalismus in Kontinentaleuropa. Dem zwar freiheitlichen, aber konservativen Denken im England dieser Zeit waren sie jedoch fremd und fanden auch bei der Royal Society eine kühle Aufnahme. Dazu trug bei, daß die führenden Universitätslehrer Mitglieder der Kirchenhierarchie waren und an der fundamentalistischen Tradition festhielten.

Im Zusammenhang mit der Helligkeit eines Sterns als Kriterium für seine Entfernung stellte sich auch die Frage nach ihrer Veränderlichkeit. Schon in seiner Abhandlung in den "Philosophical Transactions" von 1780 hatte Herschel sich mit der Variabilität von Mira (o Ceti) beschäftigt. Später entwickelte er zur Messung von Helligkeitsänderungen die Methode der Sequenzen, bei der der untersuchte Stern in eine Reihe von Standardsternen eingeordnet wurde. Dabei fand er die Veränderlichkeit von α Herculis mit einer Periode von 60 Tagen und deutete sie, wie den Lichtwechsel des Saturnmonds Iapetus, als Rotationseffekt bei einer Oberfläche mit ungleichmäßiger Helligkeit.

Seine Beschäftigung mit den Sonnenflecken veranlaßte ihn zur Aufstellung einer Theorie über den Aufbau der Sonne, die bis in das 20. Jahrhundert weite Verbreitung fand (Staus-Bühren-Fonds). Danach ist ihr Inneres ein kalter, dunkler, fester Körper, der von zwei Wolkenchichten umgeben wird, einer äußeren, der Photosphäre, die das Sonnenlicht abstrahlt, und einer inneren, die zur Abschirmung dient. Sonnenflecken sind dann Löcher in diesen Wolken, durch die man das Innere sieht. Ein solches System ist allerdings thermodynamisch unmöglich, was Herschel aber noch nicht wissen konnte. Er nahm sogar an, daß der dunkle Sonnenkörper, ebenso wie alle Planeten, von Lebewesen bevölkert sei. Das gab später Anlaß zu einer Presse-Ente, wonach er mit seinem großen Teleskop Menschen auf dem Mond entdeckt habe.

Sein Epitaph trägt die Inschrift:

"Coelorum perrupit claustra" - "Er durchbrach die Riegel der Himmel".

Bei Herschel findet sich zum ersten Mal, wenn man von der Spekulation Newtons über den wiederholten Eingriff des göttlichen "Uhrmachers" in das Sonnensystem absieht, die Vorstellung formuliert, daß das Universum nicht unveränderlich ist, sondern auch die Himmelskörper eine zeitliche Entwicklung zeigen. Diese neue Weltsicht am Beginn des 19. Jahrhunderts war nicht auf die Astronomie beschränkt, sondern fand sich auch in der Geologie (Katastrophentheorie von Cuvier, mehrfache "Schöpfung") und der Biologie (Evolutionstheorie von Agassiz und später Darwin), aber ebenso in der Philosophie (Hegel) und in der Gesellschaftswissenschaft (Marx).

In der Astronomie stellten unabhängig voneinander Laplace und Kant [126] Spekulationen über den Ursprung und die Entwicklung des Sonnensystems an. Nach ihrer Nebularhypothese ist es aus einem Gasnebel entstanden, der sich unter dem Einfluß der wechselseitigen Gravitation seiner Teilchen zusammenzog. Er begann dabei zu rotieren und plattete sich

daher zu einer flachen Scheibe ab, in deren Mittelpunkt sich zunächst die Ursonne bildete. Aus weiteren sich von ihr ablösenden Gasringen entstanden dann die Planeten, wodurch auch erklärt ist, warum sie sich alle in der gleichen Ebene und im gleichen Drehsinn auf fast kreisförmigen Bahnen um die Sonne bewegen. Der Newtonsche Gottesbeweis wird dadurch ad absurdum geführt.

Die Überlegungen von Kant und Laplace stimmen weitgehend mit den modernen Anschauungen über die Entwicklung des Sonnensystems überein, waren aber zu dieser Zeit reine Spekulationen, die sich weder aus der Beobachtung noch aus der Theorie begründen ließen. Während die ersten Phasen bis zur Scheibenbildung und der Kontraktion der Sonne heute theoretisch verstanden sind, gilt das für die Details der Planetenentstehung noch immer nicht. Es ist zum Beispiel unklar, ob es sich bei dem sogenannten Gesetz von Titius-Bode, wonach die Abstände der Planeten, gemessen in Erdbahnradien, sich aus der Folge

$$a_n = 0.4 + 0.3 \cdot 2^n \quad , \quad n = -\infty, 0, 1, 2, \dots$$

ergeben, um eine wirkliche Gesetzmäßigkeit oder eine zufällige Übereinstimmung handelt.

D6. Astronomie im 19. Jahrhundert

Die französische Revolution stellte den Abschluß des Jahrhunderts der Aufklärung dar und erzeugte bei vielen Zeitgenossen das Gefühl, den Höhepunkt der gesellschaftlichen, aber auch der wissenschaftlichen Entwicklung fast erreicht zu haben. Der Astronomiehistoriker Bailly, der später während der Revolution als Vorsitzender der "Constituante" eine bedeutende Rolle spielte, meinte 1782 zum Beispiel, daß die Leistungen Bradleys kaum noch übertroffen werden könnten und mit seiner Meßgenauigkeit von 1" die Grenze des Möglichen erreicht sei.

Das erwies sich bald als eine Täuschung. Der technische Fortschritt, gekennzeichnet durch die Einführung der Dampfmaschine, des mechanischen Webstuhls und der Eisenbahn, löste die industrielle Revolution aus. Statt der Landwirtschaft wurde die Industrie vorherrschend, Fabriken verdrängten das Handwerk. Das kapitalistische Wirtschaftssystem ließ das Bürgertum statt des Adels zur herrschenden Gesellschaftsschicht aufsteigen, für die neben dem praktischen Nutzen auch die Abkehr von der Tradition, freiere Denkart, Fortschritt und Aufklärung wichtige Beweggründe waren. Dazu gehörte auch die Förderung der Wissenschaften, einschließlich der Astronomie, um ihrer selbst willen, die Grundlagenforschung. Durch Bürgerinitiativen kam es sogar zur Gründung von Sternwarten, wie 1844 des Harvard Observatory in Boston.

Der bedeutendste Philosoph der Aufklärung war Immanuel Kant (1724-1804) [121], dessen Interesse auch der Astronomie und insbesondere der Kosmologie galt, wie seine 1755 erschienene Abhandlung "Naturgeschichte und Theorie des Himmels. Versuch, das Weltgebäude nach Newtonschen Prinzipien zu erklären" zeigt. Seine Schriften zur Naturphilosophie stellen deren Höhepunkt dar, machen auch die Grenzen sichtbar, die dem Versuch gesetzt sind, die Naturgesetze durch reines Denken, also ohne Rückgriff auf die Erfahrung, zu erkennen. Kants Betrachtungen über Raum, Zeit und Bewegung waren zwar logisch, aber im wesentlichen metaphysisch. So war er der Ansicht, der absolute Raum und die absolute Zeit seien a priori-Kategorien, von denen der Mensch sich nicht lösen könnte, was durch Einstein 1905 eindrucksvoll widerlegt wurde.

Zur Aufklärung und zum Rationalismus entstanden schon am Ende des 18. Jahrhunderts Gegenströmungen. Dazu zählt die Klassik, deren bedeutendster Vertreter Goethe zwar die Erfahrung durchaus hochschätzte, aber ihre Mathematisierung ablehnte und sich in einen aussichtslosen Kampf gegen Newtons Spektraltheorie des Lichts verannte. Auf religiösem Gebiet entstand der fundamentalistische Pietismus, der bei seiner Wendung zum Innerlichen die naturwissenschaftlichen Erkenntnisse verdrängte.

Die wichtigste Gegenbewegung war aber die Romantik, die vergangenheitsbezogen das Mittelalter verklärte und die Naturwissenschaft ablehnte. Während sie auf literarischem und musikalischem Gebiete große Leistungen hervorbrachte, blieb sie auf dem der Wissenschaft in fruchtlosen metaphysischen Spekulationen und Wortgeklingel verfangen. Der bedeutendste Vertreter dieser spekulativen Naturphilosophie neben Schelling war G.W.F.Hegel (1770-1831) [127]. Er habilitierte sich 1801 in Jena mit der Schrift "Philosophische Erörterung über die Planetenbahnen", in der er Newtons Theorie als absurd darzustellen versuchte und den Aufbau des Sonnensystems ohne Bezug auf Beobachtungen allein durch logisches Denken herleiten zu können glaubte. So leitete er aus der Verlangsamung der Pendelschwingung am Äquator eine Vergrößerung der Schwerebeschleunigung und eine verlängerte (zigarrenförmige) Figur der Erde ab, ohne zu bemerken, daß diese Vorstellung schon vor Jahrzehnten aufgegeben worden war.

Sein "Beweis" des dritten Keplerschen Gesetzes liest sich so:

"In dieser Sache findet sich noch ein Unterschied: Der Unterschied zweier Körper wird entweder tatsächlich aufgehoben oder bleibt, das heißt aus ihnen wird entweder ein realer oder ein idealer Körper. Jenes geschieht durch den freien Fall, dieses durch die Kreisbewegung. Im Fall wird einfach das Element des Quadrates durch die Summe der Zeiteinheiten oder eine Linie dargestellt, die in ein festes, aber willkürliches Maß unterteilt und in Zahlen ausgedrückt wird; bei der Kreisbewegung, durch die der ideale Körper erzeugt wird, bleibt hingegen der Unterschied zwischen den Körpern und daher auch in gewisser Hinsicht zwischen Zeit und Raum bestehen; davon bewirkt jener die Periode, diese aber die Entfernung der Körper: Doch muß man die Zeit mit dem Raum zusammenfassen, der von dem Körper durchlaufen wird und mit dem Raum der Entfernung einen Winkel bildet, und diese Synthese, die die Größe der Bewegung bewirkt, ist das Quadrat selbst. So gibt es zwei Elemente dessen, was man die Materie der Bewegung nennt und was das ganze Verhältnis zweier sich umeinander bewegnender Körper ausdrückt, die Entfernungslinie und das Bewegungsquadrat: Daher wird die Größe des Ganzen, das sich aus diesen beiden Elementen zusammenfügt, der Würfel oder der Körper sein. Und weil ja die Schwere immer ein und dieselbe ist, so ist der Würfel, wie ich meine, aller Planeten der gleiche. Daraus ergibt sich leicht jenes berühmte Gesetz von Kepler."

Bekannt, besser gesagt berüchtigt, wurde seine in der gleichen Schrift aufgestellte Behauptung, die Zahl und Anordnung der Planeten im Sonnensystem ließe sich durch Nachdenken allein festlegen, und die Suche der Astronomen nach einem weiteren Planeten zwischen Mars und Jupiter, entsprechend dem Gesetz von Titius-Bode, sei unsinnig.

Ausgehend von einer Zahlenreihe im Timäus von Plato, nach der der Demiurg bei der Erschaffung der Welt vorgegangen sein soll, kommt Hegel durch eine Reihe wenig überzeugender Schlüsse zu dem Resultat, daß die Gesamtzahl der Planeten denotwendig sieben sein müsse. Im gleichen Jahr wurde aber von Piazzi in Palermo der Kleinplanet Ceres in der Lücke zwischen Mars und Jupiter entdeckt. Darauf bezieht sich der (fiktive) "Hegel-Dialog":

Hegel: Es kann nur sieben Planeten geben.

Astronom: Dem widersprechen aber die Tatsachen.

Hegel: Um so schlimmer für die Tatsachen!

der für die Denkweise der idealistischen Philosophie kennzeichnend ist.

Der Spuk der spekulativen Naturphilosophie eines Hegel und Schelling blieb im wesentlichen auf Deutschland beschränkt, wo er am Beginn des 19. Jahrhunderts die philosophischen Fakultäten beherrschte und zu einem Rückstand gegenüber der Entwicklung der Naturwissenschaft im Ausland führte. Als Reaktion darauf kam es in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts zu einer Ablehnung fast aller Naturphilosophie und Metaphysik in der Naturwissenschaft, speziell in der Physik. Das anfängliche Mißtrauen gegenüber der Arbeit von Robert Julius Mayer über die Energieerhaltung war zu einem erheblichen Teil darauf zurückzuführen, daß er, da er nicht in der Lage war, zu experimentieren, sein intuitiv erkanntes Gesetz aus allgemeinen Denkprinzipien wie "Causa aequat effectum; ex nihilo fit nihil, nihil fit ad nihilum" zu beweisen versuchte, was natürlich unmöglich ist.

Der technische Fortschritt, insbesondere bei der Metall- und Glasbearbeitung, führte zunächst in England und Frankreich, ab der Mitte des Jahrhunderts auch in Deutschland, zur Perfektionierung der Teleskope und zum Entstehen spezieller Werkstätten, die sich mit ihrer Herstellung befaßten. So wurde 1802 in Hamburg die Firma Repsold gegründet, 1804 in München die von v.Reichenbach. Gewöhnlich begannen sie mit dem Bau

von Instrumenten für die Geodäsie (Theodoliten) und die Navigation (Sextanten) und gingen dann zu größeren Aufgaben über. In Deutschland spezialisierte man sich insbesondere auf den Bau von Meridiankreisen, die die ungefügten Mauerquadranten ablösten und trotz kleinerer Abmessungen Beobachtungen mit erheblich höherer Genauigkeit erlaubten. Dazu trug auch die Verbesserung der optischen Bauteile bei, nämlich der mit Achromaten versehenen Fernrohre und der Ablesemikroskope an den Teilkreisen. Mit Mikrometern und beweglichen Fadenkreuzen erreichte man so Ablesegenauigkeiten von $0''.06$ bei der Rektaszension und $0^s.06$ bei der Durchgangszeit.

Die großen und häufig nicht übereinstimmenden Datenmengen, die auf diese Weise gewonnen wurden, machten die Lösung eines anderen Problems immer drängender, nämlich das der Auswahl "bester" Daten ohne Einseitigkeit und Willkür. Das war eine der Aufgaben für die sich entwickelnde Wahrscheinlichkeitsrechnung, die in ihren Anfängen schon auf Huygens und Halley zurückging und an deren Vervollkommnung wesentlich Laplace, Legendre und Gauß beteiligt waren. Während für eine einzige Variable der Mittelwert als wahrscheinlichster Wert angenommen werden kann und die zufälligen Abweichungen durch eine Gauß-Verteilung beschrieben werden, läßt sich dieses Verfahren nicht ohne weiteres auf den Fall mehrerer Variablen ausdehnen. Hierzu dient die Methode der kleinsten Quadrate, die ebenfalls auf Gauß zurückgeht. Sie wurde von Legendre 1806, von Gauß erst 1809 publiziert, aber schon zwanzig Jahre früher erfunden und benutzt, und gestattet eine willkürfreie Bestimmung der wahrscheinlichsten Werte und ihrer Fehler ("root mean square", r.m.s.).

Carl Friedrich Gauß (1777-1855) [128] vollbrachte seine größten Leistungen auf dem Gebiet der Mathematik, für die er schon früh Interesse und Begabung zeigte.

Als in der Grundschule der Lehrer, um die Kinder für einige Zeit zu beschäftigen, ihnen die Aufgabe stellte, alle Zahlen von 1 bis 100 aufzuaddieren, war Gauß damit sehr schnell fertig. Er hatte aus $1+100=2+99=\dots=50+51=101$ auf $50 \cdot 101=5050$ als Summe geschlossen. Noch als Jugendlichen gelang ihm die Konstruktion des regulären Siebzehnecks mit Zirkel und Lineal, weshalb die Basis des Gauß-Denkmal in Göttingen die Form eines Siebzehnecks hat.

Anlässlich der von ihm durchgeführten Landesvermessung im Herzogtum Hannover stellte er Überlegungen zur nichteuklidischen Geometrie an, veröffentlichte sie aber nicht, da er "das Geschrei der Böötier" fürchtete. Sie war dann Gegenstand der berühmten Habilitationsschrift seines Schülers Bernhard Riemann mit dem Titel "Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen". In der Physik lieferte Gauß wesentliche Beiträge zur Optik (Gaußsche Dioptrik, Konstruktion optischer Instrumente) und, zusammen mit Weber, zum Elektromagnetismus und Erdmagnetismus. Von großer Bedeutung für die Astronomie war seine Methode, aus drei beliebigen vollständigen Beobachtungen die sechs Bahnelemente eines Planeten zu berechnen, die er 1809 als "Theoria motus corporum caelestium" veröffentlichte. Sie benötigte keine Beobachtungen über mehrer Umläufe und erlaubte ihm 1802, die Bahn des verlorengegangenen Kleinplaneten Ceres so genau zu bestimmen, das er wiederentdeckt werden konnte.

a) Positionsastronomie

Die Methode der kleinsten Quadrate wurde 1835 von Encke auf die Bestimmung der Sonnenparallaxe aus Venusdurchgängen angewendet. Unter Berücksichtigung der genaueren Koordinaten für einige der Beobachtungsorte (Hudson Bay, Tahiti, Orenburg, Peking) erhielt er als gewichteten Mittelwert $8''.57 \pm 0.04$. Dieser diente fünfzig Jahre lang als

Standard, seine Genauigkeit war aber wesentlich geringer als angenommen, da das Verfahren nur zufällige, aber keine systematischen Fehler berücksichtigte. Hansen in Gotha erhielt 1863 aus Störungen der Mondbewegung $8''.92$, Leverrier aus der Störung der Bahnen von Venus und Mars durch die Erde $8''.95$. Es gab aber auch Gegenargumente aus der Physik. Aus der Aberrationskonstanten von $20''.44$ ergab sich mit der Bahngeschwindigkeit nach Encke die Lichtgeschwindigkeit zu 308000 km/s, während Fizeau 1849 und Foucault 1862 einen Wert von 298000 km/s gemessen hatten, der einer Sonnenparallaxe von $8''.8$ entsprach.

Neue Beobachtungen anlässlich der Marsopposition 1862 ergaben $8''.93 - 8''.8$, eine neue Auswertung des Venustransits von 1769 führte zu $8''.83$ und die Beobachtung der Venustransite vom 8.12.1874 und 6.12.1882 durch zehn deutsche Expeditionen, die erst zwanzig Jahre später ausgewertet waren, zu Werten von $8''.76$ (Airy) und $8''.88$ (Auwers). Aus der Marsopposition von 1877 erhielt man $8''.78$ und aus der Beobachtung der Kleinplaneten Iris, Victoria und Sappho in den Jahren 1884 und 1888, nach einem Vorschlag von Galle 1872, den Wert $8''.802$. Gleichzeitig ergab sich aus der Messung der Lichtgeschwindigkeit von Michelson und Newcomb zu 299860 km/s die Sonnenparallaxe zu $8''.80 \pm 0.01$. Die Entdeckung 1898 des Kleinplaneten Eros, der der Erde noch wesentlich näher kommt, ermöglichte 1901 Hinks die Bestimmung zu $8''.807 \pm 0.003$ und Jones 1942 zu $8''.790 \pm 0.001$. Der moderne Wert ist $8''.796$, und die Sonnenparallaxe, beziehungsweise der Radius der Erdbahn, die astronomische Einheit, gehört mit 149597870 km heute zu den am genauesten bekannten Größen.

Mit der Messung der Sonnenparallaxe war die Dimension des Sonnensystems festgelegt, es fehlte aber immer noch die Beobachtung von Fixsternparallaxen, um die Ausdehnung des Weltsystems zu bestimmen. Auf jeden Fall mußten die Abstände der Sterne sehr groß gegenüber den Abmessungen des Sonnensystems, charakterisiert durch die astronomische Einheit, den Radius der Erdbahn, sein. Meßbare Parallaxen waren daher nur für sehr nahe Sterne zu erwarten. Als Kriterium für die Nähe bot sich zunächst die scheinbare Helligkeit an, aber schon Herschel hatte erkennen müssen, daß die Leuchtkraft von Stern zu Stern stark variierte, wie man heute weiß bis zum Millionenfachen. Als zuverlässiger Hinweis kann die von Halley entdeckte Eigenbewegung dienen, die durch die Erstellung genauer Sternkataloge inzwischen für viele Sterne bekannt war. Auf diese Weise gelang Bessel 1838 die erste Messung der jährlichen Parallaxe eines Fixsterns an 61 Cyg, einem Stern 5. Größenklasse mit einer Eigenbewegung von $5''.2$ /Jahr. Damit war der endgültige Beweis für die Richtigkeit der heliozentrischen Hypothese von Kopernikus erbracht, an der zu diesem Zeitpunkt allerdings ohnehin niemand mehr zweifelte.

Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) wurde in Minden geboren [129]. Er war schon früh ein begeisterter Rechner. Da er aus kleinen Verhältnissen kam, wurde er zunächst Lehrling in einem Bremer Handelshaus und kam dadurch in Berührung mit der Navigation, die er durch Selbstunterricht erlernte. Der Bau eines Sextanten erweckte sein Interesse für die Astronomie. Eine Berechnung der Bahn des Halleyschen Kometen schickte er an Olbers, der als Arzt und Liebhaberastronom in Bremen wirkte. Dieser verschaffte ihm eine Stellung als Assistent an der Privatsternwarte Lilienthal des Amtmanns Schroeter, die über ein Spiegelteleskop von Herschel verfügte. 1807 erhielt er den Preis der Pariser Akademie der Wissenschaften für die Berechnung einer Kometenbahn, 1810 wurde als Professor der Astronomie nach Königsberg in Preußen berufen und leitete dort den Neubau der Sternwarte, der 1813 vollendet war.

Es entstand ein Musterinstitut für Positionsastonomie. Nach der schon erwähnten Reduktion und Veröffentlichung der Beobachtungen von Bradley 1818 gab Bessel 1830 die

“Tabulae Regiomontanae” heraus. Die neue Sternwarte wurde mit den modernsten Instrumenten ausgestattet, nämlich einem Meridiankreis von Reichenbach, dem 1840 ein weiterer von Repsold folgte, und einem Heliometer von Fraunhofer. Das letztere war ein spezielles Instrument zur Messung kleiner Winkeldistanzen, dessen Objektiv aus zwei gegeneinander verschiebbaren Linsenhälften bestand. Mit ihm gelang ihm 1838 die Messung der Parallaxe von 61 Cyg, der nach Bradleys Beobachtungen eine besonders große Eigenbewegung hatte, durch Vergleich mit zwei Nachbarsternen im Abstand von 8 und 12'. Aus dem Wert von 0''31, 1840 verbessert auf 0''35, ergab sich eine Entfernung von 590000 astronomischen Einheiten (AE). Bessel hatte das Glück, zwei anderen Astronomen knapp zuvorkommen, denn fast gleichzeitig maß Struve 1839 in Dorpat mit einem 24 cm-Refraktor mit Fadenmikrometer von Fraunhofer an α Lyr (Eigenbewegung 0''35/Jahr) eine Parallaxe von 0''26 und im gleichen Jahr Henderson in Kapstadt an α Cen (Eigenbewegung 3''7/Jahr) eine Parallaxe von 0''91, später korrigiert auf 0''76. Bei diesem letzteren Objekt handelt es sich um einen Doppelstern, dessen Komponenten abwechselnd unsere nächsten Nachbarn in einer Entfernung von 270000 AE sind. Viele der weiteren Untersuchungen führten aber zu Enttäuschungen, denn große Abweichungen zwischen verschiedenen Beobachtern wiesen auf systematische Fehler hin, so waren häufig die Vergleichssterne zu hell. Es war auch nicht möglich, für statistische Zwecke die mittleren Parallaxen für Sterne einer bestimmten Größenklasse zu bestimmen, da die Leuchtkräfte von Sternen zu unterschiedlich sind. Der sehr helle Stern Beteigeuze (α Ori) hat zum Beispiel nur eine Parallaxe von 0''028, steht also in großer Entfernung.

Für seine Entdeckung erhielt Bessel die Goldmedaille der Royal Astronomical Society, die ihm durch John Herschel, den Sohn von Friedrich Wilhelm Herschel überreicht wurde. Zu seinen weiteren Leistungen gehörte der Nachweis, daß die Eigenbewegungen von Sirius und Procyon durch unsichtbare Begleiter beeinflusst werden. Sie konnten erst nach seinem Tode direkt beobachtet werden, der Siriusbegleiter ist der erste bekannte Vertreter einer neuen Klasse von Sternen, der Weißen Zwergsterne. Bessel trug außerdem durch eine umfangreiche Vortragstätigkeit zur Popularisierung der Astronomie teil.

Nach Bessel ist die alleinige Aufgabe der Astronomie, “Regeln für die Bewegung jedes Gestirns zu finden, aus welchen sein Ort für jede beliebige Zeit folgt”. Seine Einstellung wurde von den meisten Berufsastronomen in diesem Jahrhundert geteilt. Von den drei Hauptrichtungen der Astronomie, der Positionsastonomie (“positional astronomy”), der Himmelsmechanik (“gravitational astronomy”) und der physischen Astronomie (“descriptive astronomy”) betrieben sie, mit Ausnahme Herschels, nur die ersten beiden. Die Fortschritte bestanden daher im wesentlichen in einer ständigen Steigerung des Umfangs und der Genauigkeit der Beobachtungen, die am Ende des Jahrhunderts für Meridiankreismessungen bei 0''01 für die Deklination und 0.001 s für die Rektaszension lagen. Dabei war wichtig die Bestimmung und Berücksichtigung systematischer Fehler, so daß Bessel von zwei Instrumenten sprach, dem körperlichen und dem durch Fehlerreduktion entstandenen theoretischen.

In England verlief die Entwicklung in den ersten Jahrzehnten des Jahrhunderts langsamer und beschränkte sich weitgehend auf Routinebeobachtungen für Zwecke der Navigation, bis 1835 Airy als Astronomer Royal dem deutschen Vorbild folgte. Hauptaufgabe war die Erstellung von Sternkatalogen hoher Präzision. Dazu wurden zunächst die Koordinaten von einigen hundert Fundamentalsternen mit der größtmöglichen Genauigkeit gemessen und daran bis zu hunderttausend weitere Sterne angeschlossen. Da diese Arbeit nicht von einer einzelnen Sternwarte allein geleistet werden konnte, wurde die Arbeit im “Zonenunternehmen” der Astronomischen Gesellschaft 1871 auf dreizehn Sternwarten verteilt, denen jeweils eine 5° breite Zone zugeteilt wurde, in der sie alle Sterne bis zur 9. Größen-

klasse katalogisierten. Das Unternehmen war auf Jahrzehnte angelegt und sollte für die Zukunft die Grundlage für die Ableitung genauer Eigenbewegungen liefern. Es zeigte sich aber bald, daß trotz hoher relativer Genauigkeit der Einzelmessungen große Unterschiede zwischen einzelnen Beobachtern auftraten, die auf systematische Fehler zurückzuführen waren. Hauptfehlerquelle war die Uhrablesung beim Meridiandurchgang und der damit verbundene "persönliche Fehler". Zu seiner Verringerung entwickelte Repsold 1889 ein Mikrometer mit wanderndem Faden, mit dem der Beobachter dem Stern durch das Gesichtsfeld folgte und dessen Nulldurchgang elektrisch bestimmt wurde.

Noch größere Fortschritte machte in dieser Zeit die Glastechnik. Dazu trug wesentlich Joseph Fraunhofer (1787-1826) bei. Geboren in Straubing, wurde er nach einer harten Jugend Lehrling in München und hatte dort Glück im Unglück. Beim Einsturz der Werkstatt wurde er verschüttet, aber vom gerade vorbeireitenden Kurfürsten persönlich gerettet, der ihm auch weitere Förderung angedeihen ließ. 1806 wurde Fraunhofer Leiter der optischen Abteilung von Utzschneider&Reichenbach, machte sich 1817 selbständig und gründete das Optische Institut. Er entwickelte ein Verfahren zum reproduzierbaren Erschmelzen schlierenfreier Glasblöcke, die zur Herstellung von Objektiven dienen.

Zu deren Berechnung war die genaue Kenntnis des Brechungsindex in den verschiedenen Teilen des Spektrums erforderlich. Bei dieser Gelegenheit entdeckte Fraunhofer die später nach ihm benannten Absorptionslinien im Sonnenspektrum [130]. Sie waren schon vorher von Wollaston gesehen worden, der aber ihre Bedeutung nicht erkannte. Fraunhofer legte mehr als 500 Linien fest und benannte die stärksten mit Buchstaben, zum Beispiel die D-Linien im gelben Spektralbereich. Er stellte fest, daß das Spektrum des Lichts von Mond und Planeten mit dem der Sonne übereinstimmt, während die von Sirius und Prokyon sich davon wesentlich unterscheiden. Mit dieser Festlegung des Spektrums war er in der Lage, Objektive mit einem Durchmesser bis zu 24 cm herzustellen, bei denen auch das sekundäre Spektrum weitgehend korrigiert war und die deshalb im gesamten Gesichtsfeld sehr scharfe, kreisförmige Bilder lieferten.

Fraunhofer verbesserte auch die Fernrohrmontierung [131], indem er das Teleskop am Ende einer Achse anbrachte, die mit der Polarachse (Stundenachse) übereinstimmte (Fraunhofer-, deutsche oder parallaktische Montierung). Man konnte so der Bewegung eines Sterns mit einer einzigen Drehung folgen, und diese Nachführung ließ sich auch mit Hilfe eines Uhrwerks automatisieren. Trotz ihrer immer größeren Abmessungen und damit verbundenen Massen waren diese Instrumente so präzise gearbeitet, daß sie durch Fingerdruck bewegt werden konnten. Die automatische Nachführung ermöglichte auch den Einsatz einer weiteren Konstruktion von Fraunhofer, nämlich des Fadenmikrometers mit Schraube. Damit ließen sich die Abstände von zwei Sternen mit einer Genauigkeit von $0''5$ messen. Von Fraunhofer beziehungsweise seinem Nachfolger Merz wurde 1839 ein solches Instrument mit einem Objektivdurchmesser von 38 cm an die neu gegründete russische Hauptsternwarte in Pulkowo geliefert und 1845 ein ähnliches an das Harvard Observatory. Bei bestimmten Messungen, zum Beispiel der von Planetendurchmessern, störte aber die Beugung am Mikrometerfaden. Hierfür entwickelte Fraunhofer das schon erwähnte Helio-meter. Damit ergaben sich die folgenden Werte: Merkur 2380 km, Venus 6372 km, Mars 3370 km, Jupiter 70550 km, Saturn 59310 km.

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts kam es in Deutschland zu einem Rückgang des Instrumentenbaus soweit es die Größe betraf, während die Glastechnik eine deutsche Domäne blieb. Dazu trugen die Arbeit von Abbe und Zeiss in Jena sowie die Glaswerke von Schott in Mainz bei. Die Entwicklung großer Teleskope wurde besonders in England und Amerika (Grubb&Parsons, Clark) vorangetrieben. William Parson, später Lord Rosse, baute 1845 in Irland ein Spiegelteleskop mit einem Durchmesser von 182 cm, mit dem

er die Spiralstruktur vieler Nebel erkannte, bei weitem die Mehrzahl der neuen Großinstrumente waren jedoch Linsenfernrohre. Clark lieferte 1862 einen Refraktor mit einem Objektivdurchmesser von 43 cm nach Chicago, bei dessen Test der Siriusbegleiter entdeckt wurde, 1871 einen weiteren von 66 cm Durchmesser nach Washington, mit dem Asaph Hall 1877 die Marsmonde Phobos und Deimos fand, und 1885 einen von 76 cm Durchmesser für Pulkowo. Im darauffolgenden Jahr bauten die Brüder Henry in Paris sogar ein Instrument mit 83 cm Durchmesser für das Observatorium in Meudon.

Im Gegensatz zu Kontinentaleuropa war der Bau von Sternwarten in Amerika und England keine Angelegenheit des Staates, sondern privater Initiative. Reiche Bürger, insbesondere amerikanische Millionäre, stifteten zum eigenen Ruhm Museen und Büchereien, gründeten aber auch Sternwarten, die dann ihren Namen trugen, so 1888 das Lick Observatory und 1897 das Yerkes Observatory, das mit einem Instrument von 102 cm Objektivdurchmesser ausgerüstet wurde. Damit war allerdings die Grenze für Refraktoren erreicht, da in diesen Riesenobjektiven schon erhebliche Absorption eintrat und sie sich unter ihrem eigenen Gewicht verformten.

Ab der Mitte des 19. Jahrhunderts wurde die Photographie ein bedeutendes Hilfsmittel der Beobachtung. Ihr Vorteil liegt darin, daß durch Verlängerung der Belichtungszeit auch schwächere Objekte untersucht werden können. Damit werden auch Objekte mit geringer Flächenhelligkeit, wie Nebel, sichtbar. Gleichzeitig liefert eine einzige Aufnahme eine große Zahl von Sternen und kann bei Tageslicht ausgewertet werden. Für die Aufnahmen auf Photoplaten wurden wegen der anderen spektralen Empfindlichkeit neue Objektive entwickelt, so 1864 von Rutherford eines mit 29 cm Durchmesser. Wegen der Bedeutung der neuen Technik auch außerhalb der Astronomie beteiligte sich eine Reihe von Firmen (Petzval, Steinheil, Zeiss) an der Entwicklung von photographischen Objektiven mit bis zu 6 oder 8 Linsen und Öffnungsverhältnissen von 1:5 bis 1:4.

Auf einer internationalen Konferenz 1889 in Paris wurde die Erstellung einer photographischen "Carte du Ciel" beschlossen, die alle Sterne bis zur 12. Größenklasse umfassen sollte. Das Projekt war aber zu ehrgeizig und hätte mehrere Jahrzehnte in Anspruch genommen, statt dessen wurde von der Astronomischen Gesellschaft der sogenannte AG-Katalog (AGK) vollendet der in den siebziger Jahren begonnen worden war. Mit diesen Unternehmungen war die große Zeit der Refraktoren beendet, am Ende des Jahrhunderts kehrte man zu den lichtstärkeren Reflektoren zurück.

b) Himmelsmechanik

Die wichtigste Aufgabe der Himmelsmechanik in dieser Zeit war die Bahnbestimmung. Dabei konnte man sich in erster Näherung auf das Zweikörperproblem beschränken und erst in zweiter Näherung die Störungen berücksichtigen. Für die großen Planeten ergaben sich dabei keine Probleme, da umfangreiche Beobachtungsdaten aus großen, viele Umläufe umfassenden, Zeiträumen, zum Teil seit der Antike, zur Verfügung standen.

Weniger einfach war es bei den Kometen. In erster Näherung bewegen sie sich auf Parabelbahnen und sind daher nichtperiodisch. Da sie erst in relativer Sonnennähe sichtbar werden, kann nur ein kurzer Teil der Bahn beobachtet werden. Allerdings ist einer der Bahnparameter, die Exzentrizität, gegeben ($e \approx 1$), was die Rechnungen vereinfacht und im - recht umständlichen - Verfahren von Laplace benutzt wurde. 1797 veröffentlichte Olbers (1758-1840) auf Drängen von Freunden seine Abhandlung "Über die leichteste und bequemste Methode, die Bahn eines Cometen aus einigen Beobachtungen zu berechnen", die mit geringen Verbesserungen im gesamten 19. Jahrhundert benutzt wurde.

Noch schwieriger war es bei den Kleinplaneten, die im Gegensatz zu den Kometen keine auffälligen Erscheinungen sind. Die Regel von Titius-Bode:

$$a_n = 0.4 + 0.3 \cdot 2^n$$

reproduziert die Abstände der bekannten Planeten von der Sonne recht gut:

$$\text{Merkur } n = -\infty \quad a_n = 0.4 \quad (0.4)$$

$$\text{Venus } n = 0 \quad a_n = 0.7 \quad (0.7)$$

$$\text{Erde } n = 1 \quad a_n = 1.0 \quad (1.0)$$

$$\text{Mars } n = 2 \quad a_n = 1.6 \quad (1.5)$$

$$\text{Jupiter } n = 4 \quad a_n = 5.2 \quad (5.2)$$

$$\text{Saturn } n = 5 \quad a_n = 10.0 \quad (9.6)$$

$$\text{Uranus } n = 6 \quad a_n = 19.6 \quad (19.2)$$

Man suchte daher auch für $n = 3$, also bei $a = 2.8$ zwischen Mars und Jupiter, nach einem fehlenden Planeten. Piazzi fand durch Zufall am 1.1.1801 ein Objekt, das er später Ceres taufte und zunächst für einen Kometen hielt. Er teilte seine Entdeckung anderen Astronomen mit, hielt aber die Beobachtungen erst zurück, da er die Bahn selbst berechnen wollte. Das mißlang, da der beobachtete Bogen der Bahn zu kurz war, und der Planet ging verloren. Glücklicherweise nahm der junge Gauß das Problem auf, und auf Grund seiner Berechnung gelang es noch im gleichen Jahr, das Objekt wiederzufinden. Die Gaußsche Methode der Bahnbestimmung aus drei vollständigen Beobachtungen wurde für das ganze Jahrhundert zum Standardverfahren. Olbers wendete es 1802 an, als er auf der Suche nach Ceres ein weiteres lichtschwaches Objekt, Pallas, mit großer Bahnneigung gefunden hatte, ebenso Harding, der 1804 die Juno entdeckte, und wiederum Olbers 1807 für die Vesta. In allen Fällen handelte es sich aber nicht um den gesuchten großen Planeten, sondern um sehr kleine Körper, die man Planetoiden oder Asteroiden nannte.

Vierzig Jahre lang wurden dann keine weiteren Kleinplaneten entdeckt, bis die Berliner Akademie der Wissenschaften ein Programm zur Erstellung einer Sternkarte organisierte, die alle Sterne bis zur 9. Größenklasse in der Tierkreiszone enthalten sollte. Damit begann 1845 ein wahrer Strom von Neuentdeckungen. 1852 war die Zahl der bekannten Kleinplaneten auf 20 gestiegen, 1870 auf 110. Noch häufiger wurden die Entdeckungen, als Max Wolf in Heidelberg ein photographisches Verfahren entwickelte, so daß 1891 schon 450 Objekte bekannt waren. Er selbst fand bis 1927 mehr als 500. Während man zunächst Namen aus der griechischen und römischen Mythologie gewählt hatte, war dieser Vorrat inzwischen erschöpft, und es kam zu Benennungen wie "Hamburgia" und "Bergedorfia". Eine ganze Entdeckungsserie taufte Wolf schließlich auf die Namen der Freundinnen der Mitarbeiter des Astronomischen Rechenzentrums (ARI). Den Abschluß bildete ein Kleinplanet mit dem rätselhaften Namen "Haremaria". Erst nach dem Tode Wolfs kam heraus, daß damit nicht etwa ein japanischer Astronom geehrt wurde, der Name steht für "Harem des Astronomischen Recheninstituts".

Die Schwierigkeit der Namensgebung war das kleinste Problem, das durch die große und schnell wachsende Zahl der Planetoiden entstand. Für jeden von ihnen mußten zunächst die sechs Bahnelemente bestimmt werden, um das Objekt wiederfinden zu können und es nicht mit einer Neuentdeckung zu verwechseln. Durch die von den großen Planeten, hauptsächlich Jupiter, ausgehenden Störungen ändern sich die Bahnen dieser kleinen Körper aber schnell und nachhaltig, was eine ständige Korrektur der Parameter nötig macht. Insgesamt entstanden so vom Umfang her große Anforderungen sowohl an die

astronomischen Recheninstitute als auch an die Sternwarten, die heute glücklicherweise mit Hilfe von Computern leichter zu erfüllen sind.

Bei dieser Routinearbeit gab es aber auch eine Reihe interessanter Ergebnisse. So zeigte sich, daß in Sonnenabständen, die der Hälfte oder einem Drittel der Jupiterperiode entsprechen, Lücken in der Häufigkeit auftreten, was sich als Resonanzphänomen erklären ließ. Von besonderer Bedeutung war und ist auch noch heute die Verfolgung von Objekten, die der Erde sehr nahe kommen, was in der Vergangenheit zum Einschlag und zur Bildung von Kratern geführt hat. Den Rekord an Erdnähe in geschichtlicher Zeit stellte 1937 ein Planetoid mit der anderthalbfachen Mondentfernung auf.

Einschläge noch kleinerer Körper, der Meteoriten, kommen entsprechend häufiger vor, richten aber im allgemeinen keine größeren Schäden an. Obwohl sie schon im Altertum bekannt waren, weigerte sich die französische Akademie der Wissenschaften noch 1790, ein offizielles Protokoll über einen Meteoritenfall aufzunehmen, da es sich um einen "Aberglauben, unwürdig dieser aufgeklärten Zeit" handle. Der deutsche Physiker Chladni konnte aber 1794 die Realität solcher Ereignisse nachweisen, und Benzenberg bestimmte 1798 die Höhe von Meteoren.

Wichtiger noch als die Bahnbestimmung dieser kleinen Körper war die des Mondes und der großen Planeten. Sie führte im 19. Jahrhundert zu einer Weiterentwicklung der Theorie der Bahnstörungen durch Bessel, Cauchy, Hansen und Poincaré. Schon 1821 hatte Laplace Widersprüche der berechneten Bahn des Uranus zu alten Beobachtungen festgestellt und auf den Einfluß eines noch unbekanntes äuseren Planeten zurückgeführt. Er beauftragte 1845 seinen Mitarbeiter Leverrier (1811-1877) damit, Bahn und Ort des Störers zu berechnen. Mit dem gleichen Problem hatte sich schon in Oxford Adams (1819-1892) seit 1842 beschäftigt. Im September 1845 teilte er seine Ergebnisse dem Astronom Royal, Airy, mit. Sie wurden aber nicht publiziert, und es wurde auch kein Versuch unternommen, den Planeten zu entdecken. Erst als Leverrier 1846 seine Berechnungen veröffentlicht hatte und diese eng mit denen von Adams übereinstimmten, begann Challis mit der Suche, gab sie aber bald wegen anderer Projekte wieder auf. Inzwischen hatte Leverrier Galle an der Berliner Sternwarte gebeten, nach dem Objekt zu suchen. Der Brief kam am 23.9.1846 an, und am folgenden Abend fand Galle den neuen Planeten, der später den Namen Neptun erhielt, nahe der berechneten Position [132]. Diese Entdeckung eines Planeten am Schreibtisch beeindruckte nicht nur die Fachleute, sondern in noch höherem Maße die Laien. Sie trug dazu bei, daß sich bei der Mittelklasse Westeuropas das rationalistische Weltbild der Aufklärung gegenüber der biblischen Tradition durchsetzte und förderte die Verbreitung fortschrittlicher Ideen überhaupt.

Es zeigte sich übrigens nach einigen Monaten Beobachtungsdauer, daß die berechnete Bahn von der tatsächlichen stark abwich und die Entdeckung zum Teil ein glücklicher Zufall gewesen war. Leverrier wurde 1853 Direktor der Pariser Sternwarte und beschäftigte sich auch weiter mit den Bahnstörungen von Planeten, von 1855 bis 1877 mit Venus und Merkur. Die Übereinstimmung von Theorie und Beobachtung war gut mit Ausnahme der Periheldrehung des Merkur. Für diese blieb eine Differenz von $43''$ im Jahrhundert. Alle Erklärungsversuche - ein hypothetischer Planet "Vulkan" innerhalb der Merkurbahn, eine diffuse anziehende Masse um die Sonne herum, eine Abhängigkeit der Gravitationskraft mit r^x , $x = -2 + 10^{-7}$ - scheiterten, bis Einstein den Effekt 1914 aus der allgemeinen Relativitätstheorie herleitete.

c) Astrophysik

Bei der Begründung der modernen Physik durch Newton war diese mit der Mechanik identisch und fand ihr Hauptanwendungsgebiet in der Himmelsmechanik. Im Verlauf des

18. Jahrhunderts entwickelten sich neben der Chemie auch andere Disziplinen der Physik zu exakten, also quantitativen, Wissenschaften, nämlich die Optik, die Elektrizitätslehre und die Thermodynamik. Im 19. Jahrhundert gelang dann durch Maxwell und Hertz die Vereinigung von Elektrodynamik und Optik, gleichzeitig im atomistischen Bild der Materie die von Mechanik und Thermodynamik.

Die neuen Erkenntnisse fanden jedoch zunächst fast keine Anwendung in der Astronomie, da die Himmelskörper unerreichbar waren und das von ihnen ausgesandte Licht, also seine Richtung, Helligkeit und Farbe, die einzige Informationsquelle bildete. Für die Planeten, sofern man ihre Bildscheibchen auflösen konnte, ergaben sich daraus einige Erkenntnisse über die Oberflächenstruktur, aber außer Radius und Masse kaum physikalische Eigenschaften. Für die Fixsterne blieben als Information nur die, eventuell veränderliche, Helligkeit und die Farbe, die fast keine Schlußfolgerungen zuließen.

Die Situation veränderte sich vollständig durch Fraunhofers Entdeckung der Spektrallinien und die Erkenntnis von Kirchhoff und Bunsen um 1860, daß diese charakteristisch für die chemischen Elemente sind. Neben Teleskop und Uhr trat als wichtigstes Hilfsmittel des Astronomen der Spektralapparat, wodurch sich die Astronomie zur Astrophysik erweiterte. Systematisch wurden Sternspektren erstmals von Secchi (1818-1878) untersucht, der auch den Anfang zu ihrer Klassifikation machte. Wesentliche Arbeit auf diesem Gebiet leistete auch H.C.Vogel (1814-1892) auf der Privatsternwarte des Kammerherrn v.Bülow auf dem Gut Bothkamp bei Kiel [133]. Er deutete die Spektralklassifikation von Secchi als Temperatursequenz und machte erste Versuche, die Radialgeschwindigkeit eines Sterns aus dem Dopplereffekt zu messen, schloß sie aber erst nach seiner Berufung 1874 an das neugegründete astrophysikalische Laboratorium in Potsdam erfolgreich ab.

Verzeichnis der Abbildungen

- 1 Erdfigur schematisch
- 2 Erdfigur maßstäblich
- 3 Erdbahn schematisch
- 4 Erdbahn maßstäblich
- 5 Bewegung des Fahrstrahls
- 6 Jahreszeiten
- 7 Sonnenfinsternis
- 8 Mondfinsternis
- 9 Planetenbahnen
- 10 jährlicher Sonnenweg
- 11 innere Planeten
- 12 äußere Planeten
- 13 Präzession der Äquinoktien
- 14 Deckengemälde im Tempel von Dendera
- 15 ägyptischer Götterhimmel
- 16 chinesische Sternkarte
- 17 Karte von Mesopotamien A
- 18 Karte von Mesopotamien B
- 19 Hammurabi-Stele
- 20 Turm von Babylon (Mittelalter)
- 21 Turm von Babylon (Breughel)
- 22 Turm von Babylon (Exzyklopädie)
- 23 Turm von Babylon (Zikkurat)
- 24 Kudurru
- 25 Mondgott
- 26 Keilschrifttafel Venus
- 27 Finsterniszyklus
- 28 Rückläufigkeit
- 29 Hippoped des Eudoxos
- 30 Universum des Aristoteles
- 31 Sonnenentfernung

- 32 Brunnen von Syene
- 33 Deferent und Epizykel
- 34 Exzenter als Epizykel
- 35 Vektoraddition
- 36 Mondentfernung
- 37 Sonnenbahn als Exzenter
- 38 Vergleich mit Kepler-Ellipse
- 39 Mondbahn als Epizykel
- 40 "König" Ptolemäus
- 41 Mondbahn
- 42 Epizykeltheorie A
- 43 Epizykeltheorie
- 44 Universum der Kirchenväter
- 45 Observatorium Istanbul
- 46 arabische Armillarsphäre
- 47 Astrolabium A
- 48 Astrolabium B
- 49 arabische Astronomen mit Astrolabium
- 50 Sternkarte von Al Sufi
- 51 Mondtheorie
- 52 Alfonso X
- 53 Kugelgestalt der Erde
- 54 Astrolabium im Mittelalter
- 55 Cherubim mit Sphäre
- 56 Porträt Oresme
- 57 Jakobsstab
- 58 Apian: Tierkreis
- 59 Apian: Mond
- 60 Porträt Kopernikus
- 61 Planetensystem nach Kopernikus
- 62 Epizykel nach Kopernikus
- 63 Gedenkbriefmarke Gregorianischer Kalender.
- 64 Porträt Brahe mit Wappen
- 65 Bayer: Cassiopeia

- 66 Karte von Hven
- 67 Uraniborg
- 68 Stjerneborg
- 69 Mauerquadrant
- 70 Sextant
- 71 Kreuzstab
- 72 Frontispiz Uranometria
- 74 Tychonisches Weltsystem
- 74 Epitaph Brahe
- 75 Porträt Kepler
- 76 Keplers platonische Körper
- 77 Kepler-Ellipse
- 78 Titelblatt Tabulae Rudolphinae
- 79 Frontispiz Tabulae Rudolphinae
- 80 Porträt Galilei
- 81 Galilei-Fernrohr
- 82 Planetensystem nach Galilei
- 83 Titelblatt Discorsi
- 84 Auto da Fe
- 85 Porträt Schall
- 86 Gregorianischer Kalender
- 87 Titelblatt Almagestum Novum
- 88 Porträt Descartes
- 89 Wirbeltheorie
- 90 Keplersches Fernrohr
- 91 sphärische Aberration
- 92 Luftfernrohr A
- 93 Luftfernrohr B
- 94 Saturnring
- 95 Hevelius
- 96 Porträt Cassini
- 97 Rundetårn
- 98 Mauerquadrant von Hooke
- 99 Fontenelle

100	Porträt Newton A
101	Spektrum
102	Newton und der Apfel
103	Fall um die Erde
104	Newtons Spiegelteleskop
105	Titelblatt Principia
106	Ebbe und Flut
107	Porträt Newton B
108	Münzen
109	Titelblatt Éléments
110	Porträt Leibniz
111	Lagrange-Punkte
112	Positionsbestimmung auf Se
113	John Harrison
114	Chronometer
115	Meridiankreis
116	Pariser Sternwarte
117	Ludwig XIV
119	Sternwarte Greenwich
120	Porträt Flamsteed
121	Sextant
122	Porträt Halley
123	Porträt Bradley
124	Porträt Maskelyne
125	Venus-Transit
126	Porträt Herschel
127	Porträt Kant
128	Porträt Hegel
129	Porträt Gauß
130	Porträt Bessel
131	Fraunhoferlinien
132	parallaktische Montierung
133	Adams und Leverrier
134	Sternwarte Bothkamp