

Th. S. Kuhn

Die kopernikanische  
Revolution

# Facetten der Physik

Physik hat viele Facetten: historische, technische soziale, kulturelle, philosophische und amüsante. Sie können wesentliche und bestimmende Motive für die Beschäftigung mit den Naturwissenschaften sein. Viele Lehrbücher lassen diese „Facetten der Physik“ nur erahnen. Daher soll unsere Buchreihe ihnen gewidmet sein.

Prof. Dr. Roman Sexl  
Herausgeber

Bisher erschienen:

- Band 1 Weber/Mendoza, Kabinett physikalischer Raritäten
- Band 2 Boltzmann, Populäre Schriften
- Band 3 Marder, Reisen durch die Raum-Zeit
- Band 4 Gamov, Mr. Tompkins' seltsame Reisen durch Kosmos und Mikrokosmos
- Band 5 Kuhn, Die kopernikanische Revolution
- Band 6 Voigt, Physicalischer Zeit-Vertreiber

Thomas S. Kuhn

# Die kopernikanische Revolution

Mit 59 Bildern



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

**Kuhn, Thomas S.:**

Die kopernikanische Revolution / Thomas S. Kuhn.

[Übers.: Helmut Kühnelt].

(Facetten der Physik; Bd. 5)

Einheitssach.: The Copernican revolution (dt.)

ISBN 978-3-663-01907-7 ISBN 978-3-663-01906-0 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-663-01906-0

Übersetzung: *Helmut Kühnelt*, Wien

1981

Alle Rechte vorbehalten

© Springer Fachmedien Wiesbaden 1981

Ursprünglich erschienen bei Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig 1981

Die Vervielfältigung und Übertragung einzelner Textabschnitte, Zeichnungen oder Bilder, auch für die Zwecke der Unterrichtsgestaltung, gestattet das Urheberrecht nur, wenn sie mit dem Verlag vorher vereinbart wurden. Im Einzelfall muß über die Zahlung einer Gebühr für die Nutzung fremden geistigen Eigentums entschieden werden. Das gilt für die Vervielfältigung durch alle Verfahren einschließlich Speicherung und jede Übertragung auf Papier, Transparente, Filme, Bänder, Platten und andere Medien.

ISBN 978-3-663-01907-7

# Einleitung

Die Geschichte der kopernikanischen Revolution wurde bereits oft geschrieben, doch meines Wissens nicht unter dem Blickwinkel und in dem Umfang, die hier beabsichtigt sind. Vielerlei Einzelereignisse verbergen sich hinter dem Schlagwort von der Wende oder Revolution. Ihr Kern war eine Umwandlung der mathematischen Astronomie, doch brachte sie auch begriffliche Änderungen in der Kosmologie, Physik, Philosophie und Religion mit sich. Einzelaspekte der kopernikanischen Revolution wurden wiederholt untersucht, und ohne die daraus entstandenen Abhandlungen hätte dieses Buch nicht geschrieben werden können. Die Vielfalt der Umwälzungen übersteigt die Fähigkeiten des einzelnen Gelehrten, der die ursprünglichen Quellen studiert. Sowohl spezialisierte Untersuchungen als auch die darauf aufbauenden vereinfachenden Darstellungen verfehlten jedoch notwendigerweise einen der wichtigsten und faszinierendsten Züge der Revolution – ein Charakteristikum, das aus der Vielfalt der Umwälzung selbst entspringt.

Wegen dieser Vielfalt bietet die kopernikanische Wende eine ideale Gelegenheit zu sehen, wie und mit welchem Ergebnis Vorstellungen aus vielen verschiedenen Gebieten sich zu einem einzigen Gedankengebäude zusammenfügen. Kopernikus selbst war ein Spezialist, ein mathematischer Astronom, der an der Korrektur esoterischer Methoden zur Berechnung von Planetenpositionen interessiert war. Oft war die Richtung seiner Forschung jedoch durch Entwicklungen bestimmt, die mit der Astronomie nichts zu tun hatten. Darunter befanden sich die veränderte Darstellung des Falles von Steinen im Mittelalter, die Wiederbelebung mystischer, antiker Anschauungen in der Renaissance, die die Sonne als das Abbild Gottes betrachteten, und die Atlantikkreisen, die den Horizont des Menschen der Renaissance erweiterten. Noch stärkere Verknüpfungen zwischen verschiedenen Geistesgebieten zeigen sich in der Zeit nach der Veröffentlichung von *De Revolutionibus*. Obwohl das Werk hauptsächlich aus mathematischen Formeln, Tabellen und Diagrammen besteht, konnte es nur von Menschen aufgenommen werden, die eine neue Physik, eine neue Vorstellung vom Raum und eine neue Vorstellung von der Beziehung des Menschen zu Gott schaffen konnten. Schöpferische, interdisziplinäre Querverbindungen, wie diese, spielen bei der kopernika-

nischen Umwälzung eine vielfältige Rolle. Spezialdarstellungen sind durch ihr Ziel und ihre Methode nicht imstande, das Wesen dieser Verknüpfungen und ihrer Effekte auf das Wachstum des Wissens der Menschheit zu studieren.

Dieser Bericht über die kopernikanische Revolution soll daher die vielfältige Bedeutung der Umwälzung zeigen. Diese Absicht ist vermutlich der wichtigste neue Aspekt unseres Buches. Dabei wurde jedoch eine zweite Neuerung notwendig. Immer wieder verletzt dieses Buch die institutionalisierten Grenzen, die das Publikum der Naturwissenschaft vom Publikum der Geschichte oder Philosophie trennen. Gelegentlich mag es wie zwei getrennte Bücher erscheinen, von denen eines sich mit Naturwissenschaft beschäftigt, das andere mit Geistesgeschichte.

Die Verbindung von Naturwissenschaft und Geistesgeschichte ist jedoch wesentlich, um der vielfältigen Struktur der kopernikanischen Umwälzung gerecht zu werden. Sie hatte ihren Mittelpunkt in der Astronomie. Weder ihr Verlauf, noch ihr Zeitpunkt oder ihre Gründe können ohne Kenntnisse der Daten und Vorstellungen verstanden werden, die die Arbeitsmittel der Astronomen waren. Astronomische Beobachtungen und Theorien bilden daher die wesentliche „wissenschaftliche“ Komponente, die die ersten zwei Kapitel beherrscht und im Rest des Buches immer wieder auftritt. Sie machen jedoch nicht das gesamte Buch aus. Die Astronomie der Planeten war nie ein vollständig unabhängiges Gebiet mit eigenen unveränderlichen Methoden. Die Astronomen hatten auch in anderen Zweigen der Wissenschaft eine Ausbildung erfahren und bekannten sich zu verschiedenen philosophischen und religiösen Systemen. Diese außerastronomischen Ansichten verzögerten zunächst die kopernikanische Revolution und trugen dann zu ihrer Gestaltung bei. Diese außerastronomischen Ansichten bilden die geistesgeschichtliche Komponente, die nach dem zweiten Kapitel wichtig wird. Für den Zweck dieses Buches sind sie beide gleich bedeutend.

Außerdem bin ich nicht überzeugt, daß die beiden Komponenten tatsächlich zu trennen sind. Außer in vereinzelten Monographien ist die Verbindung von Naturwissenschaft und Geistesgeschichte unüblich. Auf den ersten Blick mag sie daher überraschend erscheinen. Doch gibt es dabei keine echte Unverträglichkeit. Wissenschaftliche Vorstellungen sind Ideen, als solche sind sie Gegenstand der Geistesgeschichte. Sie wurden selten in dieser Weise behandelt, doch nur deshalb, weil wenige Historiker die technische Ausbildung hatten, um mit wissenschaftlichem Quellenmaterial umzugehen. Ich bin ziemlich sicher, daß die von den Geisteswissenschaftlern entwickelten Methoden zu einem Verständnis der Naturwissenschaften führen können, das man auf keine andere Weise erreichen wird. Obwohl kein einführendes Buch diese

Behauptung voll dokumentieren kann, sollte dieses zumindest einen ersten Beweis dafür liefern.

Dieser Beweis wurde bereits teilweise erbracht. Das Buch entstand aus einer Reihe von Vorlesungen, die ich seit 1949 jährlich im Rahmen des naturwissenschaftlichen Studium Generale am Harvard College gehalten habe. Dabei erwies sich die Verbindung von technischem und geistesgeschichtlichem Material sehr erfolgreich. Da die Studenten in diesem Studium Generale nicht die Absicht haben, Naturwissenschaft zu studieren, dienen die technischen Fakten und Theorien, die sie lernen, hauptsächlich als Gleichnisse und nicht als an sich notwendige und nützliche Informationen. Zwar ist das wissenschaftliche Faktenmaterial notwendig, es erweist seine Bedeutung aber erst, wenn es in einen historischen und philosophischen Rahmen gestellt wird, in dem es die Entwicklung der Naturwissenschaft, das Wesen wissenschaftlicher Sätze und den Einfluß der Naturwissenschaft auf das menschliche Leben beleuchtet. Dann wird das kopernikanische System und andere wissenschaftliche Theorien auch für ein breites Publikum relevant, und nicht nur für Wissenschaftler oder Studienanfänger. Obwohl meine erste Absicht bei der Abfassung dieses Buches war, einen ergänzenden Text für den Harvard Kurs und ähnliche andere zu schreiben, will dieses Buch kein Lehrbuch sein, sondern den allgemein gebildeten Leser ansprechen.

Viele Freunde und Kollegen halfen bei der Gestaltung dieses Buches durch Rat und Kritik mit, doch keiner hat so viele und wichtige Spuren hinterlassen wie Botschafter James B. Conant. Die Arbeit mit ihm überzeugte mich, daß historische Studien zu einem neuen Verständnis von Struktur und Aufgabe der wissenschaftlichen Forschung führen können. Ohne meine eigene kopernikanische Wende, deren Urheber er war, wären weder dieses Buch noch meine anderen Aufsätze zur Wissenschaftsgeschichte geschrieben worden.

J. B. Conant las auch das Manuskript, und die ersten Kapitel beweisen vielfältig seine konstruktive Kritik. Andere werden hier und dort Auswirkungen ihrer nützlichen Anregungen erkennen, unter ihnen Marie Boas, I. B. Cohen, M. P. Gilmore, Roger Hahn, G. J. Holton, E. C. Kemble, P. E. Lecorbeiller, L. K. Nash und F. G. Watson. Jeder hat zumindest zu einem Kapitel durch Kritik beigesteuert, einige lasen das ganze Manuskript in früheren Versionen, alle haben mich vor Fehlern und Unklarheiten bewahrt. Die Vorschläge von Mason Hammond und Mortimer Chambers haben mich in meinen Lateinübersetzungen bestärkt. Arnolfo Ferruolo führte mich erstmalig in Ficinos Werk *De Sole* ein und zeigte mir, daß die kopernikanische Auffassung der Sonne ein wesentlicher Bestandteil einer Tradition der Renaissance ist, die sich in den Künsten und in der Literatur noch deutlicher als in der Naturwissenschaft zeigt.

Die Illustrationen wurden mit großem Geschick und Geduld von Frau Polly Horan verfertigt, die meine vagen Anleitungen in Symbole echter Kommunikation übersetzte. J. D. Elder und die Mitarbeiter von Harvard University Press sind mir hilfreich bei dem schwierigen Problem beigestanden, ein Manuskript, das weder den Regeln einer naturwissenschaftlichen Publikation noch denen einer geschichtlichen entspricht, in Lettern zu bringen. Den Index verdanke ich J. W. Charles.

Die Universität Harvard und die John-Simon-Guggenheim-Gedächtnis-Stiftung ermöglichten mir einen einjährigen Urlaub, wodurch der Großteil meines Manuskriptes geschrieben werden konnte. Ich bin auch der Universität von Kalifornien dankbar, die mir durch eine Unterstützung bei der Herstellung des endgültigen Manuskripts behilflich war.

Meine Frau hat bei der Entwicklung des Buches eine aktive Rolle gespielt, doch ist dies ihr geringster Beitrag dazu. Geisteskinder, besonders fremde, sind die anstrengendsten Mitglieder jedes Haushalts. Ohne ihre fortwährende Toleranz und Nachsicht hätte dieses niemals überleben können.

*T. S. Kuhn*

Berkeley, Kalifornien, November 1956

# Vorwort

In Westeuropa herrscht noch die literarische Tradition in der Erziehung vor. Ein gebildeter Mensch muß einige Sprachen beherrschen und eine ausreichende Kenntnis von Kunst und Literatur Europas besitzen. Dabei meine ich nicht eine wissenschaftliche Beherrschung antiker und moderner Klassiker oder ein kritisches Urteil über Stil und Form. Eher schwebt mir ein Wissen vor, das leicht zu einer Unterhaltung in einem geeigneten gesellschaftlichen Rahmen verwendet werden kann. Eine Erziehung, die auf einer sorgfältig umschriebenen literarischen Tradition aufbaut, hat offensichtlich einige Vorteile: Der Unterschied zwischen den 5 bis 10 Prozent der Bevölkerung, die so erzogen wurde, und den anderen zeigt sich fast von selbst in der Unterhaltung. Er gibt jenen, die sich echt an Kunst, Literatur und Musik erfreuen, ein angenehmes Gefühl der Zusammengehörigkeit. Für andere, die sich gezwungen fühlen, an einer Diskussion über diese Gegenstände teilzunehmen, ist der Spielraum in geeigneter Weise eingeschränkt. Es erfordert nicht viel Mühe, um einen Teil des in der Schule mühselig erworbenen Wissens frisch zu erhalten. Der Preis für den Zugang zur kulturellen Tradition einer europäischen Nation wird ein für alle Mal entrichtet, wenn man jung ist. In der Theorie besteht dieser Preis aus acht bis neun Jahren harter Arbeit in besonderen Schulen, deren Lehrpläne um Literatur und Sprache der Griechen und Römer aufgebaut sind. Ich sage „in der Theorie“, da in der Praxis das Studium moderner Sprachen in diesem Jahrhundert das Studium des Griechischen und teilweise des Lateinischen geschmälert hat. Doch selbst diese Veränderungen haben die grundlegende Idee der Bildung einer Elite durch langjähriges Studium von Sprachen und Literatur Europas nicht verändert.

Mindestens ein Jahrhundert lang gibt es bereits Angriffe gegen diese Art von Erziehung. Die Naturwissenschaften beanspruchten einen größeren Anteil am Lehrplan, solche Ansprüche wurden üblicherweise mit der Forderung nach Ersatz der antiken Sprachen durch moderne verknüpft. Der Platz der Mathematik stand kaum zur Diskussion, da ein gründliches Studium der Mathematik, die Differentialrechnung eingeschlossen, lange schon als Hauptgegenstand in allen Lehrplänen jener Schulen verankert war, die den Studenten für den Eintritt in die Universität vorbereiteten. Vor einigen Generationen wurde als deutliche Alternative zum klassischen Lehrplan eine Unterrichtsrichtung

vorgeschlagen, die auf Physik, Chemie, Mathematik und den modernen Sprachen aufbaute. Doch die Vertreter des klassischen Kurses setzten sich durch. Zumindest in Deutschland scheint das Ergebnis eine Reihe von Kompromissen zu sein, doch wegen der dem Sprachstudium zugemessenen Bedeutung herrscht die literarische Tradition weiterhin vor. Selbst an jenen Schulen, die den Großteil der Zeit der Naturwissenschaft widmen, wäre es wohl kaum richtig zu behaupten, daß die wissenschaftliche Tradition die literarische ersetzt hätte. Statt dessen haben die deutschen Studenten bis zum Eintritt in die Universität – wenn auch in verschiedenem Ausmaß – beträchtliches Wissen über die Naturwissenschaften vermittelt bekommen. Ob jedoch ein solches Wissen später das Verhalten derjenigen beeinflußt, die eine nicht-naturwissenschaftliche Studienrichtung wählen, bleibt zumindest fraglich. Das Interesse an einer Änderung der Erziehungsmethoden, die dem Nichtwissenschaftler ein besseres Verständnis der Naturwissenschaften vermitteln könnte, erscheint gering. Es wäre nicht überraschend, wenn die Absolventen sprachlich orientierter Schulen die Frage aufwürfen, ob das Verständnis der Naturwissenschaften nicht doch nur für Wissenschaftler und Ingenieure wichtig wäre.

In den Vereinigten Staaten verschwand die europäische literarische Tradition als Grundlage der Erziehung vor fast hundert Jahren. Sie wurde aber nicht durch eine auf den physikalischen Wissenschaften, der Mathematik und den modernen Sprachen aufbauenden Erziehung ersetzt. Einige würden sagen, es hätte einfach überhaupt keinen Ersatz gegeben. Jedenfalls gab es wiederholte Versuche, das kulturelle Leben der Nation auf eine breite Basis zu stellen, die die physikalischen, biologischen und Gesellschaftswissenschaften ebenso umfassen sollten wie die anglo-sächsische, literarische Tradition und das Interesse an den Kunstformen verschiedener Zivilisationen. Ob solche Versuche, die auf einen zukünftigen Bürger einer Demokratie zielen, der an der Entwicklung der Kultur seiner Nation enthusiastischen Anteil nimmt, ein hinreichend fruchtbare Klima für das Geistesleben in Amerika geschaffen haben, mag fraglich sein. Jedenfalls wurde dabei aber versucht, der wissenschaftlichen Ausbildung genügend Zeit einzuräumen.

Die Erfahrung in den Vereinigten Staaten und den modernen Schulen Europas hat gezeigt, wie schwierig es ist, das Studium der Naturwissenschaften auf eine ähnliche Grundlage wie das Studium der Literatur, Musik oder Kunst zu stellen. Ein Wissenschaftler oder Techniker mag ein anregender Partner in einer Diskussion über Gemälde, Bücher oder Theaterstücke sein, doch kann man nur sehr schwer eine Konversation über physikalische Probleme in Gang halten, wenn mehrere Teilnehmer nicht selbst Wissenschaftler oder Techniker sind. (Und während ich der letzte wäre, für den gewandte

Konversation ein Erziehungsziel wäre, so mag doch das Mitlauschen bei einem gesellschaftlichen Zusammentreffen als diagnostische Methode erlaubt sein.)

Es ist ganz klar, daß das Studium der Naturwissenschaften nicht denselben Eindruck im Gehirn des Studenten wie das Studium der Literatur an der Schule hinterläßt. Kenntnis der Chemie der Metalle und Kenntnis von Shakespeares Stücken sind zwei völlig verschiedene Arten von Kenntnis, so weit sie die menschlichen Bedürfnisse betreffen. Man müßte nicht einmal ein Beispiel aus der Naturwissenschaft nehmen. Man könnte genauso gut an Stelle der „Chemie der Metalle“ im vergangenen Satz „lateinische Grammatik“ setzen. Shakespeares Stücke waren immer der Gegenstand endloser Debatten, in denen der Stil und die Zeichnung der verschiedenen Rollen von vielen Gesichtspunkten kritisiert, bewundert oder abgelehnt wurden. Aber niemand bewundert die Metalle oder das Verhalten ihrer Salze oder lehnt sie ab.

Ein bloßes Studium von Ergebnissen der Naturwissenschaften oder von wissenschaftlichen Theorien reicht nicht aus, um gebildete Menschen außer für die literarische auch für die wissenschaftliche Tradition aufnahmefähig zu machen. Auch heute beherrscht die literarische Tradition die Kultur Europas und sogar die der USA. Die Schwierigkeiten, die Naturwissenschaften in der westlichen Kultur zu assimilieren, haben ja mit den Jahrhunderten zugenommen. Als zur Zeit Ludwigs XIV. wissenschaftliche Akademien gegründet wurden, waren neue Entdeckungen und neue wissenschaftliche Theorien gebildeten Personen viel leichter zugänglich als heute. Diese Situation bestand bis zu den Napoleonischen Kriegen; Sir Humphry Davy faszinierte die Londoner Gesellschaft zu Beginn des 19. Jahrhunderts mit seinen Vorlesungen über Chemie, die er mit spektakulären Experimenten interessant machte. 50 Jahre später ergötzte Michael Faraday sein Auditorium aus jung und alt, das ihn in der Royal Institution in London hören wollte; seine Vorlesungen über die Chemie der Kerze sind klassische Beispiele für den Versuch, Wissenschaft verständlich darzustellen. Es gab in unseren Tagen keinen Mangel an ähnlichen Versuchen: Doch die zu überwindenden Hindernisse wachsen immer mehr. Aufsehenerregende Hörsaalexperimente setzen die Zuhörer nicht mehr in Erstaunen, technische Großleistungen übertreffen sie fast täglich. Die wissenschaftlichen Neuheiten des laufenden Jahres sind zu zahlreich und zu kompliziert, um für Laien ein Konversationsgegenstand zu sein. Die Fortschritte erfolgen so schnell und auf so vielen Fronten, daß der Laie von den Neuigkeiten verwirrt ist. Schließlich muß man, um eine Vorstellung von der Bedeutung eines wissenschaftlichen Durchbruchs zu haben, über den Zustand der fraglichen Einzelwissenschaft vor dem erfolgreichen Experiment Bescheid wissen. Selbst jene, die in einem Bereich der Wissenschaft tätig sind, haben Schwierigkeiten, die Fortschritte in einem anderen, entfernteren Gebiet zu

verstehen. Zum Beispiel können Physiker kaum zusammenfassende Arbeiten lesen, die von Genetikern für andere Genetiker geschrieben wurden und umgekehrt. Für die große Gruppe von Menschen mit technischem oder wissenschaftlichem Hintergrund, die dem Fortschritt der Wissenschaft im großen folgen wollen, gibt es einige hervorragende Zeitschriften. Nützliche Bücher werden von Zeit zu Zeit publiziert. Doch zweifle ich sehr, ob dieser Versuch, Wissenschaft zu popularisieren, jene erreicht, die nicht direkt mit den physikalischen oder biologischen Wissenschaften und ihren Anwendungen vertraut sind. Einige Versuche der Popularisierung sind so oberflächlich und sensationshaschend, daß sie für das Verständnis der Wissenschaften durch Nichtwissenschaftler wertlos sind.

In den letzten zehn bis fünfzehn Jahren wurde die Stellung von Physik und Biologie im Lehrplan der amerikanischen Colleges immer wieder diskutiert. Die bisherigen Kurse in Physik, Chemie und Biologie im ersten Studienjahr wurden von vielen für jene Studenten als unbefriedigend befunden, die nicht ein intensives Studium der Naturwissenschaften, Technik oder Medizin beabsichtigten. Es wurden verschiedene Vorschläge gemacht und Versuche mit neuen Vorlesungsarten abgehalten. Vor allem sollte die Geschichte der Naturwissenschaften betont werden, und dieser Empfehlung habe ich mich mit Freude angeschlossen. Tatsächlich hat die Erfahrung mit einer historischen Einführung am Harvard College meine Überzeugung bestärkt, daß ein Studium der Wissenschaftsgeschichte bedeutende Möglichkeiten bietet, besonders wenn es mit einer Analyse der Methoden des wissenschaftlichen Fortschritts verbunden wurde. Während ich den erzieherischen Wert einer Gesamtübersicht über die Wissenschaftsgeschichte der letzten dreihundert Jahre wohl erkenne, glaube ich, daß aus einem intensiven Studium einiger Episoden in der Entwicklung der Physik, Chemie und Biologie größerer Nutzen gezogen werden kann. Diese Überzeugung hat ihren Ausdruck in einer Reihe von Schriften mit dem Titel: "Harvard Case Histories in Experimental Science" gefunden.

Die in dieser Reihe betrachteten Fälle sind sowohl zeitlich als auch thematisch relativ eng beschränkt. Die Absicht war, im Studenten ein Verständnis für die gegenseitige Abhängigkeit von Theorie und Experiment und ein Verstehen der komplizierten Schlußketten zu wecken, die die Überprüfung einer Hypothese mit den experimentellen Ergebnissen verknüpft. Eine wissenschaftliche Originalarbeit bildet den Ausgangspunkt der Überlegungen. Der Leser wird dann durch Kommentare des Herausgebers angeleitet, der Argumentationskette des Forschers so weit wie möglich zu folgen. Es bleibt den Professoren überlassen, den betrachteten Fall in einen größeren Rahmen des Fortschrittes der Wissenschaft zu stellen.

Für eine breitere Leserschaft sind die “Harvard Case Histories” nicht umfassend genug, da sie experimentelle Details und die Analyse der Methoden zu sehr herausstreichen. Außerdem ist die Bedeutung der aus der Geschichte der Physik, Chemie und Biologie ausgewählten Episoden dem Nichteingeweihten nicht sofort klar. Der Leser wird bald erkennen, daß das folgende Buch nicht unter diesen Mängeln leidet. Jeder kennt die Wirkung, die der Übergang vom geozentrischen, aristotelischen Universum zum kopernikanischen auf die Kultur des Abendlandes ausgeübt hat. Professor Kuhn beschäftigt sich nicht mit einem einzelnen Ereignis in der Wissenschaftsgeschichte, sondern mit einer Reihe zusammenhängender Ereignisse, die von der Haltung Gelehrter beeinflußt wurde und diese beeinflußte, deren Interessen der Astronomie fernstanden. Er hat sich nicht die relativ leichte Aufgabe gestellt, bloß die Geschichte der Astronomie in jener Umwälzzeit zu erzählen. Statt dessen bietet er eine Analyse der Beziehung zwischen Theorie, Beobachtung und Glaube, und er geht auch auf die schwierige Frage ein, warum hervorragende, begeisterte und zutiefst aufrichtige Naturforscher die Anerkennung des heliozentrischen Weltbildes solange verzögert haben. Dieses Buch ist keine oberflächliche Beschreibung wissenschaftlicher Errungenschaften, sondern die gründliche Ausarbeitung einer Phase wissenschaftlicher Arbeit, die das sonderbare Verhältnis von Hypothese und Experiment (oder astronomischer Beobachtung) aufzeigt, das für die moderne Wissenschaft charakteristisch ist, doch dem Nichtwissenschaftler zumeist unbekannt bleibt.

Ich möchte hier jedoch nicht versuchen, eine kurze Zusammenfassung der Einsicht in die Denkweise der Naturwissenschaft zu geben, die man aus Professor Kuhns Werk gewinnen kann; statt dessen möchte ich meine Überzeugung ausdrücken, daß der hier dargestellte Zugang zur Naturwissenschaft genau derjenige ist, der der wissenschaftlichen Tradition neben der literarischen den Platz in der Kultur der Vereinigten Staaten einräumen kann. Naturwissenschaft war stets ein Unternehmen voll von Fehlern und Irrtümern, aber auch von großen Triumphen. Sie wurde von Menschen mit Fehlern oft mit großer Emotion weitergetrieben. Sie ist ein wesentlicher Teil der schöpferischen Aktivitäten des Abendlandes, die uns Kunst, Literatur und Musik gegeben haben. Der Wandel in den Anschauungen des Menschen vom Aufbau des Universums, der in den folgenden Seiten dargestellt wird, beeinflußt in gewissem Maße das Weltbild jedes gebildeten Menschen unserer Zeit. Doch über die Bedeutung dieser besonderen Umwälzungen in der Astronomie hinaus, verdient die Behandlung des Themas durch Professor Kuhn Aufmerksamkeit, da sie vermutlich den Weg zur Anerkennung der Naturwissenschaft als Bestandteil der Kultur unserer Zeit zeigt.

*James B. Conant*

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b> . . . . .	V
<b>Vorwort</b> (von James Bryant Conant) . . . . .	IX
<b>1 Das antike Universum</b> . . . . .	1
Kopernikus und das moderne Weltbild . . . . .	1
Die Rolle der Himmel in den ersten Kosmologien . . . . .	5
Die scheinbare Bewegung der Sonne . . . . .	8
Die Sterne . . . . .	13
Die Bewegung der Sonne . . . . .	21
Die Geburt der wissenschaftlichen Kosmologie – das Universum aus zwei Kugeln . . . . .	26
Die Sonne im Zwei-Kugel-Universum . . . . .	35
Die Funktionen eines wissenschaftlichen Weltbildes . . . . .	38
Antike Konkurrenten des Zwei-Kugel-Universums . . . . .	43
<b>2 Das Planetenproblem</b> . . . . .	46
Scheinbare Planetenbewegung . . . . .	46
Der Ort der Planeten . . . . .	51
Die Theorie der homozentrischen Kugeln . . . . .	56
Epizykel und Deferenten . . . . .	60
Ptolemäische Astronomie . . . . .	65
Wissenschaftlicher Glaube . . . . .	73
<b>3 Das Zwei-Kugel-Universum im aristotelischen Denken</b> . . . . .	77
Das aristotelische Universum . . . . .	77
Die aristotelischen Bewegungsgesetze . . . . .	83
Aristoteles' gefüllter Raum . . . . .	86
Die Majestät der Himmel . . . . .	90
Das aristotelische Weltbild (kurz gefaßt) . . . . .	94
<b>4 Der Wandel der Tradition: von Aristoteles zu Kopernikus</b> . . . . .	99
Europäische Wissenschaft und Gelehrsamkeit vor dem 13. Jahrhundert . . . . .	99
Astronomie und die Kirche . . . . .	105
Die scholastischen Kritiker des Aristoteles . . . . .	114
Astronomie zur Zeit des Kopernikus . . . . .	123

<b>5 Kopernikus' Neuerung</b> . . . . .	134
Kopernikus und seine Revolution . . . . .	134
Kopernikus' Motive – das Vorwort . . . . .	136
Kopernikus' Physik und Kosmologie . . . . .	146
Kopernikanische Astronomie – die zwei Kugeln . . . . .	160
Kopernikanische Astronomie – die Sonne . . . . .	165
Kopernikanische Astronomie – die Planeten . . . . .	169
Die Harmonie des kopernikanischen Systems . . . . .	175
Schrittweise Revolution . . . . .	186
<b>6 Die Assimilation der kopernikanischen Astronomie</b> . . . . .	190
Die Aufnahme seines Werkes . . . . .	190
Tycho Brahe . . . . .	204
Johannes Kepler . . . . .	212
Galileo Galilei . . . . .	223
Der Niedergang der ptolemäischen Astronomie . . . . .	228
<b>7 Das neue Universum</b> . . . . .	232
Die neue wissenschaftliche Perspektive . . . . .	232
Am Weg zu einem unendlichen Universum . . . . .	234
Das korpuskulare Universum . . . . .	240
Das mechanische Sonnensystem . . . . .	245
Gravitation und das korpuskulare Universum . . . . .	255
Das neue Gedankengebäude . . . . .	264
<b>Technischer Anhang</b> . . . . .	269
1 Korrektur der Sonnenzeit . . . . .	269
2 Das Vorrücken der Äquinoktien . . . . .	272
3 Mondphasen und Verfinsterungen . . . . .	275
4 Antike Messungen des Universums . . . . .	278
<b>Anmerkungen</b> . . . . .	284
<b>Bibliographische Anmerkungen</b> . . . . .	287
<b>Index</b> . . . . .	298

# 1 Das antike Universum

## *Kopernikus und das moderne Weltbild*

Die kopernikanische Wende war eine Revolution der Ideen. Sie stellte einen Wandel in der Auffassung des Menschen vom Universum und seiner Beziehung dazu dar. Immer wieder wurde diese Episode in der Geistesgeschichte der Renaissance als epochemachender Wendepunkt in der intellektuellen Entwicklung des abendländischen Menschen bezeichnet. Jedoch betraf diese Umwälzung zunächst Einzelheiten der astronomischen Forschung, die dem Alltagsleben weit entfernt standen. Wie konnte sie dann eine solche Bedeutung erhalten? Was bedeutet die Phrase „kopernikanische Wende“?

Im Jahre 1543 unternahm Nikolaus Kopernikus den Versuch, die Genauigkeit der astronomischen Vorstellungen zu verbessern und ihre Beschreibung zu vereinfachen, indem er der Sonne viele jener astronomischen Aufgaben übertrug, die zuvor der Erde zugeschrieben worden waren. Bis dahin hatten die Astronomen die Erde als das feste Zentrum für die Bewegungen der Sterne und Planeten angenommen. Ein Jahrhundert später hatte, zumindestens in der Astronomie, die Sonne die Erde als Mittelpunkt der Planetenbewegungen ersetzt, die Erde hatte ihre einzigartige astronomische Bedeutung verloren und wurde zu einem von vielen sich bewegenden Planeten. Viele wesentliche Errungenschaften der modernen Astronomie hängen von dieser Verschiebung des Standpunkts ab. Eine Reform fundamentaler astronomischer Auffassungen ist daher die erste Bedeutung des Wortes „kopernikanische Wende“.

Astronomische Reform ist jedoch nicht ihre einzige Bedeutung. Andere wesentliche Änderungen in der Auffassung des Menschen von der Natur folgten bald auf die Veröffentlichung von Kopernikus' Werk *De Revolutionibus* im Jahre 1543. Zahlreiche Neuerungen, die eineinhalb Jahrhunderte später in der Newtonschen Vorstellung des Universums gipfelten, waren unvorhergesehene Nebenprodukte der astronomischen Lehre des Kopernikus. Kopernikus schlug die Bewegung der Erde als ein Mittel vor, um die Techniken zur Vorhersage der astronomischen Positionen von Himmelskörpern zu verbessern. In anderen wissenschaftlichen Disziplinen führte sein Vorschlag

auf neue Probleme, und bis diese gelöst waren, war die Vorstellung des Astronomen vom Universum mit dem Weltbild anderer Wissenschaftler unvereinbar. Während des 17. Jahrhunderts war der Prozeß, diese anderen Wissenschaften mit der kopernikanischen Astronomie in Übereinstimmung zu bringen, eine wichtige Ursache für die allgemeine intellektuelle Unruhe, die wir jetzt die wissenschaftliche Revolution nennen. Aufgrund dieser wissenschaftlichen Revolution gewann die Naturwissenschaft jene große neue Rolle, welche sie seither in der Entwicklung der abendländischen Gesellschaft und des abendländischen Denkens gespielt hat.

Doch auch die Folgerungen der Revolution für die Naturwissenschaft erschöpfen ihre Bedeutung nicht. Kopernikus lebte und arbeitete in einer Zeit, in der stürmische Änderungen im politischen, wirtschaftlichen und intellektuellen Leben die Grundlage der modernen europäischen und amerikanischen Zivilisation legten. Seine Planetentheorie und die damit verknüpfte Vorstellung eines Universums mit der Sonne im Mittelpunkt waren für den Übergang von der mittelalterlichen zur modernen abendländischen Gesellschaft notwendig, weil sie die Beziehung des Menschen zum Universum und zu Gott zu berühren schienen. Wenn auch die kopernikanische Theorie als eine höchst sachspezifische, mathematische Revision der klassischen Astronomie begonnen hatte, so wurde sie doch bald zu einem Brennpunkt heftiger Auseinandersetzungen im religiösen, philosophischen und sozialen Bereich, welche im 16. und 17. Jahrhundert den Tenor der modernen Geisteshaltung formten. Menschen, für die ihr irdisches Zuhause nur ein Planet war, der blindlings um einen von unendlich vielen Sternen kreiste, bewerteten ihren Platz im kosmischen Rahmen ganz anders, als ihre Vorgänger, für die die Erde den einzigartigen Mittelpunkt der Schöpfung gebildet hatte. Die kopernikanische Revolution spielte daher auch im Wandel der Wertvorstellungen des abendländischen Menschen eine große Rolle.

Dieses Buch beschreibt die Geschichte der kopernikanischen Revolution in ihren drei eng zusammenhängenden Bedeutungen – der astronomischen, der wissenschaftlichen und der philosophischen. Ihre Bedeutung für die Entwicklung der Astronomie wird notwendigerweise unser Hauptgegenstand sein. In den ersten zwei Kapiteln werden wir entdecken, was das bloße Auge am Himmel sehen kann, und wie die Sterngucker darauf reagierten, so daß die Astronomie und die Astronomen nahezu unser einziges Interesse sein werden. Sobald wir aber die wichtigsten astronomischen Theorien der Antike geprüft haben, wird sich unser Blickwinkel ändern. Während wir die Stärken der astronomischen Tradition der Antike analysieren, und die Requisiten für den radikalen Bruch mit jener Tradition erforschen, werden wir schrittweise

entdecken, wie schwierig es ist, die Bedeutung eines etablierten wissenschaftlichen Konzepts auf eine einzige Wissenschaft oder selbst auf eine Gruppe von Wissenschaften einzuschränken. Daher werden wir uns in den Kapiteln 3 und 4 weniger mit der Astronomie als mit dem intellektuellen und (allerdings nur kurz) dem sozialen und ökonomischen Milieu beschäftigen, in dem die Astronomen arbeiteten. Diese Kapitel behandeln die außerastronomischen Folgerungen, die ein althergebrachtes astronomisches Vorstellungsgebäude für die Bereiche der Wissenschaft, der Religion und des täglichen Lebens nach sich ziehen. Wir werden zeigen, wie ein Wandel in den Vorstellungen der Astronomie solch revolutionäre Folgen haben konnte. Wenn wir uns schließlich in den letzten drei Kapiteln Kopernikus' Werk zuwenden, seiner Aufnahme und seinem Beitrag zu einer neuen wissenschaftlichen Vorstellung vom Universum, werden schließlich alle Fäden zusammenlaufen. Nur der Kampf, der das Konzept vom Planeten Erde als eine Voraussetzung des modernen abendländischen Denkens etablierte, kann der vollen Bedeutung der kopernikanischen Revolution gerecht werden.

Der von Kopernikus herbeigeführte Umsturz gehört wegen seiner Resultate zu den faszinierendsten Episoden in der gesamten Wissenschaftsgeschichte. Doch hat er auch eine weitere Bedeutung: Dieser Umsturz ist gerade heute wichtig, da die zeitgenössische westliche Zivilisation in ihren geistigen und ökonomischen Bedürfnissen wesentlich stärker als jede vergangene Zivilisation von wissenschaftlichen Vorstellungen abhängt. Die zahlreichen wissenschaftlichen Theorien, die unser tägliches Leben beeinflussen, werden sich kaum als endgültig erweisen. Das Konzept eines Universums, in welchem die Sterne – unsere Sonne eingeschlossen – hier und dort durch einen unendlichen Raum verstreut sind, ist weniger als vier Jahrhunderte alt; es ist bereits veraltet. Bevor diese Idee von Kopernikus und seinen Nachfolgern entwickelt wurde, hatte man andere Vorstellungen über den Aufbau des Universums benutzt, um die Himmelserscheinungen zu erklären. Diese älteren astronomischen Theorien unterschieden sich radikal von den heutigen, doch die meisten von ihnen genossen zu ihrer Zeit dieselbe Glaubwürdigkeit, die wir nun unseren zumessen. Weiters wurden sie aus dem gleichen Grund für wahr gehalten: Sie gaben plausible Antworten auf Fragen, die wichtig schienen. Andere Zweige der Naturwissenschaft bieten ähnliche Beispiele der Vergänglichkeit hochgeschätzter wissenschaftlicher Glaubensbekenntnisse. In der Tat haben sich die grundlegenden Konzepte der Astronomie als stabiler erwiesen als viele andere.

Die Wandelbarkeit ihrer Grundbegriffe ist jedoch kein Grund, Wissenschaft abzulehnen. Jede neue wissenschaftliche Theorie bewahrt einen harten

Kern an Wissen, den ihre Vorgänger geliefert haben, und ergänzt ihn. Wissenschaft schreitet fort, indem sie alte Theorien durch neue ersetzt. Unser von Wissenschaft durchdrungenes Zeitalter erfordert jedoch eine distanzierte Betrachtung der als gültig erachteten Grundlagen eben dieser Wissenschaft, gerade die Geschichte ermöglicht uns diese Distanz. Wenn wir die Ursprünge der heutigen wissenschaftlichen Begriffe entdecken und die Art, in der die vorangegangenen Konzepte verbessert wurden, dann können wir vermutlich leichter beurteilen, ob unsere heutigen Ideen Bestand haben werden. Die hier behandelten astronomischen Ideen sind denjenigen anderer Wissenschaften ähnlich, und durch die Betrachtung ihrer Entwicklung können wir einiges über wissenschaftliche Theorien im allgemeinen lernen: Was sind wissenschaftliche Theorien und wie sollten sie aufgebaut sein, um diesen Namen zu verdienen? Was ist ihre Funktion und ihr Nutzen? Wie groß ist ihre Beharrungskraft? Die historische Analyse wird diese Fragen nicht immer beantworten können, doch wird sie sie erläutern und ihre Bedeutung erhellen.

In mancher Hinsicht ist die Kopernikanische Theorie typisch für wissenschaftliche Theorien. Ihre Geschichte kann daher einiges von den Vorgängen illustrieren, die die Entstehung wissenschaftlicher Ideen und die Abfolge der Theorien beeinflussen. In bezug auf ihre außerwissenschaftlichen Konsequenzen ist die kopernikanische Theorie jedoch nicht typisch, denn nur wenige wissenschaftliche Theorien haben eine vergleichbare Rolle im nicht-wissenschaftlichen Denken gespielt. Und doch steht sie auch in dieser Hinsicht nicht einzigartig dar. Im 19. Jahrhundert führte die Darwinsche Evolutionstheorie zu ähnlichen außerwissenschaftlichen Fragen; in unserem Jahrhundert standen Einsteins Relativitätstheorie und Freuds psychoanalytische Theorien im Zentrum von Kontroversen, die zu weiteren radikalen Umwandlungen des westlichen Denkens führen. Freud selbst betonte die Parallelen zwischen Kopernikus' Entdeckung, daß die Erde bloß ein Planet ist, und seiner eigenen Entdeckung, der Bedeutung des Unterbewußten für das menschliche Verhalten. Ob wir nun ihre Theorien studiert haben oder nicht, wir sind geistige Erben von Männern wie Kopernikus und Darwin. Unsere fundamentalen Denkprozesse wurden durch sie geformt, genauso wie die Gedanken unserer Enkel und Urenkel durch die Werke Einsteins und Freuds geformt sein werden. Wir brauchen mehr als ein Verständnis der inneren Entwicklung der Wissenschaft. Wir müssen ebenso verstehen, wie die Lösung, die ein Wissenschaftler für ein offensichtlich höchst spezialisiertes und dem Alltagsleben fernstehendes Problem findet, gelegentlich die menschlichen Verhaltensweisen gegenüber den grundlegenden Problemen des täglichen Lebens völlig verändern kann.

## *Die Rolle der Himmel in den ersten Kosmologien*

Ein Großteil dieses Buches beschäftigt sich mit dem Einfluß astronomischer Beobachtungen und Theorien auf antike und frühneuzeitliche kosmologische Vorstellungen. Heute nehmen wir es als gegeben hin, daß die Astronomie einen Einfluß auf die Lehre vom Kosmos hat. Wenn wir Auskunft über die Gestalt des Universums, die Stellung der Erde darin oder die Beziehung zwischen Erde und Sonne beziehungsweise zwischen Sonne und den Sternen haben wollen, so fragen wir den Astronomen oder vielleicht auch den Physiker. Sie haben umfangreiche und genaue Beobachtungen der Himmelserscheinungen und der Erde gemacht, ihr Wissen über das Universum wird durch die Genaugkeit gestützt, mit der sie Vorhersagen treffen. Unsere Alltagsvorstellung vom Universum, unser volkstümliches Wissen vom Universum ist ein Produkt ihrer genauen Untersuchungen. Doch ist diese enge Verknüpfung von Astronomie und Kosmologie erst vor kurzem entstanden und beschränkt sich auf unseren Kulturreis. Jede Zivilisation und Kultur, von der wir Aufzeichnungen besitzen, hatte eine Antwort auf die Frage: „Wie sieht das Universum aus?“ Doch nur die abendländischen Kulturen, die sich von der antiken griechischen Kultur ableiten, haben die Himmelserscheinungen bei der Beantwortung dieser Frage berücksichtigt. Das Bestreben, Kosmologien aufzustellen, ist wesentlich älter und grundlegender als das Bedürfnis, systematische Himmelbeobachtungen zu machen. Außerdem ist die ursprüngliche Form des kosmologischen Interesses besonders lehrreich, weil sie Grundzüge hervorhebt, die in den wesentlich abstrakteren Kosmologien von heute verschleiert bleiben.

Obwohl die primitiven Vorstellungen vom Universum beträchtliche Unterschiede aufweisen, sind sie zumeist durch irdische Erscheinungen geprägt, die den Erfindern dieser Systeme besonders aufgefallen sind. Die Himmel spielen bloß die Rolle eines Behälters für die Erde. Sie sind mit mythischen Figuren bevölkert und von ihnen gelenkt, wobei ihr Einfluß in der Hierarchie der Geister meist proportional zum Abstand von der Erde ist. Zum Beispiel wurde die Erde in einer wichtigen ägyptischen Kosmologie als längliche Schüssel dargestellt. Durch die Schüssel floß der Länge nach der Nil. Ihr flacher Boden war das Nilbecken, auf das die antike ägyptische Zivilisation beschränkt war; ihr gewundener und gewölbter Rand wurde von den Bergen gebildet, die die irdische Welt begrenzten. Über der Erdschüssel war Luft, selbst eine Gottheit, die die umgedrehte gewölbte Schüssel des Himmels stützte. Andererseits ruhte die Erdschüssel auf Wasser, einer weiteren Gottheit, und das Wasser ruhte auf einer dritten Schüssel, die das Universum symmetrisch von unten begrenzte.

Offensichtlich wurden einige der Hauptzüge dieser Vorstellung durch die Welt, wie sie die Ägypter kannten, nahegelegt: Sie lebten in einer länglichen Schüssel, die in der einen Richtung, in der sie erkundet hatten, von Wasser begrenzt wurde; der Himmel erschien (und erscheint heute noch) als Kuppel, wenn man zu ihm an einem klaren Tag oder einer klaren Nacht blickt; da diesbezügliche Beobachtungen fehlten, lag es nahe, für das Universum eine Begrenzung von unten in symmetrischer Weise anzunehmen. Astronomische Erscheinungen wurden zwar nicht ignoriert, doch wurden sie mit geringerer Genauigkeit und in eher religiöser Weise berücksichtigt. Die Sonne war Ra, der Hauptgott der Ägypter, dem zwei Schiffe zur Verfügung standen, eines für seine tägliche Reise durch die Luft und ein zweites für seine nächtliche Rückfahrt durch das Wasser. Die Sterne wurden an das Himmelsgewölbe versetzt; dort bewegten sie sich als weniger wichtige Götter. In einigen Versionen der Kosmologie wurden sie jede Nacht wiedergeboren. Gelegentlich wurden auch genauere Himmelsbeobachtungen berücksichtigt, z. B. wenn die Zirkumpolarsterne, welche bekanntlich niemals unter dem Horizont versinken, als „jene, die keine Müdigkeit kennen“, oder „jene, die keinen Tod kennen“ bezeichnet wurden. Auf Grund solcher Beobachtungen wurde die nördliche Himmelsregion als Gegend identifiziert, in der es keinen Tod geben könne, als Bereich des ewigen Lebens nach dem Tode. Aber solche Spuren von Himmelsbeobachtungen waren eher selten.

Ähnliche kosmologische Vorstellungen kann man in all jenen antiken Zivilisationen, wie Indien und Bybylonien, finden, von denen wir schriftliche Aufzeichnungen besitzen. Andere einfache Kosmologien charakterisieren die noch existierenden primitiven Gesellschaften, die die modernen Anthropologen untersuchen. Offensichtlich erfüllen alle diese Ansätze, den Aufbau des Universums zu skizzieren, ein wesentliches psychologisches Bedürfnis: Sie bilden einen Rahmen für die täglichen Handlungen der Menschen und für die Handlungen seiner Götter. Indem sie die physikalische Beziehung zwischen der Heimstatt des Menschen und dem Rest der Natur erklären, integrieren sie den Menschen im Universum und erlauben es ihm, sich darin heimisch zu fühlen. Der Mensch kann nicht lange ohne Kosmologie existieren, da nur eine Weltanschauung seinen praktischen und geistigen Handlungen Bedeutung gibt und sie durchdringt.

Obwohl die psychologischen Bedürfnisse, die von einer Kosmologie befriedigt werden, universell sind, unterscheiden sich doch die Kosmologien verschiedener Gesellschaften und Zivilisationen wesentlich voneinander. Keine der früher erwähnten primitiven Kosmologien wird heute unsere Anforderungen an ein Weltbild erfüllen, weil wir einer Zivilisation angehören,

die zusätzliche Anforderungen an eine glaubwürdige Kosmologie stellt. Wir werden zum Beispiel eine Kosmologie ablehnen, die zur Erklärung des täglichen Verhaltens der physikalischen Welt Götter in Anspruch nimmt; zumindest in den letzten Jahrhunderten haben wir auf nahezu rein mechanischen Erklärungen bestanden. Noch wichtiger scheint es jedoch, daß wir von einer zufriedenstellenden Kosmologie fordern, daß sie viele Züge der Naturerscheinungen erklärt. Die ursprünglichen Kosmologien waren nur schematische Skizzen vom Spiel der Natur. Sehr wenig ging davon in die Kosmologie ein. Der Sonnengott Ra reist in seinem Boot jeden Tag über den Himmel, doch nichts in der ägyptischen Kosmologie kann die Regelmäßigkeit seiner Reise oder die jahreszeitliche Schwankung des Kurses seines Boots erklären. Nur in unserer eigenen, abendländischen Zivilisation wurde die Erklärung solcher Details als Aufgabe der Kosmologie betrachtet. Keine andere Zivilisation, sei es in der Antike oder in der Moderne, hat eine ähnliche Forderung gestellt.

Die Forderung, daß eine Lehre vom Universum sowohl eine psychologisch befriedigende Weltanschauung als auch eine Erklärung der beobachteten Erscheinungen, etwa der täglichen Verschiebung der Position des Sonnenaufgangs, liefern sollte, hat die Bedeutung kosmologischen Denkens erhöht. Sie führte von dem allgemeinen Bedürfnis nach Vertrautheit mit dem Universum zu einer neuartigen Suche nach wissenschaftlichen Erklärungen und Entdeckungen. Zahlreiche wesentliche Errungenschaften der westlichen Zivilisation hängen von dieser Kombination von Anforderungen ab, die an die kosmologischen Vorstellungen gerichtet wurden. Doch war diese Kombination von Anforderungen nicht immer ohne Probleme. Sie zwang den modernen Menschen, die Konstruktion kosmologischer Vorstellungen Spezialisten – vor allem Astronomen – zu übertragen, die die Fülle von genauen Beobachtungen kennen, die in modernen Kosmologien berücksichtigt werden müssen. Da jede Beobachtung ein zweischneidiges Schwert ist – entweder stimmt sie mit einer Kosmologie überein oder sie steht im Gegensatz dazu – kann diese Delegation einer wissenschaftlichen Aufgabe verheerende Folgen haben. Gelegentlich zerstört ein Astronom aus Gründen, die nur dem Spezialisten zugänglich sind, eine Weltanschauung, die bis dahin die Grundlage der Weltanschauung einer ganzen Zivilisation war und sowohl Fachleuten wie auch Laien diente.

Ein Ereignis dieser Art geschah während der Kopernikanischen Revolution. Um es zu verstehen, müssen wir die wichtigsten Beobachtungen kennenlernen, von denen die zwei bedeutendsten wissenschaftlichen Vorstellungen vom Universum abhängen, nämlich das Ptolemäische und das

Kopernikanische Weltbild. Alle diese Beobachtungen sind mit dem bloßen Auge möglich, wobei aber ein einziger schneller Blick zum Himmel nicht ausreicht. Der Anblick des Himmels in einer klaren Nacht wird zunächst die Vorstellungskraft des Dichters ansprechen und erst später die des Wissenschaftlers. Ein Blick zum nächtlichen Himmel lässt vielleicht zunächst an Shakespeares Beschreibung der Sterne als „Kerzen der Nacht“ oder Miltons Bild der Milchstraße als „einer breiten Straße, deren Staub Gold ist und deren Pflaster die Sterne sind“ denken. Diese Beschreibungen erinnern an die antiken Kosmologien. Sie geben keinerlei Antwort auf Fragen, die die Astronomen stellen. Wie weit entfernt ist die Milchstraße, die Sonne, der Jupiter? Wie bewegen sich diese Lichtquellen? Besteht der Mond aus demselben Material wie die Erde, oder ist er der Sonne ähnlich oder einem Stern? Fragen wie diese erfordern systematische, genaue und quantitative Beobachtungen über einen langen Zeitraum.

Dieses Kapitel handelt daher von den Beobachtungen der Sonne und der Sterne und von der Rolle, die diese Beobachtungen bei der Konzeption der ersten wissenschaftlichen Kosmologien im antiken Griechenland gespielt haben. Das nächste Kapitel vervollständigt die Liste der mit bloßem Auge möglichen Himmelsbeobachtungen durch die Beschreibung der Planetenbewegungen, die der Anlaß zur kopernikanischen Revolution waren.

### *Die scheinbare Bewegung der Sonne*

Spätestens mit dem Ende des zweiten vorchristlichen Jahrtausends (vielleicht auch viel früher) hatten die Babylonier und die Ägypter begonnen, die Bewegung der Sonne systematisch zu beobachten. Zu diesem Zweck entwickelten sie eine primitive Sonnenuhr, die aus einem Stab, dem Gnomon, bestand, der senkrecht in einem ebenen Stück Boden stak. Da die scheinbare Position der Sonne, die Spitze des Gnomons und die Spitze seines Schattens an einem Sonnentag in jedem Augenblick auf einer geraden Linie liegen, bestimmt die Messung von Länge und Richtung des Schattens die Richtung zur Sonne vollständig. Wenn der Schatten kurz ist, steht die Sonne hoch am Himmel; wenn der Schatten nach Osten zeigt, muß sich die Sonne im Westen befinden. Mit wiederholten Beobachtungen des Schattens des Gnomons kann man daher die allgemeine vage Kenntnis der täglichen und jahreszeitlichen Variation der Sonnenposition systematisieren und in Zahlen erhalten. In der Antike haben solche Beobachtungen der Sonne als Zeitmesser und Kalender gedient, was einen wichtigen Beweggrund bildete, die Beobachtungen fort-

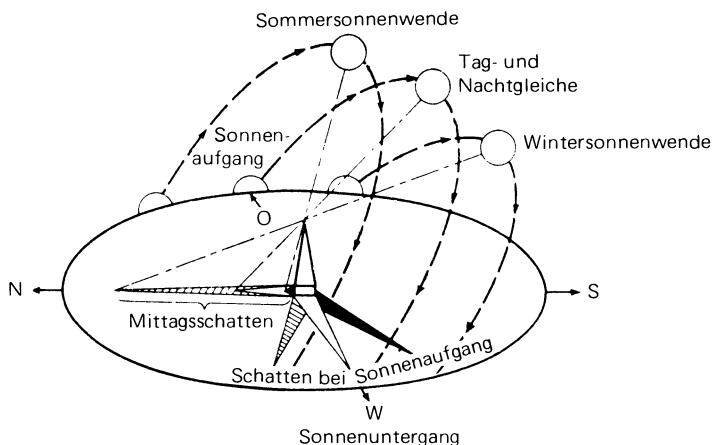
zusetzen und die Methoden zu verfeinern. Länge und Richtung des Schattens eines Gnomons variieren langsam und beständig im Ablauf eines jeden Tages. Am längsten ist der Schatten beim Sonnenaufgang und beim Sonnenuntergang, zu welchen Zeiten er in ungefähr entgegengesetzte Richtungen zeigt. Während der hellen Stunden überstreicht der Schatten eine symmetrische Figur, die an den meisten Orten, die antiken Beobachtern zugänglich waren, etwa wie in Bild 1 aussieht. Wie das Diagramm andeutet, ist die Bahn des Schattens an verschiedenen Tagen verschieden, doch hat sie eine sehr bemerkenswerte Eigenschaft: Erreicht der Schatten des Zeigers im Tagesablauf seine geringste Länge, so zeigt er stets in dieselbe Richtung. Diese einfache Regelmäßigkeit gibt uns zwei grundlegende Bezugsmöglichkeiten für alle weiteren astronomischen Messungen. Die Richtung, die durch den kürzesten Schatten eines jeden Tages angezeigt wird, definiert die Nordrichtung, von der sich die anderen Himmelsrichtungen ableiten. Der Zeitpunkt, zu dem der Schatten am kürzesten wird, gibt uns einen zeitlichen Bezugspunkt, den örtlichen Mittag; das Intervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden örtlichen Mittagen definiert weiterhin eine fundamentale Zeiteinheit, den wahren Sonnentag. Während des ersten vorchristlichen Jahrtausends benutzten die Babylonier, Ägypter, Griechen und Römer primitive irdische Zeitmesser, besonders



**Bild 1** Die tägliche Bewegung des Zeigerstabschattens einer Sonnenuhr zu verschiedenen Jahreszeiten an einem Ort mittlerer nördlicher Breite. Zu Sonnenaufgang und -untergang erstreckt sich der Schatten ins Unendliche, wo er die strichlierte Linie „trifft“. Dazwischen folgt die Spitze des Schattens dieser Linie; zu Mittag zeigt sie stets genau nach Norden.

Wasseruhren, um den Sonnentag in kleinere Intervalle zu unterteilen, von denen sich unsere heutigen Zeiteinheiten, die Stunde, die Minute und die Sekunde, ableiten.\*

Die Himmelsrichtungen und die Zeiteinheiten, die durch die tägliche Bewegung der Sonne festgelegt werden, ermöglichen es, die Änderung dieser Bewegung von einem Tag zum nächsten zu bestimmen. Der Sonnenaufgang findet stets irgendwo im Osten statt, der Sonnenuntergang im Westen, doch die genaue Position des Sonnenaufgangs, die Länge des Schattens des Sonnenstabs zu Mittag und die Anzahl der hellen Stunden ändern sich im Laufe der Jahreszeiten (Bild 2). Die Wintersonnenwende, am 21. Dezember nach unserem Kalender, ist jener Tag, an dem die Sonne am weitesten südlich auf- und untergeht. An diesem Tag gibt es weniger helle Stunden, und der Mittagschatten des Zeigers der Sonnenuhr ist länger als an jedem anderen Tag.



**Bild 2** Abhängigkeit des Gnomonschattens vom Ort des Sonnenaufgangs, von der Mittagshöhe der Sonne und von den Jahreszeiten

---

\* Für astronomische Zwecke bieten die Sterne ein wesentlich zweckmäßigeres Zeitmaß als die Sonne. Jedoch variiert die Länge des wahren Sonnentages auf dieser Sternzeit-skala während der verschiedenen Jahreszeiten um fast eine Minute. Obwohl die antiken Astronomen von dieser kleinen, jedoch wichtigen Unregelmäßigkeit der wahren Sonnenzeit wußten, werden wir sie hier beiseite lassen. Die Ursachen dieser Veränderlichkeit und ihre Bedeutung für die Definition einer Zeitskala werden in Abschnitt 1 des technischen Anhangs behandelt.

Nach der Wintersonnenwende bewegen sich die Punkte am Horizont, an denen die Sonne auf- und untergeht, langsam nach Norden und die Mittags schatten werden kürzer. Zur Frühlings-Tag- und Nachtgleiche am 21. März geht die Sonne fast genau im Osten auf und im Westen unter, Tag und Nacht sind dann gleich lang. Mit Fortschreiten des Jahres bewegen sich die Auf- und Untergangspunkte weiter nach Norden und die Zahl der Tagesstunden nimmt zu, bis die Sonne zur Sommersonnenwende am 21. Juni am weitesten im Norden auf- und untergeht. Dies ist die Zeit des längsten Tages und des kürzesten Schattens der Sonnenuhr. Nach der Sommersonnenwende bewegt sich der Ort des Sonnenaufganges wieder nach Süden und die Nächte werden länger. Zur Herbst-Tag- und Nachtgleiche am 23. September geht die Sonne nahezu genau im Osten auf und im Westen unter, und diese Punkte verschieben sich weiter nach Süden, bis die Wintersonnenwende wiederkehrt.

Wie die modernen Namen der Sonnenwenden und der Tag- und Nachtgleiche anzeigen, entspricht die Bewegung des Sonnenaufgangspunktes entlang des Horizonts dem Kreis der Jahreszeiten. Die meisten Völker der Antike glaubten daher, daß die Sonne die Jahreszeiten kontrolliere. Gleichzeitig verehrten sie die Sonne als eine Gottheit und benutzten sie als Kalender, der das Verstreichen der Jahreszeiten angab, von denen die Ackerbautätigkeit abhängig war. Prähistorische Funde, wie die geheimnisvolle Anlage aus gigantischen Steinen zu Stonehenge in England, zeugen von diesem alten und tiefen Interesse an der Sonne. Stonehenge war eine wichtige Kultstätte, die von Menschen einer frühsteinzeitlichen Kultur aus riesigen Steinen, einige fast dreißig Tonnen schwer, kunstvoll errichtet wurde. Es ist nahezu sicher, daß diese Anlage auch eine Art Observatorium darstellte. Die Steine waren so angeordnet, daß ein Beobachter im Zentrum der Anlage am Midsommertag, der Sommersonnenwende, die Sonne über einem speziell aufgestellten Stein aufgehen sah, der „Freyas Ferse“ genannt wird.

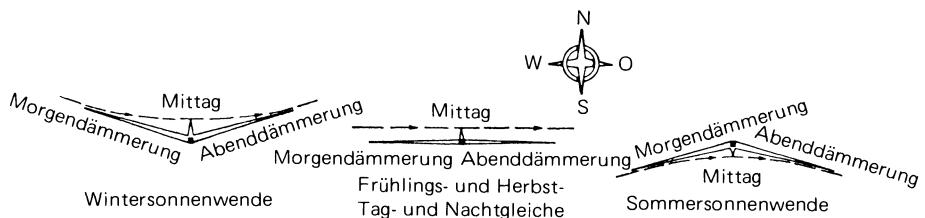
Die Länge des Kreises der Jahreszeiten – das Intervall von einer Tag- und Nachtgleiche im Frühling zur nächsten – definiert die grundlegende Kalendereinheit, das Jahr, ebenso wie die tägliche Bewegung der Sonne den Tag definiert. Doch ist das Jahr eine wesentlich schwieriger zu messende Einheit als der Tag, und die Forderung nach brauchbaren Kalendern hat daher die Astronomen beständig vor ein Problem gestellt, dessen Bedeutung während des 16. Jahrhunderts eine wesentliche Rolle für die Arbeiten von Kopernikus spielte. Die frühesten Sonnenkalender der Antike basierten auf einem Jahr von 360 Tagen, einer schönen runden Zahl, die bestens in das auf der Zahl sechs beruhende Zahlensystem der Babylonier paßte. Doch dauert der Kreis der Jahreszeiten länger als 360 Tage, so daß der Neujahrstag dieser

frühen Sonnenkalender schrittweise durch die Jahreszeiten vom Winter über den Herbst zum Sommer und wieder zum Frühling wanderte. Der Kalender war daher für längere Zeitabschnitte kaum brauchbar, weil wichtige, mit den Jahreszeiten zusammenhängende Ereignisse, wie die Nil-Überschwemmung in Ägypten, in aufeinanderfolgenden Jahren zu immer späteren Zeiten erfolgten. Um den Kalender im Einklang mit den Jahreszeiten zu halten, fügten daher die Ägypter fünf zusätzliche Tage, eine Reihe von Feiertagen, ihrem ursprünglichen Jahr hinzu.

Jedoch dauert der Ablauf der Jahreszeiten keine ganze Anzahl von Tagen. Das Jahr mit 365 Tagen ist ebenfalls zu kurz und nach 40 Jahren war der ägyptische Kalender wiederum 10 Tage hinter den Jahreszeiten her. Als daher Julius Cäsar den Kalender mit Unterstützung ägyptischer Astronomen reformierte, legte er seinem neuen Kalender ein Jahr von  $365 \frac{1}{4}$  Tagen zu grunde. Auf 3 Jahre von 365 Tagen folgte eines mit 366 Tagen. Dieser Julianische Kalender wurde in Europa von seiner Einführung im Jahre 45 v. Chr. bis nach dem Tod von Kopernikus verwendet. Allerdings ist das Jahr der Jahreszeiten tatsächlich 11 Minuten und 14 Sekunden kürzer als  $365 \frac{1}{4}$  Tage, so daß sich zu Kopernikus' Lebzeiten das Datum der Frühlingstag- und Nachtgleiche vom 21. auf den 11. März verschoben hatte. Das entsprechende Bedürfnis nach einer Kalenderreform (siehe Kapitel 4 und 5) gab der Reform der Astronomie selbst einen wichtigen Anstoß, und die Reform, die dem Abendland seinen modernen Kalender gab, folgte der Publikation von *De Revolutionibus* mit einem Abstand von nur 39 Jahren. In dem neuen Kalender, dem Papst Gregor XIII in weiten Gebieten Europas im Jahre 1582 zur Anerkennung verhalf, wird das Schaltjahr dreimal in 400 Jahren unterdrückt. Das Jahr 1600 war ein Schaltjahr, das Jahr 2000 wird eines sein, doch die Jahre 1700, 1800 und 1900, die im julianischen Kalender ebenfalls Schaltjahre waren, hatten im gregorianischen Kalender 365 Tage.

Die oben beschriebenen Beobachtungen zeigen die Sonne ungefähr so, wie sie einem Astronomen in Gegenden mittlerer nördlicher Breite erscheinen würde, in Gegenden also, die Griechenland, Mesopotamien und Nordägypten einschließen, wo nahezu alle antiken Beobachtungen gemacht wurden. Aber innerhalb dieses Gebietes gibt es eine beträchtliche quantitative Variation verschiedener Aspekte des Verhaltens der Sonne, und im südlichen Teil von Ägypten ergibt sich sogar eine qualitative Änderung. Die Kenntnis all dieser Änderungen floß in die Konstruktion antiker astronomischer Theorien ein. Keine Veränderungen wurden beobachtet, wenn sich ein Beobachter nach Osten oder nach Westen bewegte. Aber auf einer Reise in den Süden fand er, daß der Schatten des Gnomons zu Mittag kürzer

war und die Sonne höher am Himmel stand, als es am selben Tag in nördlicheren Gebieten der Fall war. In ähnlicher Weise ist der Unterschied zwischen der Tages- und der Nachtänge in den südlichen Regionen geringer. Auch bewegt sich dort die Sonne entlang des Horizonts im Jahreslauf nicht so weit nach Norden und Süden. Keine dieser Variationen ändert die qualitative Beschreibung, die wir früher gegeben haben. Doch wenn sich ein Beobachter in der Sommerzeit weit ins südliche Ägypten begibt, wird er zunächst den Schatten des Gnomons zu Mittag immer kürzer finden, bis er zuletzt völlig verschwindet und sich endlich wieder zeigt, diesmal nach Süden weisend. In den südlichen Teilen Ägyptens sieht das jahreszeitliche Verhalten des Schattens des Gnomons etwa wie in Bild 3 aus. Reisen wir noch weiter nach Süden oder auch weiter nach Norden, werden sich andere Anomalien in den beobachteten Bewegungen der Sonne zeigen. Doch diese wurden in der Antike nicht beobachtet. Wir werden sie erst dann diskutieren, wenn wir die astronomischen Theorien besprechen, die ihre Vorhersage vor ihrer Beobachtung ermöglichten (Seite 35 ff.)



**Bild 3** Tägliche Bewegung des Gnomonschattens in der nördlichen heißen Zone in den verschiedenen Jahreszeiten

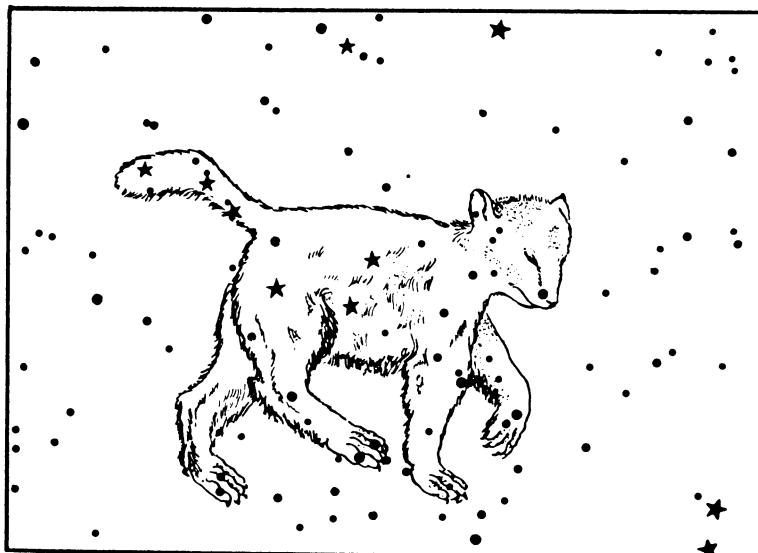
### Die Sterne

Die Bewegungen der Sterne sind viel einfacher und regelmäßiger als die der Sonne. Diese Regelmäßigkeit erkennt man jedoch nicht so leicht, weil ihre systematische Erforschung die Möglichkeit voraussetzt, einzelne Sterne zur Beobachtung auszusondern, wo immer sie am Himmel erscheinen. In der modernen Welt ist diese Fähigkeit, die nur durch längere Übung erreicht werden kann, ziemlich selten. Wenige Leute verbringen ihre Zeit nachts außerhalb der Häuser, und wenn sie es doch tun, dann ist das Bild, das sie

vom Himmel sehen, häufig durch riesige Gebäude und durch die Straßenbeleuchtung beeinträchtigt. Außerdem spielt die Himmelsbeobachtung keine direkte Rolle im Leben des Einzelnen mehr. In der Antike waren hingegen die Sterne ein unmittelbarer Bestandteil der Umwelt des Menschen, Himmelskörper dienten als Zeitmaß und Kalender. Unter diesen Umständen war die Fähigkeit, Sterne auf einen Blick zu identifizieren, ziemlich weit verbreitet. Lange vor dem Beginn schriftlicher Aufzeichnungen hatten bereits Menschen, für die die dauernde Beobachtung des Nachthimmels lebenswichtig war, die Sterne im Geiste in Sternbildern angeordnet, in Gruppen von benachbarten Sternen, die als festes Muster gesehen und erkannt werden konnten. Um einen einzelnen Stern zu finden, mußte ein Beobachter bloß das vertraute Sternbild auffinden, in dem sich der gesuchte Stern befindet, und den Stern darin lokalisieren.

Zahlreiche Sternbilder, die auch von modernen Astronomen benutzt werden, verdanken ihre Namen mythologischen Figuren der Antike. Einige finden sich sogar auf babylonischen Keilschrifttafeln, die zum Teil aus dem dritten vorchristlichen Jahrtausend stammen. Obwohl die moderne Astronomie einige Definitionen geändert hat, gehören die größeren Sternbilder zu unseren ältesten Erbstücken. Wie diese Sterngruppen zuerst ausgewählt wurden, ist jedoch noch unbekannt. Wenige Leute können einen Bären im großen Bären (Bild 4) erkennen, und auch andere Sternbilder bieten ähnliche Probleme. Vermutlich sind die Sterne ursprünglich bloß zweckmäßig zusammengefaßt und willkürlich benannt worden. Doch wurden sie sehr sonderbar gruppiert. Die antiken Sternbilder haben unregelmäßige Begrenzungen und bedecken Gebiete völlig verschiedener Größe am Himmel. Sie sind nicht sehr zweckmäßig gewählt, was einer der Gründe ist, warum man heute ihre Begrenzungen anders definiert. Vermutlich hat der antike Schäfer oder Seefahrer beim stundenlangen Anblick des Himmels die ihm vertrauten mythologischen Gestalten in den Sternen gezeichnet gesehen, gerade so wie wir hin und wieder Gesichter in den Wolken oder in den Umrissen von Bäumen zu sehen glauben. Die Experimente der modernen Gestaltpsychologie zeigen das universelle menschliche Bedürfnis, vertraute Bilder in offensichtlich zufälligen Anordnungen zu entdecken, ein Bedürfnis, das dem wohlbekannten Rohrschachttest zugrunde liegt. Wenn wir mehr über ihren historischen Ursprung wüßten, würden uns die Sternbilder mehr nutzbringende Information über die geistigen Qualitäten prähistorischer Gesellschaften geben, die sie zuerst benannt haben.

Das Studium der Sternbilder entspricht dem Vertrautmachen mit einer Landkarte und dient demselben Zweck: Die Sternbilder erleichtern die

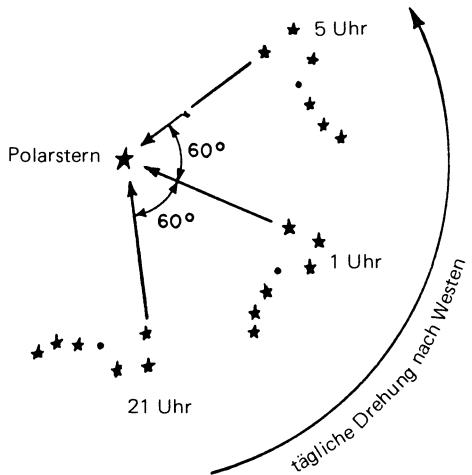


**Bild 4** Das Sternbild Ursa Major am nördlichen Himmel. Man beachte den Großen Wagen, dessen Deichsel den Schwanz des Bären bildet. Der Polarstern steht in auffälliger Weise direkt über dem rechten Ohr des Bären. Er liegt fast auf einer Linie durch die beiden rückwärtigen Achsensterne.

Orientierung am Himmel. Damit kann man zum Beispiel leicht einen Kometen im Sternbild des Schwanes finden, der kaum zu entdecken wäre, wenn man bloß wüßte, daß er irgendwo am Himmel ist. Die von den Sternbildern gebildete Sternkarte ist jedoch keine gewöhnliche Karte, da diese Bilder stets in Bewegung sind. Weil sie sich jedoch alle zusammen bewegen und dabei ihre Gestalt und ihre relative Lage bewahren, verringert die Bewegung nicht ihre Nützlichkeit. Ein Stern im Schwan wird stets im Schwan zu finden sein und der Schwan wird stets den gleichen Abstand vom großen Bären haben.\* Jedoch bleiben weder Schwan noch großer Bär lange am selben Ort am Himmel. Sie verhalten sich wie Städte auf einer Landkarte, die auf einem rotierenden Schallplattenteller liegt.

---

\* „Abstand“ bedeutet hier „Winkelabstand“, also den Winkel zwischen zwei vom Auge des Beobachters zu den beiden Himmelskörpern gezogenen Linien, deren Abstand gemessen werden soll. Das ist der einzige Abstand, den Astronomen direkt messen können, d. h. ohne Rechnungen auf Grund einer Theorie über die Struktur des Universums.



**Bild 5** Aufeinander folgende Positionen des Großen Wagens in vierstündigen Abständen nachts im späten Oktober

Sowohl die feste relative Lage als auch die Bewegungen der Sterne sind in Bild 5 angedeutet, die Ort und Lage des großen Wagen, eines Teiles des Großen Bären, zu drei verschiedenen Zeiten während einer Nacht zeigt. Das Muster der sieben Sterne im Wagen ist jeweils gleich. Auch bleibt die Beziehung zwischen dem Wagen und dem Polarstern fest; dieser liegt  $29^\circ$  über der offenen Seite des Wagens auf einer geraden Linie durch die hintere Achse. Andere Diagramme würden ähnliche, unveränderliche geometrische Beziehungen zwischen anderen Sternen am Himmel zeigen.

Bild 5 zeigt eine weitere wichtige Eigenschaft der Sternbewegung. Während die Sternbilder mit ihren Sternen über den Himmel wandern, bleibt der Polarstern nahezu stationär. Sorgfältige Beobachtungen zeigen, daß er tatsächlich während der Nacht nicht völlig still steht, doch es gibt einen anderen Punkt am Himmel, der gegenwärtig nicht einmal ein Grad vom Polarstern entfernt ist, der genau die Eigenschaften hat, die in Bild 5 dem Polarstern zugeschrieben werden. Dieser Punkt wird der Himmelsnordpol genannt. Ein Beobachter an einer festen Stelle auf der nördlichen Hemisphäre wird ihn stets, Stunde für Stunde und Nacht für Nacht, in derselben festen Entfernung über dem nördlichen Horizont finden. Ein gerader Stab, der so befestigt ist, daß er zum Pol weist, wird auch weiterhin zum Pol zeigen,

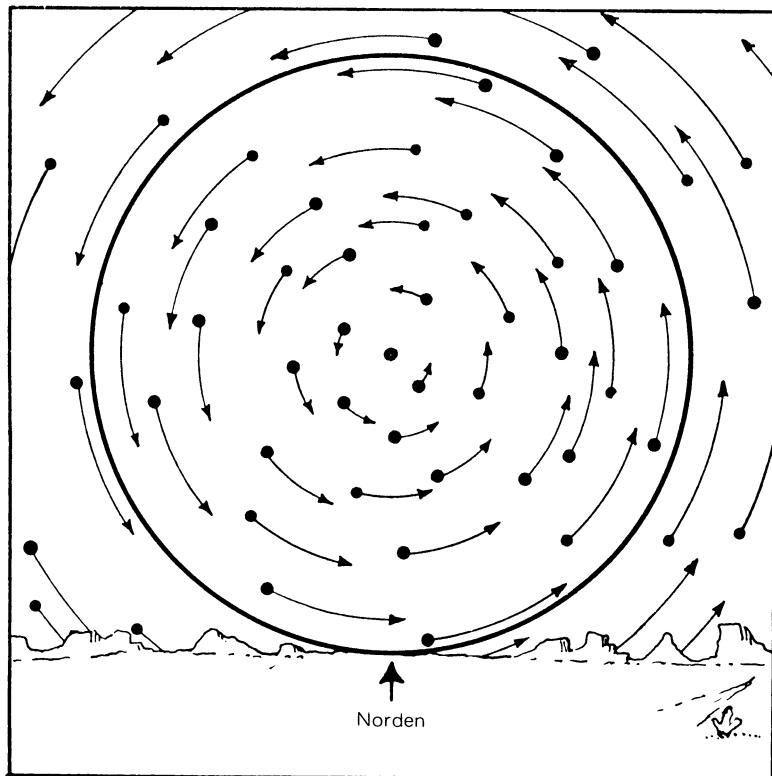
während sich die anderen Sterne bewegen. Gleichzeitig jedoch verhält sich der Himmelspol wie ein Stern. Daher behält der Pol seine geometrische Beziehung zu den Sternen über lange Zeiträume bei.\*

Da der Himmelspol für jeden beliebigen irdischen Beobachter feststeht und die Sterne ihren Abstand von diesem Punkt bei ihrer Bewegung nicht ändern, scheint jeder Stern auf einem Kreisbogen zu wandern, dessen Mittelpunkt der Himmelspol ist. Bild 5 zeigt einen Teil dieser Kreisbewegung der Sterne im großen Wagen.

Die konzentrischen Kreise, die bei der Wanderung der Sterne um den Pol beschrieben werden, nennt man ihre Tageskreise, die Sterne bewegen sich darauf mit einer Geschwindigkeit von knapp mehr als  $15^\circ$  pro Stunde. Zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang vollendet kein einziger Stern einen ganzen Kreis. Beobachtet man den nördlichen Himmel während einer klaren Nacht, so kann man die Sterne in der Nähe des Pols etwa durch einen Halbkreis verfolgen. In der nächsten Nacht kann man sie wiederum auf denselben Kreisbahnen mit denselben Geschwindigkeiten finden. Auch wird man sie an genau den Stellen finden, die sie erreicht hätten, wenn sie ihre gleichmäßige Bewegung den ganzen dazwischenliegenden Tag fortgesetzt hätten. Seit der Antike haben die meisten Beobachter, denen diese Regelmäßigkeiten bekannt waren, angenommen, daß die Sterne während des Tages genauso wie während der Nacht existieren und sich bewegen, daß aber während des Tages das starke Licht der Sonne sie dem bloßen Auge unsichtbar macht. Nach dieser Deutung bewegen sich die Sterne gleichmäßig in 23 Stunden 56 Minuten auf einem vollständigen Kreis. Ein Stern, der um 9 Uhr abends am 23. Oktober genau unterhalb des Himmelspols steht, wird am Abend des 24. Oktober um 8 Uhr 56 an dieselbe Stelle zurückkehren und am 25. Oktober um 8 Uhr 52. Am Ende des Jahres wird er diese Stelle unterhalb des Poles vor dem Sonnenuntergang erreichen und er wird daher in dieser Stellung überhaupt nicht sichtbar sein.

---

\* Beobachtungen, die im Laufe vieler Jahre gemacht wurden, zeigen, daß sich die Polposition gegenüber den Sternen sehr langsam ändert – etwa 1 Grad in 180 Jahren. Wir werden diese langsame Bewegung, die Teil der „Präzession der Äquinoktien“ ist, in Abschnitt 2 des technischen Anhangs besprechen. Obwohl man in der Antike davon bereits zu Ende des zweiten vorchristlichen Jahrhunderts wußte, spielte die Präzession eine sekundäre Rolle bei der Konstruktion astronomischer Theorien; sie ändert nicht die kurzfristigen Beobachtungen, die wir soeben beschrieben haben. Es hat immer einen Himmelsnordpol mit derselben Distanz über dem nördlichen Horizont gegeben, jedoch waren nicht immer dieselben Sterne in seiner Nähe.

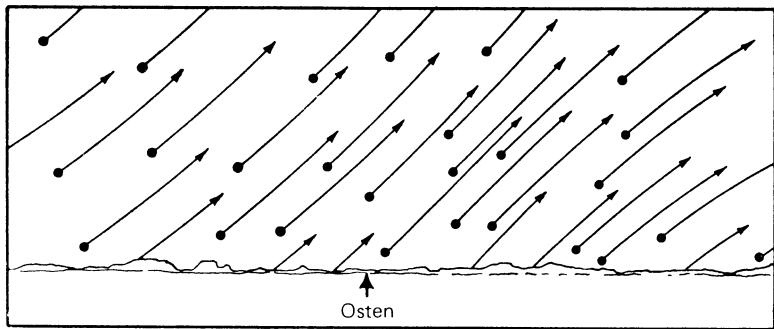


**Bild 6** Kurze Kreisbögen, wie sie von typischen Sternen innerhalb von zwei Stunden am nördlichen Himmel beschrieben werden. Der dick gezeichnete Kreis tangential zum Horizont trennt die Zirkumpolarsterne von denen, die auf- und untergehen. Sternpfade wie diese können erhalten werden, indem man eine Kamera genau auf den Himmelpol richtet und den Verschluß offen läßt, während sich der Himmel dreht. In jeder Stunde wachsen die aufgezeichneten Spuren um 15 Grad. Man beachte jedoch, daß die geneigte Kamera eine Verzerrung ergibt. Wenn der Pol 45 Grad über dem Horizont steht (eine typische Größe für mittlere nördliche Breiten), erscheint ein Stern ganz oben auf dem dicken Kreis genau über dem Kopf des Beobachters. Damit erklärt sich der Unterschied der Sternpfade in diesem Bild zu denen von Bild 7a) und b).

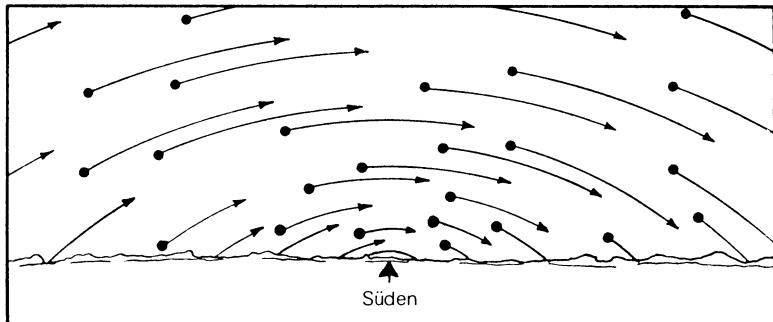
In den mittleren nördlichen Breiten befindet sich der Himmelstpol etwa 45 Grad über dem Horizont. (Die Höhe des Poles über dem Horizont ist genau der geographischen Breite des Beobachters gleich – dies ist gerade eine Möglichkeit, geographische Breiten zu messen). Daher können Sterne, die in einem Abstand von weniger als 45 Grad vom Pol, oder wie groß immer die geographische Breite des Beobachters auch sein mag, liegen, niemals unter dem Horizont verschwinden, sie müssen zu jeder Stunde in einer klaren Nacht sichtbar sein. Dies sind die Zirkumpolarsterne, „jene, die keine Vernichtung kennen“, wie sie von den antiken ägyptischen Kosmologen genannt wurden. Sie sind ferner die einzigen Sterne, deren Bewegung leicht als kreisförmig erkannt wird.

Sterne, die vom Pol weiter entfernt sind, bewegen sich ebenfalls auf Tageskreisen, doch ein Teil dieser Kreise ist unter dem Horizont verborgen (Bild 6). Daher kann man bei diesen Sternen gelegentlich den Auf- oder Untergang sehen, wie sie am Horizont erscheinen und verschwinden. Sie sind nicht immer die ganze Nacht sichtbar. Je weiter solch ein Stern vom Pol entfernt ist, desto kleiner ist sein Tageskreis über dem Horizont, und umso schwieriger ist es, den sichtbaren Teil seines Weges als Teil eines Kreises zu erkennen. Zum Beispiel ist ein Stern, der genau im Osten aufgeht, auf der Hälfte seines Tageskreises sichtbar. Er bewegt sich nahezu auf derselben Bahn, die die Sonne zur Zeit einer der Tag- und Nachtgleichen durchläuft, indem er vom Horizont schräg aufwärts und nach Süden fortschreitet (Bild 7a). Er erreicht seine maximale Höhe an einer Stelle über der rechten Schulter eines nach Osten blickenden Beobachters. Schließlich geht er im Westen entlang einer abwärts und nach Norden gerichteten Bahn unter. Sterne, die vom Pol noch weiter entfernt sind, erscheinen nur kurz über dem südlichen Horizont. In südlicher Blickrichtung gehen sie sehr bald nach ihrem Aufgang unter und erreichen niemals eine große Höhe über dem Horizont (Bild 7b). Da sie fast ein halbes Jahr lang während der Tagesstunden auf- und untergehen, gibt es viele Nächte, in denen man sie überhaupt nicht sehen kann.

Diese qualitativen Züge des Nachthimmels sind dem gesamten Gebiet gemeinsam, innerhalb dessen antike astronomische Beobachtungen gemacht wurden, doch hat die soeben gegebene Beschreibung einige wesentliche quantitative Unterschiede ausgelassen. Wenn ein Beobachter nach Süden reist, nimmt die Höhe des Poles über dem nördlichen Horizont etwa  $1^\circ$  pro 110 km ab, die nach Süden zurückgelegt werden. Die Sterne bewegen sich weiterhin in Tageskreisen um den Pol, doch da der Pol dem Horizont näher ist, werden einige Sterne, die im Norden als Zirkumpolarsterne erschienen, nun als auf- und untergehende Sterne gesehen. Sterne, die im Osten auf- und im Westen



(a)



(b)

**Bild 7** Sternpfade über (a) dem östlichen und (b) südlichen Horizont. Wie in Bild 6 zeigen diese Abbildungen die Bewegungen typischer Sterne innerhalb von zwei Stunden. Hier ist die „Kamera“ auf den Horizont gerichtet.

untergehen, werden weiterhin an denselben Stellen am Horizont erscheinen und verschwinden, doch weiter im Süden wird ihre Bahn gegenüber dem Horizont steiler erscheinen, sie werden ihre maximale Höhe eher über dem Scheitel des Beobachters erreichen. Das Bild des südlichen Himmels ändert sich noch mehr. Während der Pol näher zum Horizont sinkt, erheben sich die Sterne am südlichen Himmel zu größerem Abstand über dem Horizont, da ihr Winkelabstand zum Pol gleich bleibt. Ein Stern, der sich – im Norden beobachtet – kaum über den Horizont erhebt, wird sich, bei einer Beobach-

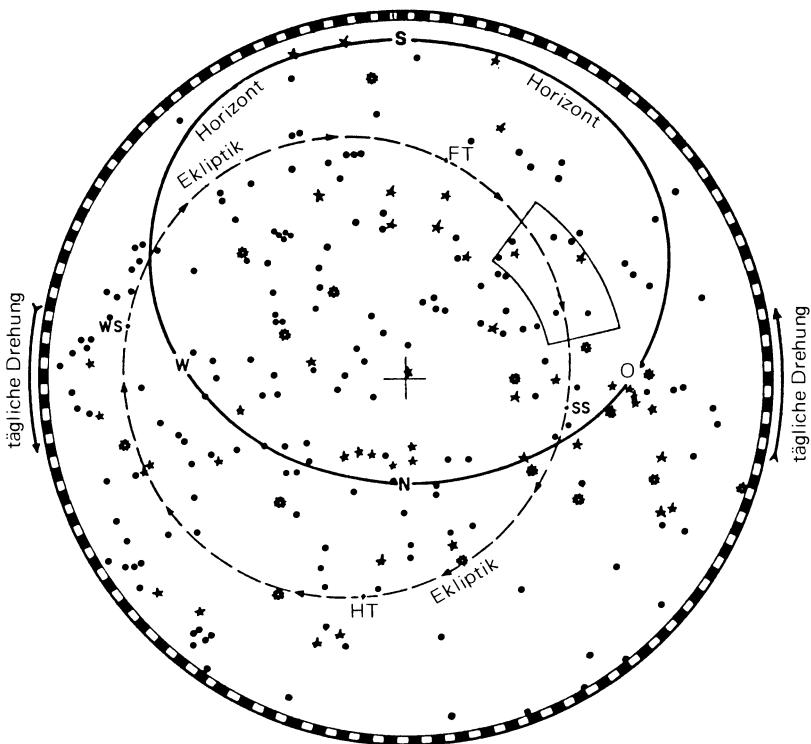
tung weiter südlich, höher bewegen und länger sichtbar sein. Ein südlicher Beobachter wird Sterne sehen, die sich nur wenig über dem südlichen Horizont erheben, doch werden diese Sterne einem nördlicheren Beobachter niemals zu Augen kommen. Wenn man sich nach Süden begibt, sieht man immer weniger Zirkumpolarsterne – Sterne, die die ganze Nacht sichtbar sind, doch wird man von Zeit zu Zeit Sterne beobachten, die im höheren Norden nicht sichtbar sind.

### *Die Bewegung der Sonne*

Da die Sterne und der Himmelstyp ihre gegenseitige Lage stets beibehalten, können sie ein- für alle mal auf einer Himmels- oder Sternkarte eingezeichnet werden. Eine Form einer Sternkarte ist in Bild 8 dargestellt. Andere kann man in Atlanten oder Astronomiebüchern finden. Die Karte in Bild 8 zeigt alle helleren Sterne, die von einem Beobachter in mittleren nördlichen Breiten gesehen werden können, doch nicht alle Sterne auf der Karte können gleichzeitig gesehen werden, da sie nicht alle gleichzeitig über dem Horizont stehen. Ungefähr zwei Fünftel der Sterne auf der Karte liegen jeweils unter dem Horizont.

Die Zahl der gerade sichtbaren Sterne hängt von Tag und Stunde der Beobachtung ab. Zum Beispiel umschließt die durchgezogene Linie auf der Karte, an der die vier Himmelsrichtungen Nord, Ost, Süd, West eingezeichnet sind, den Teil des Himmels, der in mittleren nördlichen Breiten am 23. Oktober um neun Uhr abends beobachtet werden kann. Sie stellt daher den Horizont des Beobachters dar. Wenn man die Karte über dem Kopf hält, so daß ihr Boden nach Norden zeigt, so werden die vier Himmelsrichtungen ungefähr mit den entsprechenden Punkten am wahren Horizont übereinstimmen. Die Karte zeigt dann, daß zu dieser Stunde und Jahreszeit der große Wagen gerade über dem nördlichen Horizont erscheint und daß beispielsweise das Sternbild Cassiopeia in der Nähe des Zentrums des sichtbaren Himmels liegt, an einer Stelle, die am Himmel nahezu über dem Kopf des Beobachters liegt. Da die Sterne in genau 23 Stunden 56 Minuten an ihren Platz zurückkehren, muß dieselbe Stellung der Karte die Lage der Sterne um 20 Uhr 56 am 24. Oktober, um 20 Uhr 52 am 25. Oktober und so weiter anzeigen.

Der Leser möge sich nun vorstellen, daß die Horizontlinie, die das Gesichtsfeld des Beobachters umschließt, in ihrer gegenwärtigen Position

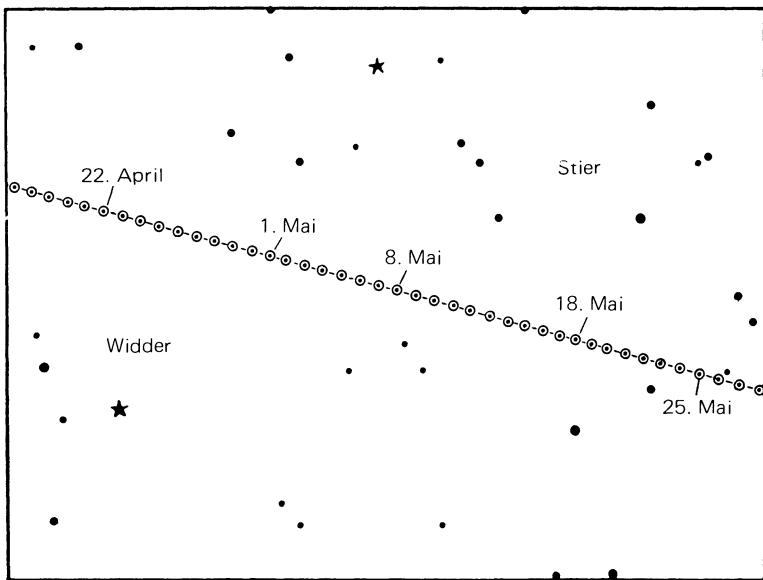


**Bild 8** Eine Sternkarte mit allen wichtigen Sternen, die ein Beobachter auf etwa 45 Grad nördlicher Breite jemals sehen kann. Das Kreuz in der Mitte der Karte zeigt die Stelle des Himmelspols an. Wenn die Karte horizontal über den Kopf gehalten wird, so daß die Schauseite nach unten und der Fuß der Karte nach Norden weist, wird sie die Stellung der Sterne um 9 Uhr abends am 23. Oktober an einem Beobachtungsort in mittlerer nördlicher Breite zeigen. Die feste Linie stellt den Horizont dar, die Sterne innerhalb können zu diesem Zeitpunkt gesehen werden; jene außerhalb liegen unter dem Horizont. Sterne, die innerhalb des Horizontfensters in der Nähe von N liegen, sieht man gerade über dem Horizont in nördlicher Richtung; jene in der Nähe von O in östlicher. Um die Stellung von Sternen zu einer späteren Stunde des 23. Oktober zu finden, stelle man sich das Horizontfenster festgehalten vor und die Sternkarte dahinter im Gegensinn des Uhrzeigers um den Pol gedreht, um 15 Grad pro verflossener Stunde. Diese Bewegung läßt die Sterne über dem östlichen Horizont auf- und am westlichen untergehen. Um die Stellung der Gestirne an einem späteren Tag um 9 Uhr abends zu finden, muß die Karte im Uhrzeigersinn um 1 Grad gedreht werden. Verbindet man beide Drehungen, kann man die Sternörter zu jedem beliebigen Zeitpunkt finden. Die strichlierte Linie um den Pol ist die Ekliptik, der scheinbare Weg der Sonne durch die Sterne (s. S. 24). Der Rahmen, der einen Teil der Ekliptik im rechten oberen Quadranten einfäßt, enthält die Himmelsregion, die in den Bildern 9 und 15 verwendet wird.

auf dem Papier festgehalten wird, während sich die gesamte Sternkarte langsam darunter im Gegensinn des Uhrzeigers um den Himmelsspöl dreht. Eine Drehung der Scheibe um 15 Grad bringt gerade jene Sterne in das Horizontfenster, die um 22 Uhr am 23. Oktober sichtbar sind. Eine Drehung um 45 Grad bringt die um Mitternacht sichtbaren Sterne in das Horizontfenster. Die Positionen aller hellen Sterne können auf diese Weise zu jeder Nachtstunde gefunden werden.

Neben der Ortung der Fixsterne haben Sternkarten noch weitere nützliche Anwendungen: Man kann sie benützen, um das Verhalten von Himmelskörpern, die wie Mond, Kometen oder Planeten langsam ihre Stellung gegenüber den Sternen ändern, zu beschreiben. Zum Beispiel wußte man bereits in der Antike, daß die Bahn der Sonne eine besonders einfache Gestalt annimmt, wenn man sie auf die Sterne bezieht. Da die Sterne kurz nach Sonnenuntergang sichtbar werden, kann ein Beobachter, der weiß, wie er ihre Bewegung verfolgen kann, Zeit und Ort des Sonnenuntergangs festhalten und die Zeit zwischen Sonnenuntergang und dem ersten Erscheinen der Sterne messen, und daraufhin den Ort der Sonne auf einer Sternkarte feststellen, indem er die Karte rückwärts dreht und die Sterne bestimmt, die an der angegebenen Stelle des Horizonts zur Zeit des Sonnenuntergangs standen. Trägt man die Position der Sonne auf einer Sternkarte für einige aufeinanderfolgende Abende ein, so wird man sie jedesmal fast am selben Ort finden, die Positionen verändern sich lediglich um etwa ein Grad, was etwa dem doppelten Winkeldurchmesser der Sonne entspricht. Bild 9 zeigt die Stellung der Sonne auf einer Sternkarte an aufeinanderfolgenden Abenden von Mitte April bis Ende Mai.

Diese Beobachtungen legen nahe, daß sowohl die tägliche Bewegung der Sonne, als auch ihre langsame Verschiebung entlang des Horizonts nach Norden und nach Süden zweckmäßigerweise beschrieben werden können, indem man die Sonne als ein Objekt betrachtet, das sich von Tag zu Tag gegenüber den Sternen langsam bewegt. Wenn für irgendeinen Tag die Stellung der Sonne gegenüber den Sternen angegeben ist, dann wird an jenem Tag die Bewegung der Sonne nahezu exakt der täglichen Bewegung eines Sternes an der entsprechenden Stelle der Sternenkarte entsprechen. Beide werden sich wie Punkte auf der rotierenden Sternkarte bewegen, im Osten entlang einer aufwärtsgerichteten Bahn aufgehend und sich nach Süden und später nach Westen wenden. Einen Monat später wird die Sonne die tägliche Bewegung eines Sternes mitmachen, der vom Ort des ersten Sternes um 30 Grad entfernt ist. Während des dazwischenliegenden Monats hat sich die Sonne langsam und stetig zwischen diesen zwei Stellungen, die auf der Karte um



**Bild 9** Bewegung der Sonne durch die Sternbilder Widder und Stier. Die Kreise stellen den Ort der Sonne beim Untergang an aufeinander folgenden Tagen von Mitte April bis Ende Mai dar.

30 Grad auseinanderliegen, bewegt. Jeden Tag war ihre Bewegung fast genau die eines Sternes, indem sie einen Kreisbogen um den Himmelsspalt beschrieb, doch hat sie sich an zwei aufeinanderfolgenden Tagen nicht wie derselbe Stern verhalten.

Wird die Stellung der Sonne auf einer Sternkarte Tag für Tag eingetragen und werden diese Punkte verbunden, so entsteht eine glatte Kurve, die sich am Ende des Jahres schließt. Diese Kurve, die *Ekliptik*, ist auf der Sternkarte (Bild 8) als strichlierte Linie eingetragen. Man findet die Sonne stets irgendwo auf dieser Linie. Während die Ekliptik durch die gemeinsame tägliche Bewegung der Sterne rasch über den Himmel bewegt wird, bewegt sich die Sonne mit ihr, indem sie wie ein Stern auf- und untergeht, der an einem Punkt auf dieser Linie fixiert ist. Doch gleichzeitig bewegt sich die Sonne langsam entlang der Ekliptik und nimmt jeden Tag einen geringfügig anderen Ort ein. Auf diese Weise kann die komplizierte Schraubenbewegung der Sonne als Ergebnis von zwei viel einfacheren Bewegungen verstanden werden. Die gesamte scheinbare Bewegung der Sonne besteht aus ihrer täg-

lichen Bewegung, der westwärts gerichteten kreisförmigen Bewegung aufgrund der Drehung der gesamten Sternkarte im Gegensinn des Uhrzeigers, und einer gleichzeitigen langsamem, ostwärts gerichteten Bewegung auf der Ekliptik, die um den Himmelspol im Uhrzeigersinn verläuft.

In dieser Weise analysiert, zeigt die Bewegung der Sonne große Ähnlichkeit mit der Bewegung eines Fahrgeldkassierers auf einem Karussell. Der Kassierer wird rasch mit den Drehungen des Karussells herumgeführt. Aber während er langsam von Holzpferd zu Holzpferd geht und das Fahrgeld kassiert, ist seine Bewegung anders als die der reitenden Kinder. Wenn er in eine Richtung schreitet, die der Drehrichtung des Karussells entgegengesetzt ist, wird seine Bewegung gegenüber dem Erdboden etwas langsamer sein als die des Karussells, und die Reiter werden eine Umdrehung etwas früher beendet haben als er. Wenn ihn seine Aufgabe einmal näher zum Zentrum und dann wieder weg führt, wird seine Gesamtbewegung bezüglich des Erdbodens nicht mehr kreisförmig sein, sondern eine komplizierte Kurve bilden, die sich am Schluß einer einzelnen Umdrehung nicht mehr schließt. Obwohl es theoretisch möglich ist, seine Bewegung gegenüber dem ruhenden Erdboden genau anzugeben, ist es wesentlich einfacher, diese in ihre zwei Bestandteile zu zerlegen: Eine gleichförmige schnelle Drehung mit dem Karussell und eine langsamere, weniger regelmäßige Bewegung bezüglich letzterem. Seit der Antike haben die Astronomen eine ähnliche Trennung bei der Analyse der scheinbaren Bewegung der Sonne vorgenommen. Jeden Tag bewegt sich die Sonne schnell nach Westen *mit den Sternen*, das ist die sogenannte Tagesbewegung; gleichzeitig bewegt sich die Sonne *gegenüber den Sternen* entlang der Ekliptik nach Osten, dies ist ihre Jahresbewegung.

Mit der Unterteilung der gesamten Sonnenbewegung in zwei Komponenten kann ihr Verhalten einfacher und genauer beschrieben werden, indem man benachbarte Punkte auf der Ekliptik mit dem Tag und der Stunde bezeichnet, an denen die Sonne sie erreicht. Die Kette dieser Punkte gibt uns die jährliche Komponente der Sonnenbewegung an, die tägliche Bewegung wird durch die Drehung der Karte im ganzen spezifiziert. Wie man in Bild 8 leicht sieht, gibt es einen Punkt, mit *SS* bezeichnet, der auf der Ekliptik dem Himmelspol näher liegt als jeder andere. Kein anderer Punkt auf der Ekliptik geht im Norden so weit auf und unter, kein anderer Punkt bleibt während der täglichen Drehung so lange innerhalb des Horizontfensters. Daher entspricht er der Sommersonnenwende; der Sonnenmittelpunkt muß ihn um den 21. Juni passieren. Ähnlich sind die Punkte *HT* und *FT* in Bild 8 – die Stellen der Tag- und Nachtgleiche –, jene zwei Punkte der Ekliptik, an denen Sonnenauf- und Sonnenuntergang genau im Osten, beziehungsweise im

Westen stattfinden und die genau einen halben Tag innerhalb des Horizontfensters verweilen. Der Mittelpunkt der Sonne muß sie am 23. September und am 21. März passieren; ebenso muß sie am 21. Dezember durch WS gehen, dem Punkt auf der Ekliptik, der vom Pol am weitesten entfernt ist. Die Sonnenwenden und Tag- und Nachtgleichen, die zuerst als besondere Tage des Jahres erschienen, haben nun eine genauere und astronomisch nützlichere Definition gefunden. Sie sind Punkte auf einer Sternkarte, beziehungsweise auf dem Himmel. Zusammen mit den entsprechenden Zeitangaben geben diese Positionen auf der Ekliptik die Richtung und die ungefähre Geschwindigkeit der jährlichen Sonnenbewegung an. Mit diesen und ähnlichen Angaben kann man, wenn man weiß, wie man die tägliche Bewegung durch die Drehung der Sternkarte darstellen kann, die Stunden und Örter von Sonnenaufgang und -untergang sowie die Tageslänge eines jeden Tages im Jahr bestimmen.

Die Sonnenwenden und Äquinoktien sind nicht die einzigen Positionen auf der Ekliptik, die Standardbezeichnungen haben. Auf einer Sternkarte geht die Ekliptik durch eine Gruppe von besonders bedeutenden Sternbildern, den Tierkreiszeichen. Nach einer Konvention, die aus der frühesten Antike stammt, teilen diese Zeichen die Ekliptik in 12 Teile gleicher Länge. Die Angabe, daß sich die Sonne in einem speziellen Tierkreiszeichen befindet, gibt ungefähr ihre Stellung in der Ekliptik, was wiederum die Jahreszeit festlegt. Die jährliche Reise der Sonne durch die zwölf Tierkreiszeichen, scheint den Zyklus der Jahreszeiten zu kontrollieren, eine Beobachtung, die eine der Wurzeln der Astrologie ist, mit der wir uns in Kapitel 3 kurz beschäftigen werden.

### *Die Geburt der wissenschaftlichen Kosmologie – das Universum aus zwei Kugeln*

Die Beobachtungen, die in den letzten Abschnitten beschrieben wurden, bilden einen wichtigen Teil der Daten, die von den antiken Astronomen bei der Analyse des Aufbaues des Universums verwendet wurden. Diese Beobachtungen bieten jedoch keine direkte Information über die Struktur des Universums. Sie sagen nichts über die Zusammensetzung der Himmelskörper oder ihre Entfernung aus; sie geben keinen Aufschluß über die Größe, die Position oder die Gestalt der Erde. Unsere Beschreibung der Beobachtungen hat auch die Tatsache verschleiert, daß sie nicht einmal Aufschluß über die Frage geben, ob die Himmelskörper sich tatsächlich bewegen. Ein Beobachter

kann bloß sicher sein, daß sich der Winkelabstand zwischen einem Himmelskörper und dem Horizont beständig ändert. Diese Änderung könnte genauso gut durch eine Bewegung des Horizonts wie durch eine Bewegung eines Himmelskörpers verursacht werden. Ausdrücke wie Sonnenauf- und -untergang und tägliche Bewegung eines Sternes gehören genau genommen nicht in die schriftlichen Beobachtungsaufzeichnungen. Sie sind Teil einer Interpretation der Daten, und obwohl diese Interpretation so natürlich ist, daß sie kaum aus dem Vokabular, mit dem die Beobachtungen beschrieben werden, ferngehalten werden kann, geht sie doch über den Inhalt der eigentlichen Beobachtungen hinaus. Zwei Astronomen können vollständig in den Resultaten ihrer Beobachtungen übereinstimmen und doch zu völlig verschiedenen Schlüssen bezüglich der Realität der Sternbewegung gelangen.

Die oben diskutierten Beobachtungen sind daher nur Hinweise in einem Rätsel, für das Astronomen Theorien als Lösungsversuche erfunden haben. Die Hinweise sind in gewissem Sinn objektiv, sind sie doch von der Natur gegeben. Das numerische Resultat dieser Art von Beobachtung hängt sehr wenig von der Persönlichkeit und den Vorstellungen des Beobachters ab, wenn auch die Art und Weise, in der die Daten präsentiert werden, davon abhängen kann. Die Theorien oder Gedankengebäude jedoch, die aus diesen Beobachtungen abgeleitet werden, hängen sehr wohl von der Vorstellung der Wissenschaftler ab. Sie sind durch und durch subjektiv. Daher könnten die Beobachtungen, die in den vorhergegangenen Abschnitten diskutiert wurden, von Menschen, deren Ansichten über den Aufbau des Universums jenen aus dem antiken Ägypten ähnelten, gesammelt und in systematischer Form dargestellt werden. Die Beobachtungen haben an sich keine *direkten* kosmologischen Konsequenzen. Man muß sie bei der Konstruktion von Kosmologien nicht unbedingt ernst nehmen, und dies war einige Jahrtausende der Fall. Die Tradition, daß genaue astronomische Beobachtungen die wichtigsten Hinweise zum Aufbau von Kosmologien liefern, ist in ihren wesentlichen Zügen den westlichen Kulturen eigen. Sie scheint eine der wichtigsten Errungenschaften zu sein, die wir von der antiken griechischen Kultur geerbt haben.

Das Bedürfnis, Beobachtungen der Sterne und Planeten zu erklären, ist bereits im ältesten Bruchstück griechischen kosmologischen Denkens sichtbar. Bereits im frühen sechsten vorchristlichen Jahrhundert lehrte Anaximander aus Milet:

Die Sterne sind verdichtete Luftmengen mit der Gestalt von (rotierenden) Rädern, die mit Feuer gefüllt sind, an einigen Stellen lassen sie die Flammen aus kleinen Öffnungen herausschlagen ...

Die Sonne ist ein Kreis, 28 mal so groß wie die Erde; sie gleicht einem Wagenrad, der Radkranz ist hohl und voll Feuer, er läßt das Feuer an einem bestimmten Punkt an der Felge durch eine Öffnung wie die Düse eines Blasebalgs herausscheinen. ...

Die Verfinsterungen der Sonne erfolgen dadurch, daß das Feuer die Öffnung verschlossen findet.

Der Mond ist ein Kreis, 19 mal so groß wie die Erde; er ist wie ein Wagenrad, sein Radkranz ist hohl und voll Feuer, ähnlich dem Sonnenkreis, und er steht schief, genauso wie es die Sonne tut. Er hat eine Öffnung wie die Düse bei einem Blasebalg, seine Verfinsterungen hängen mit den Umdrehungen des Rades zusammen.<sup>1</sup>

In astronomischer Hinsicht waren diese Vorstellungen denen der Ägypter weit voraus. Die Götter waren zugunsten von Mechanismen, die aus dem Alltagsleben vertraut waren, verschwunden. Die Größe und der Ort der Sterne und Planeten wurde diskutiert. Obwohl die Antworten auf diese Fragen äußerst grob erscheinen, so mußten doch die Fragen zunächst gestellt werden, bevor sie eine ausgereifte Lösung finden konnten. In dem erwähnten Fragment werden die Tageskreise der Sterne und der Sonne mit einem Erfolg behandelt, indem die Himmelskörper als Öffnungen auf den Felgen rotierender Räder betrachtet werden. Die Mechanismen für Verfinsterungen und für die jährlich Wanderung der Sonne (letztere wird durch die schiefe Lage des Sonnenkreises erklärt) sind weniger erfolgreich, zumindestens wurde aber ein Ansatz gemacht. Damit beginnt die Astronomie eine wesentliche Rolle in der Entwicklung kosmologischen Denkens zu spielen.

Nicht alle griechischen Philosophen und Astronomen stimmten mit Anaximander überein. Einige seiner Zeitgenossen und seiner Nachfolger schlugen andere Theorien vor, doch stellten sie sich denselben Problemen, und sie benützten bei ihren Lösungsversuchen dieselben Methoden. Für uns sind es ja die Problemstellungen und Lösungsversuche, die wichtig sind. Die miteinander im Wettstreit liegenden Theorien brauchen nicht alle beschrieben zu werden; in der Tat ist es nicht möglich, sie vollständig zu beschreiben, denn ihre Überlieferungen sind zu unvollständig, um mehr als Vermutungen über die Entwicklung der frühesten griechischen Auffassungen vom Universum zu erlauben. Erst im 4. vorchristlichen Jahrhundert werden die Aufzeichnungen einigermaßen verlässlich. Damals hatte sich als Resultat eines langen

Entwicklungsprozesses eine weitgehende Übereinstimmung in den Grundlagen der kosmologischen Vorstellungen entwickelt. Für die meisten griechischen Astronomen und Philosophen war von dieser Zeit an die Erde eine kleine Kugel, die im geometrischen Mittelpunkt einer wesentlich größeren rotierenden Kugel, die die Sterne trug, ruhte. Die Sonne bewegte sich in dem weiten Raum zwischen der Erde und der Sternenkugel. Außerhalb der äußeren Kugel war nichts, kein Raum, keine Materie, nichts. Dies war in der Antike zwar nicht die einzige Theorie über das Universum, doch es war jene, die die meisten Anhänger gewann. Eine weiterentwickelte Version wurde von der Antike der mittelalterlichen und der neuzeitlichen Welt überliefert.

Diese Kosmologie werden wir als das „Zwei-Kugel-Universum“ bezeichnen. Es besteht aus einer inneren Kugel für den Menschen und einer äußeren Kugel für die Sterne. Dieser Ausdruck ist allerdings ein Anachronismus. Wie wir im nächsten Kapitel sehen werden, haben all jene Philosophen und Astronomen, die an die irdische und die Himmelskugel glaubten, außerdem einige zusätzliche Hilfsmittel postuliert, die die Bewegung der Sonne, des Mondes und der Planeten im Raum ermöglichte. Daher ist das Zwei-Kugel-Universum nicht eine abgeschlossene Wissenschaft vom Kosmos, sondern es bietet den Rahmen dafür. Eine große Anzahl verschiedener und einander widersprechender astronomischer Lehrmeinungen benützten diesen Rahmen während der neunzehnhundert Jahre, die das vierte vorchristliche Jahrhundert vom Zeitalter des Kopernikus trennen. Doch nach seiner ersten Etablierung war dieser Rahmen selbst fast nie mehr in Frage gestellt. Nahezu zweitausend Jahre leitete er die Vorstellung aller Astronomen und der meisten Philosophen. Daher beginnen wir unsere Diskussion der abendländischen astronomischen Tradition mit der Betrachtung des Zwei-Kugel-Universums und lassen die verschiedenen Hilfsmittel, die der eine oder andere Astronom zur Beschreibung der Planetenbewegung hinzugefügt hat, zunächst unberücksichtigt.

Der Ursprung des Zwei-Kugel-Universums liegt im Dunkeln, doch der Grund für seine Überzeugungskraft ist klar. Es ist nur ein kleiner Schritt von dem gewölbten Himmel der Ägypter und Babylonier zur Himmelskugel. Die gestreckte Form, die die Ägypter ihrem Himmel gegeben hatten, verschwand in Kulturen, die nicht an ein Flußtal wie den Nil gebunden waren, und gab einer halbkugelförmigen Schale Raum. Durch die Verbindung der Wölbung über der Erde mit einer symmetrischen Wölbung unter ihr erhält das Universum einen angemessenen und befriedigenden Abschluß. Die Drehung der so entstandenen Kugel zeigt sich an den Sternen; wie wir bald sehen werden, liefert die stetige Drehung der äußeren Kugel – einmal in 23 Stunden 56 Minuten – gerade die bereits beschriebenen Tageskreise.

Zusätzlich gibt es ein im wesentlichen ästhetisches Argument zugunsten des kugelförmigen Universums. Da die Sterne die am weitesten entfernten Objekte zu sein scheinen, und da sie sich alle gleichzeitig bewegen, liegt es nahe anzunehmen, daß sie bloß Markierungen auf der äußeren Oberfläche des Universums wären und daß sie sich mit ihr bewegten. Weil sich die Sterne unveränderlich und völlig regelmäßig bewegen, sollte die Fläche, auf der sie sich bewegen, völlig regulär sein und sich ewig in der gleichen Weise bewegen. Welches Gebilde erfüllt diese Bedingungen besser als die Kugel, die die einzige vollständig symmetrische Oberfläche ist und die sich als eine von wenigen bei beliebigen Drehungen nur in sich dreht und dabei zu jedem Zeitpunkt ihrer Bewegung genau denselben Platz erfüllt? In welcher anderen Form könnte ein unvergängliches und auf sich allein gestelltes Universum geschaffen werden? Dies ist im wesentlichen das Argument, das der griechische Philosoph Plato im vierten Jahrhundert vor Christus in seinem Buch *Timaios* verwendet hat, einer allegorischen Schöpfungsgeschichte, in der das Universum als Lebewesen erscheint.

Aus diesem Grunde und durch solche Schlüsse bestimmt, gestaltete er es aus lauter Ganzen als ein vollkommenes, nie alterndes noch erkrankendes Ganzes und verlieh ihm die ihm angemessene und verwandte Gestalt... Darum verlieh er ihm die kugelige, vom Mittelpunkte aus nach allen Endpunkten gleich weit absthende kreisförmige Gestalt, die vollkommenste und sich selbst ähnlichste aller Gestalten, indem er das Gleichartige für unendlich schöner ansah als das Ungleichartige. Die Außenseite gestaltete er aber aus vielen Gründen ringsum vollkommen glatt. Bedurfte es doch nicht der Augen, denn außerhalb war nichts Sichtbares; nicht der Ohren, denn auch nichts Hörbares war geblieben; auch keine des Einatmens fähige Luft umgab es; ebenso wenig war es eines Werkzeuges bedürftig, die Nahrung in sich aufzunehmen und, nachdem es dieselbe zuvor verarbeitete, sie wieder fortzuschaffen. Denn nirgendwärts fand ein Zugang oder Abgang statt, war doch nichts vorhanden, sondern ein Sichselbstverzehren gewährt der Welt ihre Nahrung; sie ist kunstvoll so gestaltet, daß sie alles in sich und durch sich tut und erleidet, da ihr Bildner meinte, als sich selbst genügend werde sie besser sein als eines andern bedürftig. Auch Hände, deren sie weder um etwas zu fassen noch zur Abwehr bedurfte, ihr zwecklos anzufügen, hielt er für unnötig, desgleichen auch Füße oder überhaupt sonst etwas der zum Gehen erforderlichen Dienerschaft.

Unter den sieben Bewegungen teilte er ihr die ihrer Gestalt angemessene, dem Nachdenken und dem Verstande am meisten eigentümliche zu. Indem er sie also gleichmäßig in demselben Raume und in sich selbst herumführte, machte er sie zu einem im Kreise sich drehenden Kreise<sup>2</sup>.

Auch für die Kugelgestalt der Erde fand die Antike ähnliche Argumente: Es war plausibel, daß die Erde dieselbe perfekte Gestalt zeigen sollte, in der das Universum erschaffen worden war. Doch gab es auch konkretere und überzeugendere Argumente. Der Rumpf eines Schiffes, das von der Küste wegsegelt, verschwindet früher als die Mastspitze. Vom Schiff und vom Meer ist von einem hohen Beobachtungsplatz mehr zu sehen als von einem niedrigen (Bild 10). Bei einer Mondesfinsternis hat der Schatten der Erde auf dem Mond stets kreisförmige Gestalt. (Diese Erklärung der Mondesfinsternisse, die bereits vor dem vierten Jahrhundert vor Christus üblich war, wird in Abschnitt 3 des technischen Anhangs diskutiert.) Diese Argumente kann man kaum vermeiden oder widerlegen, und in der Antike erweiterte sich ihre Wirksamkeit durch den Analogieschluß von der Erde auf den Himmel. Ein Himmel, der die Gestalt der Erde widerspiegelte, schien besonders angebracht. Andere Argumente leiteten sich aus der Ähnlichkeit und der symmetrischen Anordnung der beiden Kugeln ab. Die zentrale Lage der Erde sorgt für ihre Stabilität im sphärischen Universum. In welche Richtung sollte ein Gegenstand vom Mittelpunkt einer Kugel aus fallen? Es gibt kein „unten“ im Mittelpunkt, jede Richtung ist „aufwärts“. Daher muß die Erde ewig im Mittelpunkt verharren, während sich das Universum um sie dreht.

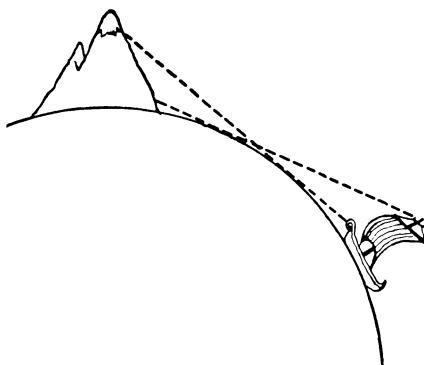


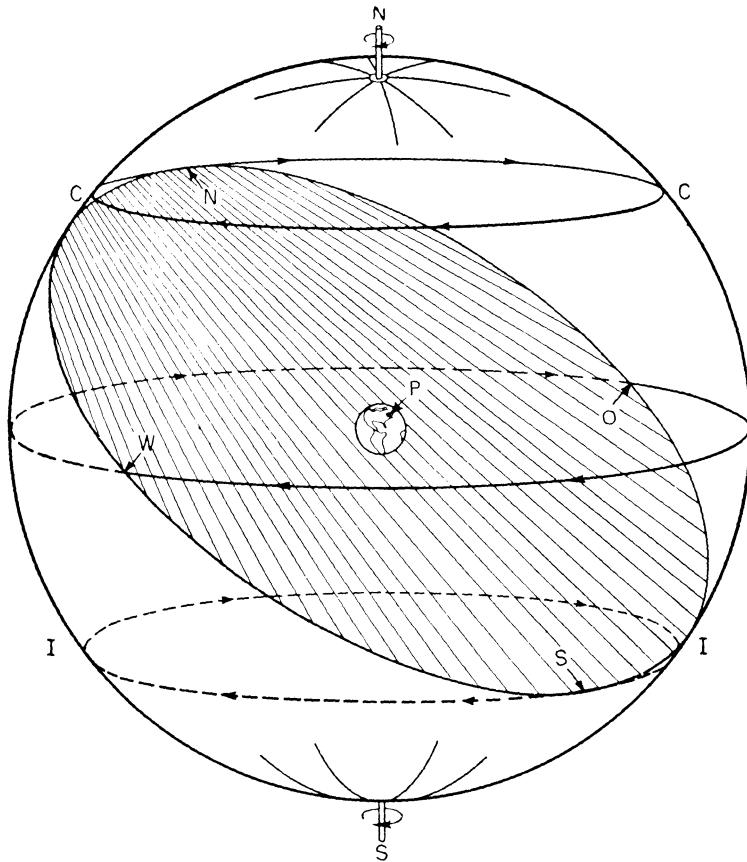
Bild 10

Eine antike (und moderne) Begründung der Kugelform der Erde. Ein Beobachter am Fuß des Berges kann nur die Spitze des Schiffsmastes sehen, von der Bergspitze sind der ganze Mast und ein Teil des Decks sichtbar.

Obwohl solche Symmetrieargumente heute sonderbar erscheinen mögen (Argumente zugunsten einer in Mißkredit geratenen Ansicht erscheinen meist sonderbar), so waren sie doch für das Denken der Antike, des Mittelalters und der frühen Neuzeit sehr wichtig. Eine Diskussion der Symmetrie wie bei Plato zeigt den Vorteil des Zwei-Kugel-Universums: Es erklärt, warum das Universum in der sphärischen Form geschaffen wurde. Doch noch wichtiger war, wie wir in Kapitel 3 und 4 sehen werden, daß die Symmetrie der beiden Kugeln wichtige Verbindungen zwischen astronomischem, physikalischem und theologischem Denken ergab, denn sie war überall wesentlich. In Kapitel 5 werden wir den vergeblichen Versuch von Kopernikus kennenlernen, die Symmetrie der antiken Kosmologie in einem Universum zu bewahren, das einen bewegten Planeten Erde enthielt. Für die hier betrachteten astronomischen Zwecke funktioniert das Zwei-Kugel-Weltbild aber ganz ausgezeichnet. Es beschreibt die früher angegebenen Himmelsbeobachtungen äußerst genau.

Bild 11 zeigt die kugelförmige Erde in wesentlich übertriebener Größe im Mittelpunkt der großen Sternenkugel. Ein Beobachter auf der Erde, dessen Position  $P$  durch den Pfeil angedeutet ist, kann genau die Hälfte der Kugel sehen. Sein Horizont wird durch eine Ebene, die im Diagramm schraffiert ist und zur Erde in seinem Standpunkt tangential ist, begrenzt. Wenn die Erde im Vergleich zur Sternenkugel sehr klein ist, wird diese Tangentialebene die äußere Sphäre in zwei fast genau gleiche Hälften teilen, eine dem Beobachter sichtbare und eine andere die ihm durch die Erdoberfläche verborgen ist. Alle permanent auf der äußeren Kugel fixierten Objekte werden wie die Sterne dieselben relativen Positionen beibehalten, wenn sie von der winzigen Erde im Mittelpunkt betrachtet werden. Wenn sich die Sphäre gleichmäßig um eine Achse durch die einander entgegengesetzten Punkte  $N$  und  $S$  dreht, werden sich alle Sterne mit ihr bewegen, außer sie befinden sich genau in  $N$  oder  $S$ . Da  $S$  für unseren Beobachter unsichtbar ist, ist  $N$  der einzige statische Punkt auf seinem Himmel, sein Himmelstyp, und er liegt etwa  $45^\circ$  über dem nördlichen Punkt seines Horizonts, wie es für einen Beobachter in  $P$ , einem Punkt in mittleren nördlichen Breiten, der Fall sein muß.

Objekte in der Nähe von  $N$  auf der äußeren Kugel scheinen dem Beobachter in  $P$  langsam in Kreisen um den Pol zu rotieren. Wenn sich die Kugel einmal in 23 Stunden 56 Minuten umdreht, vollenden diese Gegenstände ihre Kreise in der gleichen Zeit wie die Sterne: Sie stellen in dem Modell die Sterne dar. Alle Sterne, die dem Pol nahe genug liegen, um sich innerhalb des Kreises im Diagramm zu befinden, sind Zirkumpolarsterne, denn die Rotation der Kugel führt sie niemals unter den Horizont. Sterne, die von



**Bild 11** Astronomische Funktionen des Zwei-Kugel-Universums. Der äußerste Kreis ist ein Querschnitt durch die Sternenkugel, die um die Achse NS in östlicher Richtung rotiert. Der Beobachter in P kann alle Teile dieser Kugel sehen, die über der schraffierten Horizontebene SWNO liegen. Wäre die Zeichnung maßstabsgetreu, die Erde wäre viel kleiner und die Horizontebene wäre tangential zu zeichnen. Statt dessen haben wir die Ebene durch den Erdmittelpunkt gezeichnet, ihre Orientierung zum Beobachter blieb erhalten, indem wir sie senkrecht zur Verbindungsline Beobachter-Erdmittelpunkt gezogen haben.

Die horizontalen Kreise sind die Pfade, die von ausgewählten Punkten auf der Kugel durch deren tägliche Drehung beschrieben werden. Sie sind daher die Tageskreise von Sternen, ihre sichtbaren Teile sind voll gezeichnet, ihre unsichtbaren strichliert. Der mittlere Kreis wird von einem Stern am Himmelsäquator beschrieben. Der oberste und der unterste Kreis werden von Sternen beschrieben, die den Horizont nur in einem Punkt treffen. Der obere Kreis CC ist der Tageskreis des südlichsten Zirkumpolarsterns, der untere Kreis II entspricht dem nördlichsten Stern, der dem Beobachter in P unsichtbar bleibt.

*N* weiter entfernt zwischen den Kreisen *CC* und *II* liegen, gehen bei jeder Umdrehung der Sphäre auf und unter, doch gelangen Sterne in der Nähe des Kreises *II* kaum über den südlichen Horizont und sind nur kurz sichtbar. Schließlich erscheinen Sterne innerhalb des Kreises *II* in der Nähe von *S* niemals dem Beobachter in *P*, sie bleiben durch seinen Horizont stets verborgen. Man könnte sie jedoch von anderen Plätzen auf der inneren Kugel sehen. Man nennt den für unseren Beobachter unsichtbaren Punkt *S* den südlichen Himmelspol, den sichtbaren Punkt in *N* den Himmelsnordpol.

Wenn sich der Beobachter in unserer Zeichnung von *P* nach Norden bewegt (also zu einem Punkt auf der inneren Kugel direkt unter dem Himmelsnordpol), muß sich seine Horizontebene mit ihm bewegen. Sie wird immer mehr zur Achse der Sternenkugel senkrecht stehen, während der Beobachter dem irdischen Pol zustrebt. Daher muß der Himmelspol bei dieser Bewegung immer höher über den nördlichen Punkt am Horizont steigen, bis er schließlich direkt im Zenit steht. Gleichzeitig dehnt sich der Kreis *CC*, der stets den nördlichsten Punkt berührt, aus, so daß immer mehr Sterne zirkumpolar werden. Da sich der Kreis *II* ebenfalls ausdehnt, nimmt die Zahl der unsichtbaren Sterne ebenfalls zu. Wenn sich der Beobachter nach Süden bewegt, sind die Effekte genau umgekehrt: Der Pol sinkt immer näher um Nordpunkt zum Horizont; die Kreise *CC* und *II* schrumpfen, bis sie genau die Himmelspole umfassen, wenn der Beobachter am Äquator anlangt. Bild 12 zeigt die zwei Grenzfälle, einen Beobachter am Nordpol der Erde und einen am irdischen Äquator. Im ersten Fall ist der Horizont horizontal zu zeichnen. Der Himmelsnordpol steht direkt über dem Kopf des Beobachters; die Sterne in der oberen Hälfte der Sphäre drehen sich beständig auf Kreisen parallel zum Horizont und die Sterne in der unteren Halbkugel werden nie-

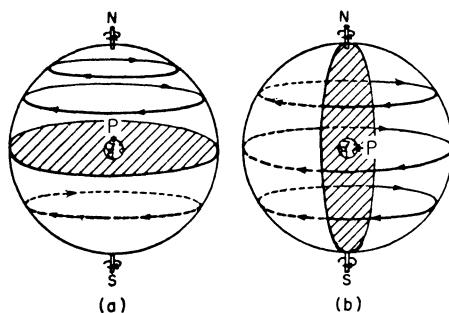


Bild 12

Sternbewegungen im Zweikugel-Universum für einen Beobachter (a) am irdischen Nordpol, (b) am Äquator

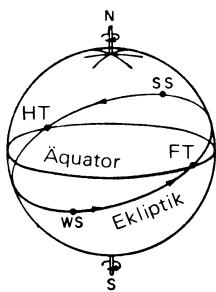
mals sichtbar. Im zweiten Teil der Figur ist der Horizont vertikal: Himmelsnord- und -südpol sind an den Nord- und Südpunkten des Horizontes. Alle Sterne sind irgendwann sichtbar, doch keinen kann man länger als auf einem Halbkreis sehen.

Außer, daß diese letzten extremen Beispiele in der Antike nicht beobachtet wurden, fällt die Bewegung der Sterne im Zwei-Kugelsystem des Universums genau mit der zuvor diskutierten Beobachtung tatsächlicher Sterne zusammen. Es gibt kein überzeugenderes Argument für die Kosmologie der zwei Kugeln.

### *Die Sonne im Zwei-Kugel-Universum*

Eine vollständige Diskussion der Sonnenbewegung im Zwei-Kugel-Universum erfordert eine Erweiterung, um die Position der Sonne zwischen der zentralen Erde und der umgebenden rotierenden Sternenkugel zu beschreiben. Diese Erweiterung gehört zum größeren Problem der Planeten, das wir im nächsten Kapitel behandeln. Doch selbst das bisher beschriebene Skelett der Kosmologie erlaubt eine sehr vereinfachte Beschreibung der scheinbaren Sonnenbewegung. Die Sonnenbewegung erhält von der zentralen Erde aus gegen den kugelförmigen Hintergrund der Sternensphäre gesehen eine Regelmäßigkeit, die nicht zu erkennen war, bevor die Sterne auf eine rotierende Kugel mit der Erde im Mittelpunkt gesetzt wurden.

Dies ist in Bild 13 dargestellt, wo die Sternenkugel mit ihrem sichtbaren Nordpol gezeichnet ist. Die Richtung der täglichen westwärts gerichteten Drehung ist durch einen Pfeil um den Pol angedeutet. In der Mitte zwischen dem Nord- und Südpol ist der Himmelsäquator eingezeichnet,

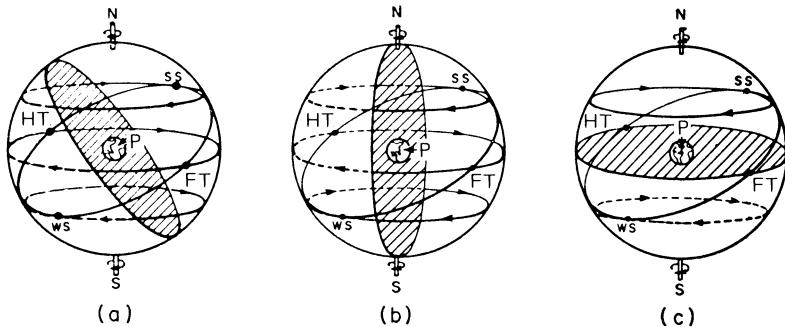


**Bild 13**  
*Himmelskugel mit Äquator und Ekliptik*

ein Großkreis auf dem alle Sterne liegen, die genau im Osten auf- und genau im Westen untergehen. Ein Großkreis ist die einfachste Kurve, die auf der Oberfläche einer Kugel gezeichnet werden kann – der Schnitt der Kugeloberfläche mit einer Ebene durch den Kugelmittelpunkt – und die neue Vereinfachung in der Sonnenbewegung verdanken wir der Tatsache, daß auch die Ekliptik ein Großkreis auf der Himmelskugel ist, der die Kugel in zwei gleiche Hälften teilt. In Bild 13 ist die Ekliptik ein geneigter Kreis, der den Himmelsäquator an zwei entgegengesetzten Punkten unter einem Winkel von  $23\frac{1}{2}$  Grad schneidet. Er enthält alle Punkte, an denen der Mittelpunkt der Sonne von einem Beobachter auf der Erde gegen die Sternenkugel gesehen wird. In jedem Augenblick befindet sich der Sonnenmittelpunkt in einem Punkt auf diesem Großkreis und nimmt an der täglichen westlichen Bewegung der gesamten Kugel teil, doch gleichzeitig gleitet die Sonne langsam nach Osten (Pfeile im Diagramm) und vollendet ihre Reise um die Ekliptik in einem Jahr.

Da während jeder 24-Stunden-Periode die Sonne in der Nähe eines einzigen Punktes auf der Ekliptik zu bleiben scheint, muß sie sich Tag für Tag einem Stern sehr ähnlich auf einem Tageskreis bewegen. Jedoch bewegt sich die Sonne in bezug auf die Sternenkugel langsam nach Osten, während sich die Kugel selbst schnell nach Westen dreht. Daher muß die Sonne ihren täglichen Umlauf etwas langsamer als die Sterne vollenden. Sie bleibt in ihrem Wettkauf mit den Sternen täglich etwas zurück und wird von ihnen einmal im Jahr überholt. Genauer gesagt, da sich die Sonne beim Durchlaufen der Ekliptik um 360 Grad bewegen muß und sie diese Reise in etwas mehr als 365 Tagen vollendet, muß ihre ostwärts gerichtete Bewegung auf der Ekliptik etwas weniger als ein Grad pro Tag sein. Diese Zahl wurde früher bereits aus der Beobachtung abgeleitet (S. 23) und entspricht dem Abstand, um den die Sonne täglich gegenüber den Sternen zurückbleibt. Weil die Länge des Tages durch die tägliche Bewegung der Sonne definiert ist, und die Sterne, die sich um 15 Grad pro Stunde bewegen, dabei der Sonne täglich um ein Grad vorausseilen, wird ein Stern, der etwa heute mitternacht im Zenit steht, um genau 4 Minuten vor der morgigen Mitternacht seine tägliche Bewegung vollenden und an dieselbe Stelle am Himmel zurückkehren. Einmal mehr wurde ein Detail im Verhalten des Himmels, das ursprünglich als eine von vielen Beobachtungen eingeführt wurde (S. 17), im Rahmen des Zwei-Kugel-Universums Teil eines größeren Bildes.

Eine ähnliche Ordnung zeigt sich für die Örter, die die Äquinoktien und die Sonnenwenden auf der Sternkugel einnehmen. Die zwei Tag- und Nachtgleichen müssen an den zwei diametral entgegengesetzten Stellen auf



**Bild 14** Die Bewegung der Sonne für Beobachter an verschiedenen Stellen der Erde.

(a) Beobachter in mittleren nördlichen Breiten: Zur Sommersonnenwende geht die Sonne auf einer geneigten Bahn weit nördlich der genauen Ostrichtung auf; mehr als die Hälfte ihrer täglichen Bahn liegt über dem Horizont, so daß die Tage länger als die Nächte sind. Zur Tag- und Nachtgleiche geht sie genau im Osten auf, nur die Hälfte ihres Tageskreises ist sichtbar. Zur Wintersonnenwende geht sie am weitesten im Süden auf, die Tage sind nun kürzer als die Nächte. Die maximale Sonnenhöhe über dem Horizont ist im Sommer am größten, doch zu allen Jahreszeiten muß der Mittagsschatten nach Norden weisen.

(b) Beobachter am Äquator: Unabhängig von der Stellung der Sonne auf der Ekliptik teilt die Horizontebene die tägliche Sonnenbahn in zwei gleiche Teile. Tag und Nacht sind stets gleich lang, es gibt im Klima nur wenig jahreszeitliche Veränderungen. Vom Frühlings- (FT) zum Herbstäquinoktium (HT) geht die Sonne nördlich der genauen Ostrichtung auf, der Mittagsschatten zeigt nach Süden; in der zweiten Hälfte des Jahres ist es genau umgekehrt.

(c) Beobachter am Nordpol der Erde: Stets ist die Hälfte der Ekliptik unter dem Horizont, so daß die Sonne ein halbes Jahr lang (vom Herbst- zum Frühlingsäquinoktium) unsichtbar bleibt. Zum Frühlingsäquinoktium erscheint die Sonne am Horizont, sie steigt in einer Spiralfahrt bis zur Sommersonnenwende immer höher – dabei geht sie nie unter –, worauf sie bis zur Herbst- und Nachtgleiche wieder zum Horizont sinkt.

der Sternkugel stattfinden, in denen die Ekliptik den Himmelsäquator schneidet. Dies sind die einzigen Punkte auf der Ekliptik, die genau im Osten, beziehungsweise im Westen auf- und untergehen. Gleichermaßen müssen die beiden Sonnenwenden die Punkte auf der Ekliptik in der Mitte zwischen den zwei Äquinoktien sein, denn diese Punkte liegen vom Himmelsäquator aus gesehen am weitesten in Richtung Norden bzw. Süden. Wenn die Sonne in einem dieser Punkte steht, muß sie weiter im Norden (beziehungsweise im

Süden) aufgehen, als zu irgendeiner anderen Zeit. Da sich die Sonne beständig von der Sommersonnenwende zur Herbst-Tag- und Nachtgleiche bewegt, kann man die einzelnen Äquinoktien und Sonnenwenden leicht auf der Kugel finden. Jede von ihnen ist auf der Ekliptik in Bild 13 eingetragen; sobald man die Ekliptik gezeichnet und in dieser Weise beschriftet hat, kann man nach Konstruktion einer geeigneten Horizontebene innerhalb der Sternkugel untersuchen, wie sich das Verhalten der Sonne im Lauf eines Jahres verändert, wenn man sie von irgendeinem Punkt auf der Erdoberfläche aus beobachtet. Drei besonders deutliche Beispiele der Sonnenbewegung zu verschiedenen Jahreszeiten werden in den Zeichnungen von Bild 14 im Rahmen des Zwei-Kugel-Universums abgeleitet. In diesem Diagramm beginnt sich die volle Bedeutung des Gedankenschemas zu zeigen.

### *Die Funktionen eines wissenschaftlichen Weltbildes*

Ungleich den Beobachtungen, die in den ersten Abschnitten dieses Kapitels beschrieben wurden, ist das Zwei-Kugel-Modell ein Produkt menschlicher Vorstellungskraft. Es ist eine Theorie, ein Gedankenschema, das sich zwar von Beobachtungen ableitet, diese aber zugleich überschreitet. Da es noch nicht den Bewegungen aller Himmelskörper Rechnung trägt – die Bahnen der Planeten haben wir bisher außer acht gelassen –, ist das Zwei-Kugel-Modell unvollständig. Doch liefert es bereits überzeugende Beispiele einiger logischer und psychologischer Funktionen, die wissenschaftliche Theorien für den Menschen erfüllen, der sie entwickelt oder benutzt. Die Entwicklung eines wissenschaftlichen Weltbildes, sei es eines astronomischen oder eines nichtastronomischen, hängt von der Weise ab, in der es diese Funktionen ausfüllt. Bevor wir das Zwei-Kugel-Universum eingehender behandeln, können wir anhand dieser Funktionen einige der grundlegenden Probleme der kopernikanischen Revolution darstellen. Der wichtigste Zug des Zwei-Kugel-Universums ist wahrscheinlich die Hilfe, die es dem Gedächtnis des Astronomen gewährt. Dieses Charakteristikum eines Weltbildes wird oft gedankliche Ökonomie genannt. Obwohl die früher diskutierten Beobachtungen der Sonne und der Sterne sorgfältig ausgewählt und systematisch dargestellt wurden, waren sie im ganzen gesehen äußerst komplex. Einem Menschen, der nicht bereits bestens mit dem Himmel vertraut war, mußte z. B. eine Beobachtung der Richtung des Sonnenaufgangs oder das entsprechende Verhalten des Schattens auf einer Sonnenuhr völlig ohne Bezug zu anderen Beobachtungen erscheinen, wie z. B. der Höhe des Himmelspols, oder der

kurzen Sichtbarkeit von Sternen am südlichen Himmel. Jede Beobachtung bildet eine eigene Eintragung in einer langen Liste durrer Tatsachen und es ist schwierig, die ganze Liste gleichzeitig im Gedächtnis zu behalten.

Das Zwei-Kugel-Universum bietet keine solchen Probleme. Eine riesige Kugel, die die Sterne trägt, dreht sich in westlicher Richtung gleichmäßig einmal in 23 Stunden 56 Minuten um eine feste Achse; die Ekliptik ist auf dieser Kugel ein Großkreis unter einem Winkel von  $23\frac{1}{2}$  Grad zum Himmelsäquator; die Sonne bewegt sich gleichmäßig in östlicher Richtung die Eklipptik entlang und vollendet ihre Reise in  $365\frac{1}{4}$  Tagen; die Sonne und die Sterne werden von einer winzigen ruhenden Kugel im Mittelpunkt der riesigen Sternkugel aus beobachtet. So viel kann man ein- für allemal dem Gedächtnis anvertrauen, und während diese wenigen Annahmen im Gedächtnis behalten werden, kann die Liste der Beobachtungen vergessen werden. Das Modell ersetzt die Liste, da die Beobachtungen, wie wir bereits gesehen haben, aus dem Modell abgeleitet werden können. Häufig brauchen sie nicht einmal abgeleitet zu werden. Beobachtet man den Himmel unter der festen Annahme der Gültigkeit des Zwei-Kugel-Universums, so wird man finden, daß dieses Weltbild Regelmäßigkeiten zwischen sonst beziehungslosen Beobachtungen aufzeigt, daß eine Liste von Beobachtungen zum ersten Mal ein sinnvolles Ganzes wird und daß die einzelnen Beobachtungen auf der Liste daher leichter im Gedächtnis bleiben. Ohne diese geordneten Zusammenfassungen, welche der Wissenschaft von ihren Theorien geliefert werden, wäre sie nicht imstande, solch ungeheure Schätze an genauer Information über die Natur anzuhäufen.

Weil es eine bündige Zusammenfassung zahlreicher wichtiger Beobachtungen liefert, wird das Zwei-Kugel-Universum auch heute noch von vielen Leuten verwendet. Theorie und Praxis von Navigation und Vermessung können einfach und genau aus Modellen entwickelt werden, die den Angaben von Bild 11 entsprechen, und da das von der modernen Anstronomie geforderte Modell wesentlich komplexer ist, wird das Zwei-Kugel-Modell üblicherweise bei dem Unterricht dieser Themen dem kopernikanischen vorgezogen. Die meisten Handbücher über Navigation oder Vermessung beginnen meist mit Sätzen wie „Für unseren Zweck genügt es anzunehmen, daß die Erde eine kleine ruhende Kugel ist, deren Mittelpunkt im Zentrum einer wesentlich größeren rotierenden Sternkugel liegt“. Nach seiner Ökonomie beurteilt, ist das Zwei-Kugel-Universum, was es stets gewesen ist: Eine äußerst erfolgreiche Theorie.

In anderen Beziehungen ist das Zwei-Kugel-Universum schon seit der kopernikanischen Revolution nicht mehr erfolgreich. Es blieb ökono-

misch, weil Ökonomie eine rein logische Angelegenheit ist. Die den antiken Astronomen bekannten Himmelserscheinungen, die von den modernen Navigatoren verwendet werden, folgen in logischer Weise aus dem Zwei-Kugel-Modell, unabhängig davon, ob es als Darstellung der Realität aufgefaßt wird. Die Einstellung des Wissenschaftlers, sein Glaube an die „Wahrheit“ eines Weltbildes hat keinen Einfluß auf die Fähigkeit des Schemas, eine ökonomische Zusammenfassung zu geben. Jedoch haben solche Schemata neben den logischen Aufgaben auch psychologische, diese hängen aber von dem Glauben oder Unglauben des Wissenschaftlers ab. Zum Beispiel kann das psychologisch bedingte Bedürfnis, sich zuhause zu fühlen, das wir im zweiten Abschnitt diskutierten, durch ein Weltbild nur dann erfüllt werden, wenn man glaubt, daß es mehr als ein bloß zweckmäßiges Mittel zur Darstellung bereits bekannter Fakten ist. Während der Antike und dann wieder im späteren Mittelalter wies die europäische Welt diese zusätzliche Bindung an die Vorstellung eines Zwei-Kugel-Universums auf. Wissenschaftler und Laien glaubten, daß die Sterne bloß helle Flecken auf einer gigantischen Kugel wären, die die irdische Heimat des Menschen symmetrisch umschloß. Daher gab das Zwei-Kugel-Universum jahrhundertelang vielen Menschen ein Weltbild, es definierte ihren Platz in der erschaffenen Welt und gab ihrer Beziehung zu den Göttern eine physikalische Bedeutung. Wie wir sehen werden, hat eine Gedankenkonstruktion, an die man glaubt, und die daher Teil einer Kosmologie ist, mehr als bloß wissenschaftliche Bedeutung.

Der Glaube beeinflußt auch die Funktion von begrifflichen Strukturen innerhalb der Wissenschaften. Wirtschaftlichkeit als eine rein logische Funktion und kosmologische Befriedigung als eine rein psychologische Funktion liegen an entgegengesetzten Enden eines Spektrums. Viele andere wesentliche Funktionen liegen innerhalb des Spektrums zwischen diesen Grenzfällen, sie hängen sowohl von der logischen Struktur der Theorie als auch von ihrer psychologischen Wirkung ab, wie ihrer Fähigkeit, Glauben hervorzurufen. Zum Beispiel wird ein Astronom, der an die Gültigkeit des Zwei-Kugel-Universums glaubt, finden, daß die Theorie nicht nur eine zweckmäßige Zusammenfassung der Erscheinungen liefert, sondern daß sie sie auch *erklärt* und ihn daher in die Lage versetzt zu *verstehen*, warum sie so sind, wie sie sind. Wörter wie „Erklären“ und „Verstehen“ beziehen sich offensichtlich gleichzeitig auf die logischen und psychologischen Aspekte von Weltbildern. In logischer Hinsicht erklärt das Zwei-Kugel-Universum die Bewegung der Sterne, weil diese aus dem wesentlich einfacheren Modell abgeleitet werden können. Komplizierte Verhältnisse werden auf einfache zurückgeführt und eine solche logische Reduktion ist ein wesentlicher Bestandteil der Erklä-

rung, aber er ist nicht der einzige. In psychologischer Hinsicht gibt das Zwei-Kugel-Universum keine Erklärung, außer man glaubt an seine Wahrheit. Der moderne Navigator verwendet das Zwei-Kugel-Universum bei seiner Arbeit, aber er erklärt die Bewegung der Sterne nicht mit Hilfe einer Drehung der äußeren Kugel. Er glaubt, daß die tägliche Bewegung der Sterne nur eine scheinbare Bewegung ist und muß sie daher als Resultat einer tatsächlichen Drehung der Erde erklären.

Die Bereitschaft eines Wissenschaftlers, seine Erklärung auf ein Weltbild aufzubauen, ist ein Hinweis auf seine Bindung an dieses Weltbild; ein Zeichen seines Glaubens, daß sein Weltbild das einzig richtige ist. Eine solche Bindung oder ein solcher Glaube ist stets riskant, da vereinfachte Beschreibung und kosmologische Befriedigung keineswegs Wahrheit garantieren können, was immer auch „Wahrheit“ bedeuten mag. Die Geschichte der Wissenschaft zeigt zahllose Relikte von Vorstellungen, an die man einstens glühend glaubte, und die seither durch völlig neue Theorien ersetzt wurden. Es gibt keine Möglichkeit zu beweisen, daß eine Theorie endgültig ist. Doch Risiko oder nicht, diese Bindung an ein Weltbild ist in den Wissenschaften ein allgemeines und vielleicht unvermeidbares Phänomen, denn es verleiht dem Weltbild neue und überaus wichtige Funktionen. Weltbilder sind umfassend, ihre Konsequenzen beschränken sich nicht auf das bereits Bekannte. Daher wird etwa ein Astronom, der sich dem Zwei-Kugel-Universum verbunden fühlt, annehmen, daß die Natur die zusätzlichen, bisher jedoch nicht beobachteten Eigenschaften zeigen wird, die seine Vorstellungen vorhersagen. Für ihn wird die Theorie den Bereich des Bekannten überschreiten und ein mächtiges Werkzeug zur Vorhersage und Erforschung des Unbekannten bilden. Die Zukunft der Wissenschaft, wie auch ihre Vergangenheit wird dadurch beeinflußt.

Das Zwei-Kugel-Universum informiert den Wissenschaftler über das Verhalten von Sonne und Sternen in Teilen der Welt, wie der südlichen Halbkugel und den Polarregionen, in die er niemals reiste. Zusätzlich informiert es ihn über die Bewegung von Sternen, die er noch nicht systematisch beobachtet hat. Da sie alle an der Sternkugel befestigt sind, müssen sie sich wie die anderen Sterne in täglichen Kreisen drehen. Dies ist ein neues Wissen, das ursprünglich nicht aus der Beobachtung, sondern direkt aus dem Weltbild gewonnen wurde, und es kann ungeheure Konsequenzen haben. Zum Beispiel sagt die Vorstellung der zwei Kugeln, daß die Erde einen Umfang hat, und sie legt einen Satz von Beobachtungen nahe, die in Abschnitt 4 des technischen Anhangs diskutiert werden, mit denen der Astronom feststellen kann, wie groß der Erdumfang ist. Ein Satz dieser Beobachtungen – zwar ein schlechter, wie sich zeigte, denn der resultierende Wert für den

Umfang war viel zu klein – führte Columbus zum Glauben, daß die Umseglung der Erde möglich wäre, – die Resultate seiner Reisen sind bekannt, Jene Fahrten, wie auch die folgenden von Magellan und anderen, stützten die zunächst nur aus einer Theorie abgeleiteten Vermutungen durch die Beobachtung und versorgten die Wissenschaft mit vielen zusätzlichen unvorhergesehenen Beobachtungen. Die Reisen wären nicht unternommen worden, und die neuen Beobachtungen wären nicht gemacht worden, wenn nicht ein Weltbild den Weg gewiesen hätte.

Die Reisen des Columbus sind nur ein Beispiel für die Fruchtbarkeit eines wissenschaftlichen Weltbildes. Sie zeigen, wie Theorien einen Wissenschaftler auf dem Weg ins Unbekannte leiten und ihm sagen, worauf er achten soll, und was er zu finden erwarten darf. Dies ist wahrscheinlich die wichtigste Einzelfunktion von Theorien. Doch ist diese Hilfestellung selten so direkt und eindeutig wie im obigen Beispiel. Typischerweise bieten wissenschaftliche Weltbilder nur Hinweise für die Richtung der Forschung und keine expliziten Anleitungen. Die Verfolgung dieser Hinweise erfordert üblicherweise eine Erweiterung oder Abänderung der Vorstellungen, von denen sie sich herleiten. Zum Beispiel war das Zwei-Kugel-Universum ursprünglich primär zur Erklärung der täglichen Bewegung der Sterne und der Abhängigkeit dieser Bewegungen vom Standpunkt des Beobachters auf der Erde entwickelt worden. Aber sobald die neue Theorie entwickelt war, wurde sie auch angewendet, um den Beobachtungen der Sonnenbewegung Ordnung und Einfachheit zu geben. Als sie die unerwartete Regelmäßigkeit enthielt, die dem komplizierten Verhalten der Sonne zugrunde liegt, gab die neue Theorie einen Rahmen ab, innerhalb dessen die noch weit unregelmäßigeren Bewegungen der Planeten studiert werden konnten. Dieses Problem war unbehandelbar erschienen bis zu dem Moment, als Ordnung in die Gesamtbewegung des Himmels gebracht worden war.

Ein Großteil dieses Buches behandelt die Fruchtbarkeit von Weltbildern, d. h. ihre Wirksamkeit als Leitlinien der Forschung und als Schemata zur Einordnung von Wissen. Zunächst studieren wir die Rolle des Zwei-Kugel-Universums in der Antike bei der Lösung des Problems der Planeten und auch bei Problemen, die außerhalb der Astronomie liegen. Darauf werden wir untersuchen, wie Kopernikus' Theorie des bewegten Planeten Erde zum Leitfaden der Wissenschaft wurde. Das beste Beispiel für die Fruchtbarkeit des Zwei-Kugel-Universums ist jedoch die hier behandelte Entwicklung in ihrer Gesamtheit. Das kopernikanische Universum ist selbst das Ergebnis einer Reihe von Untersuchungen, die erst durch das Zwei-Kugel-System möglich wurden. Die Auffassung der Erde als Planet zeugt von der wirkungs-

vollen Hilfestellung, die die unhaltbare Auffassung einer im Zentrum ruhenden Erde der Wissenschaft geleistet hat. Daher muß eine Diskussion der kopernikanischen Revolution mit dem Studium der Zwei-Kugel-Kosmologie beginnen, welche durch die Lehre des Kopernikus schließlich verdrängt wurde. Das Zwei-Kugel-Universum steht an der Wiege des kopernikanischen Systems. Kein Gedankengebäude entsteht aus dem Nichts.

### *Antike Konkurrenten des Zwei-Kugel-Universums*

Die Vorstellung vom Aufbau des Universums aus zwei Kugeln war nicht die einzige im antiken Griechenland betrachtete Kosmologie. Sie war jedoch diejenige, die von der größten Zahl von Leuten, besonders von Astronomen ernst genommen wurde und die auf die spätere abendländische Kultur überging. Doch stehen viele Alternativen, die in der Antike vorgeschlagen und verworfen wurden, modernen kosmologischen Vorstellungen wesentlich näher als das Zwei-Kugel-Universum. Nichts zeigt deutlicher die Vorteile dieses Modells und nichts kündigt die Schwierigkeiten besser an, die bei seinem Umsturz zu erwarten waren, als ein Vergleich des Modells mit einigen seiner – auf den ersten Blick moderneren – Alternativen.

Bereits im fünften vorchristlichen Jahrhundert stellten sich die griechischen Atomisten Leukipp und Demokrit das Universum als einen unendlichen, leeren Raum vor, der von einer unendlichen Anzahl winziger unteilbarer Atome erfüllt war, die sich in alle Richtungen bewegten. In ihrem Universum war die Erde bloß einer von vielen, im wesentlichen ähnlichen Himmelskörpern, die durch zufällige Anhäufungen von Atomen gebildet wurden. Sie war nicht einzigartig, nicht in Ruhe, nicht im Mittelpunkt. Ein unendliches Universum hat ja einen Mittelpunkt. Jeder Teil des Raumes ist wie jeder andere; daher müssen die unendlich vielen Atome, von denen sich einige zusammenballten, um unsere Erde und Sonne zu bilden, auch zahllose andere Welten in anderen Teilen des leeren Raumes gebildet haben. Für die Atomisten gab es andere Sonnen und andere Erden unter den Gestirnen.

Später, im fünften Jahrhundert schlügen Nachfolger des Pythagoras ein zweites Modell vor, das die Erde in Bewegung versetzte und sie teilweise ihres einzigartigen Status beraubte. Die Pythagoreer verlegten die Sterne auf eine riesige sich bewegende Kugel, doch in die Mitte dieser Kugel verlegten sie ein ungeheures Feuer, den Altar des Zeus, der aber von der Erde aus unsichtbar sein sollte. Das Feuer konnte nicht gesehen werden, weil die bewohnten Gebiete der Erde stets von ihm abgewandt wären. Für die Pytha-

goreer war die Erde bloß einer von vielen Himmelskörpern, die sich wie die Sonne auf Kreisen um das zentrale Feuer bewegten. Ein Jahrhundert später schlug Heraklid aus Pontus (viertes vorchristliches Jahrhundert) vor, daß die tägliche Drehung der im Mittelpunkt stehenden Erde und nicht die Drehung der umgebenden Sternkugel, die scheinbare Bewegung der Gestirne hervorrufe. Er verschleierte auch die Symmetrie des Zwei-Kugel-Universums, indem er annahm, daß die Planeten Merkur und Venus die bewegte Sonne umkreisten und nicht um die im Mittelpunkt stehende Erde wanderten (siehe Kapitel 2). Noch später, in der Mitte des dritten vorchristlichen Jahrhunderts, schlug Aristarch aus Samos, dessen kunstvollen und wichtigen Messungen astronomischer Dimensionen im Anhang beschrieben werden, vor, daß die Sonne im Mittelpunkt einer ungeheuer großen Sternenkugel stünde, und die Erde sich auf einem Kreis um die Sonne bewegte. Man bezeichnet ihn deshalb heute manchmal als „Kopernikus der Antike“.

Diese alternativen Kosmologien, besonders die erste und die letzte, sind unseren modernen Anschauungen sehr ähnlich. Wir glauben heute, daß die Erde nur einer von vielen Planeten ist, die die Sonne umkreisen, und daß die Sonne nur einer von vielen Sternen ist, von denen einige ihre eigenen Planeten haben können. Aber obwohl einige dieser spekulativen Vorschläge Anlaß zu bedeutenden wissenschaftlichen Minderheitsschulen in der Antike gaben und obwohl sie alle eine ständige Anregung für Erneuerer wie Kopernikus waren, waren sie zu ihrer Zeit nicht von jenen Argumenten gestützt, die uns nunmehr an sie glauben lassen. Sie wurden daher von den meisten Philosophen und fast allen Astronomen in der Antike verworfen. Im Mittelalter wurden sie lächerlich gemacht oder ganz ignoriert. Es gab gute Gründe für ihre Ablehnung. Die alternativen Kosmologien widersprechen den grundlegenden Erfahrungen, die unsere Sinne über die Struktur des Universums liefern. Außerdem wird diese Verletzung des Hausverständes nicht durch erhöhte Wirksamkeit kompensiert, mit der sie den Himmelserscheinungen Rechnung tragen könnten. Sie sind bestenfalls ebenso zweckmäßig, wissenschaftlich fruchtbar oder genau wie das Zwei-Kugel-Universum, aber es ist viel schwerer, an sie zu glauben. Es war schwierig, sie als Erklärungsmöglichkeit ernst zu nehmen.

Alle diese alternativen Kosmologien setzen die Bewegung der Erde voraus, und alle außer dem System des Heraklid lassen die Erde sich wie einen Himmelskörper bewegen. Die elementarste Unterscheidung, die unsere Sinne nahelegten, ist aber gerade die Unterscheidung von Himmel und Erde. Die Erde ist kein Teil des Himmels, sie ist der Platz, von dem wir den Himmel sehen. Sie zeigt wenig oder keine offensichtlichen Ähnlichkeiten mit den

Himmelskörpern. Letztere scheinen helle Lichtpunkte zu sein, die Erde jedoch ein immenser nichtleuchtender Klumpen aus Lehm und Stein. Am Himmel beobachtet man wenig Veränderung: Die Sterne sind Nacht für Nacht dieselben und haben sich offensichtlich durch viele Jahrhunderte, soweit die antiken Aufzeichnungen reichten, nicht verändert. Im Gegensatz dazu ist die Erde der Ort von Geburt, Veränderung und Vernichtung. Vegetation und Tiere ändern sich von Woche zu Woche, Kulturen entstehen und vergehen von Jahrhundert zu Jahrhundert; Legenden legen Zeugnis ab von den topographischen Veränderungen, die Stürme und Überschwemmungen auf der Erde hervorrufen. Es erscheint widersinnig, die Erde den Himmelskörpern gleich zu machen, deren deutlichstes Charakteristikum jene unwandelbare Gleichmäßigkeit ist, die auf der vergänglichen Erde niemals erreicht werden konnte.

Die Vorstellung, daß sich die Erde bewegt, erscheint anfänglich ebenso absurd. Unsere Sinne informieren uns über Bewegungen und sie deuten auf keine Bewegung der Erde. Der ungeschulte Hausverstand läßt vermuten, daß Luft, Vögel, Wolken und andere Objekte, die nicht fest mit der Erde verbunden sind, zurückbleiben müßten, wenn sich die Erde bewegte. Ein in die Höhe springender Mann würde weit von dem Ausgangspunkt entfernt zur Erde zurückfallen. Steine und Bäume, Rinder und Menschen, würden von der rotierenden Erde wie ein Stein von einer Steinschleuder abgeschüttelt werden. Da keiner dieser Effekte beobachtet wird, ist die Erde in Ruhe. Beobachtung und Argumentation haben dies also gemeinsam bewiesen.

Heute argumentieren in der westlichen Welt nur Kinder auf diese Weise, und nur sie glauben, daß die Erde ruht. In einem frühen Alter überzeugt sie die Autorität von Lehrern, Eltern und Büchern, daß die Erde tatsächlich ein Planet ist und sich bewegt; ihr gesunder Menschenverstand wird umerzogen, die Argumente, die aus der täglichen Erfahrung stammen, verlieren ihre Kraft. Doch Umerziehung ist dabei wesentlich – fehlt sie, sind diese Argumente ungeheuer überzeugend. Die pädagogischen Autoritäten, die wir und unsere Kinder akzeptieren, waren jedoch den Menschen der Antike unbekannt. Die Griechen konnten sich nur auf Beobachtungen und Argumentation verlassen und fanden keinerlei Hinweise auf die Bewegung der Erde. Ohne die Hilfe von Fernrohren oder von mathematischen Berechnungen konnte man keinen Hinweis für die Bewegung des Planeten Erde finden. Die dem bloßen Auge zugänglichen Beobachtungen passen sehr gut ins Zwei-Kugel-Universum (denken Sie an das Universum des Navigators und des Landvermessers), und es gibt keine natürlichere Erklärung für sie. Es fällt nicht schwer, sich vorzustellen, warum die Menschen in der Antike an das Zwei-Kugel-System glaubten. Wir müssen vielmehr herausfinden, warum diese Vorstellung aufgegeben wurde.

## 2 Das Planetenproblem

### *Scheinbare Planetenbewegung*

Wären die Sonne und die Sterne die einzigen dem bloßen Auge sichtbaren Himmelskörper, so könnte der moderne Mensch auch heute noch die grundlegenden Annahmen des Zwei-Kugel-Universums akzeptieren. Sicherlich hätte er sie bis zur Entdeckung des Fernrohrs, mehr als ein halbes Jahrhundert nach Kopernikus' Tod akzeptiert. Es gibt jedoch noch andere wichtige Himmelskörper, insbesondere die Planeten, und das Interesse der Astronomen an diesen Objekten ist die Hauptursache der kopernikanischen Revolution. Wieder werden wir vor der Behandlung von Deutungsversuchen zunächst die Beobachtungen besprechen. Und wieder wird uns die Diskussion der Deutungen mit einem neuen, grundlegenden Problem naturwissenschaftlicher Annahmen konfrontieren.

Der Ausdruck „Planet“ leitet sich von dem griechischen Wort für „Wanderer“ ab; man verwendete ihn auch noch nach dem Tod von Kopernikus, um Himmelskörper, die gegenüber den Sternen wanderten, von jenen zu unterscheiden, deren gegenseitige Lage unverändert blieb. Für die Griechen und ihre Nachfolger war die Sonne einer der sieben Planeten. Die anderen waren Mond, Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn. Die Sterne und diese sieben Planeten waren die einzigen Körper, die in der Antike als Himmelskörper anerkannt wurden. Bis 1781, lange nachdem die kopernikanische Theorie akzeptiert worden war, wurden keine weiteren Planeten entdeckt. Kometen, die in der Antike wohl bekannt waren, wurden vor der kopernikanischen Revolution nicht als Himmelskörper aufgefaßt (Kapitel 6).

Alle Planeten verhalten sich ähnlich wie die Sonne, obwohl ihre Bewegungen im ganzen gesehen komplizierter sind. Alle zeigen eine mit den Sternen gekoppelte tägliche, westwärts gerichtete Bewegung, alle bewegen sich langsam in östlicher Richtung gegen die Sterne, bis sie ungefähr wieder ihren ursprünglichen Platz gefunden haben. Während dieser Bewegungen bleiben die Planeten in der Nähe der Ekliptik, gelegentlich weichen sie nach Norden oder Süden von ihr ab, doch sehr selten verlassen sie das Band der Tierkreiszeichen, einen imaginären Streifen am Himmel, der sich acht Grad

nach beiden Seiten der Ekliptik erstreckt. Doch an diesem Punkt enden alle Ähnlichkeiten zwischen den Planeten, und das Studium der Unregelmäßigkeiten der Planeten beginnt.

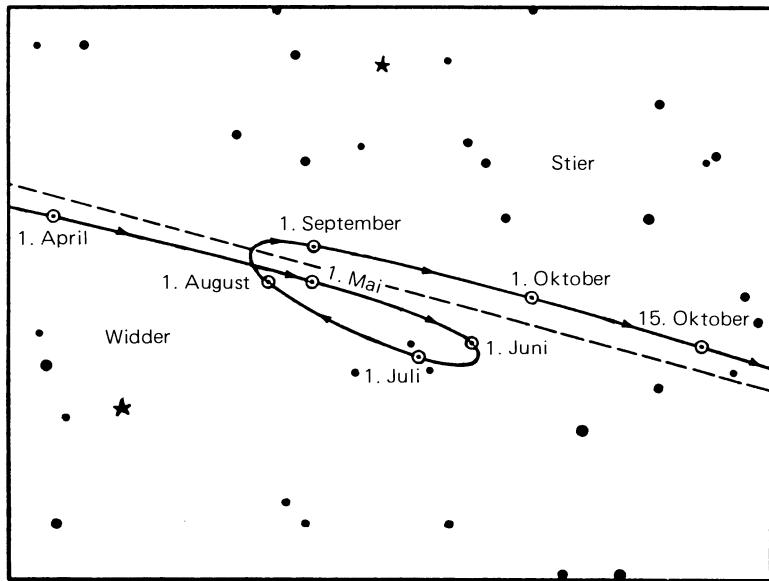
Der Mond bewegt sich schneller und weniger gleichmäßig um die Ekliptik als die Sonne. Im Mittel vollendet er seine Reise durch den Tierkreis in  $27\frac{1}{3}$  Tagen. Doch kann sich diese Zeit vom Mittelwert bis zu sieben Stunden unterscheiden. Außerdem ändert sich das Erscheinungsbild der Mondscheibe während der Bewegung. Bei Neumond ist der Mond vollständig unsichtbar oder düster. Dann erscheint eine schmale helle Mondsichel, die langsam wächst, bis ungefähr eine Woche nach Neumond ein halbkreisförmiger Sektor sichtbar ist. Etwa zwei Wochen nach Neumond erscheint die volle Kreisscheibe. Dann kehrt sich der Zyklus der Phasen um, der Mond nimmt langsam ab, bis wieder Neumond eintritt. Der Zyklus der Mondphasen wiederholt sich, ebenso wie die Reise des Monds durch die Tierkreiszeichen, doch sind diese zwei Mondzyklen beträchtlich außer Takt. Der Neumond wiederholt sich nach einem mittleren Intervall von  $29\frac{1}{2}$  Tagen (einzelne Zyklen können sich bis zu einem halben Tag von diesem Mittelwert unterscheiden), und weil dies um zwei Tage länger als die mittlere Dauer seiner Reise durch den Tierkreis ist, muß sich der Ort aufeinanderfolgender Neumonde langsam durch die Tierkreiszeichen nach Osten verschieben. Wenn in einem Monat der Mond an der Stelle des Frühlingsäquinoktiums zum Neumond wird, wird der Mond noch in seiner abnehmenden Phase sein, wenn er nach  $27\frac{1}{3}$  Tagen zum Frühlingstag- und -nachtgleichpunkt zurückkehrt. Es braucht noch etwa 2 Tage bis zum Neumond, in welcher Zeit der Mond sich fast um 30 Grad nach Osten vom Äquinoktialpunkt wegbewegt hat.

Weil die Mondphasen so leicht sichtbar sind und einen günstigen Abstand haben, boten sie die ältesten Kalendereinheiten. Urtümliche Formen sowohl der Woche, als auch des Monats erscheinen im babylonischen Kalender des dritten vorchristlichen Jahrtausends, einem Kalender, in dem jeder Monat mit der ersten Erscheinung des zunehmenden Monds begann, und das am 7., am 14. und 21. Tag durch die sich wiederholenden Mondviertel unterteilt wurde. In der Morgenröte der abendländischen Kultur müssen die Menschen bereits Neumonde und Mondviertel gezählt haben, um Zeitabschnitte zu messen. Und während die Zivilisation immer weiter fortschritt, versuchten sie wiederholt, diese fundamentale Einheiten zu einem vernünftigen, langfristigen Kalender umzugestalten, einem Kalender, der Geschichtsschreibung und langfristige Verträge erlauben würde.

Aber an diesem Punkt versagt der einfache Mondmonat als Zeiteinheit. Aufeinanderfolgende Neumonde können durch Intervalle von entweder 29 oder 30 Tagen getrennt sein, nur eine komplizierte mathematische Theorie, die auf systematischen Beobachtungen durch viele Generationen beruht, kann die Länge eines gewünschten künftigen Monats bestimmen. Andere Schwierigkeiten ergeben sich aus den verschiedenen Längen der mittleren Mond- und Sonnenzyklen. Gibt es zwar noch im mittleren Orient Gesellschaften, die an reinen Mondkalendern festhalten, so müssen doch die meisten Gesellschaftssysteme ihre Kalender dem Zyklus der Jahreszeiten anpassen; zu diesem Zweck muß eine systematische Methode gefunden werden, gelegentlich einen 13. Monat im üblicherweise zwölf Mondmonate umfassenden Jahr einzuschieben. Dieses scheinen die ersten schwierigen Probleme gewesen zu sein, vor die sich die antike Astronomie gestellt sah. Mehr als alle anderen waren sie für das Entstehen quantitativer Beobachtungen der Planeten verantwortlich. Zwischen dem achten und dem dritten vorschristlichen Jahrhundert lösten die babylonischen Astronomen schließlich diese Schwierigkeiten und sammelten zahlreiche grundlegende Daten, die später für das Zwei-Kugel-Universum verwendet wurden.

Im Gegensatz zu Mond und Sonne erscheinen die übrigen fünf Planeten am Himmel als bloße Lichtpunkte. Der ungeübte Beobachter kann sie mit bloßem Auge von den Sternen nur durch eine Reihe von Beobachtungen unterscheiden, die ihre langsame Bewegung entlang der Ekliptik zeigen. Meist bewegen sich die Planeten durch die Tierkreiszeichen nach Osten: Dies ist ihre „normale Bewegung“. Im Mittel brauchen sowohl Merkur als auch Venus ein Jahr für eine vollständige Reise durch den Tierkreis, die Länge des Marsjahres ist im Mittel 687 Tage, für den Jupiter bereits 12 Jahre und für den Saturn 29 Jahre. Doch kann sich die jeweilige Umlaufzeit wesentlich vom Mittelwert unterscheiden. Selbst auf ihrer ostwärts gerichteten Reise durch die Sterne bewegen sich Planeten nicht mit gleichförmiger Geschwindigkeit.

Die normale Bewegung der Planeten (außer Sonne und Mond) wird gelegentlich durch kurze Intervalle westwärts gerichteter, also rückläufiger Bewegung unterbrochen. Bild 15 zeigt, daß sich die Bewegung des Mars im Sternbild des Stieres von der Bewegung der Sonne durch dasselbe Sternzeichen (Bild 9) unterscheidet. Mars tritt in das Diagramm auf normale Weise ein, doch im Laufe seiner Bewegung verlangsamt er sich schließlich, bis er seine Bewegungsrichtung umkehrt und nach Westen zu wandern beginnt. Andere Planeten verhalten sich in ähnlicher Weise, jeder wiederholt die kurzzeitige Rückwärtsbewegung nach einer fixen Zeitdauer. Merkur kehrt



**Bild 15** Mars in rückläufiger Bewegung in den Sternbildern Widder und Stier. Der Himmelsausschnitt ist derselbe wie in Bild 9 und im Kasten der Sternkarte von Bild 8. Die strichlierte Linie ist die Ekliptik, die ausgezogene die Bahn des Planeten. Man beachte, daß der Planet nicht genau auf der Ekliptik läuft, und daß er sich im Gegensatz zu seiner Gesamtbewegung (gegenüber den Sternen nach Osten) von Mitte Juni bis Anfang August nach Westen bewegt. Die Rückläufigkeit des Mars hat immer ungefähr diese Form und Dauer, sie ereignet sich jedoch nicht immer zum selben Datum und an derselben Stelle des Himmels.

seine Bewegung einmal alle 116 Tage um, Venus alle 584 Tage. Mars, Jupiter und Saturn zeigen ihre rückläufige Bewegung alle 780 bzw. 399, bzw. 378 Tage.

Verhalten sich die fünf Wandelsterne auf ihrer Bahn über den Sternenhimmel sehr ähnlich, so teilt sie ein anderes Kennzeichen ihrer Bewegung in zwei Gruppen: die Beziehung zwischen ihrem Ort und dem der Sonne. Merkur und Venus entfernen sich niemals sehr weit von der Sonne. Merkur findet man stets innerhalb 28 Grad von der Sonnenscheibe, die größte Entfernung der Venus ist 45 Grad. Beide Planeten bewegen sich kontinuierlich hin und her, eine Zeitlang bewegen sie sich ostwärts mit der Sonne, dann schreiten sie rückwärts und kehren schließlich ihre Bewegung wieder um, um die Sonne einmal mehr zu überholen. Wenn sie östlich der Sonne stehen,

erscheinen sie als „Abendsterne“, indem sie kurz nach Sonnenuntergang sichtbar werden und der Sonne bald darauf unter den Horizont folgen. Stehen sie nach ihrer rückläufigen Bewegung westlich der Sonne, werden sie „Morgensterne“, die kurz vor Sonnenaufgang aufgehen und im hellen Licht verschwinden. Jedoch dazwischen können wegen ihrer Sonnennähe weder Merkur noch Venus gesehen werden. Daher wurde keiner dieser beiden Planeten, bevor ihre Bewegung bezüglich der Himmelkugel analysiert war, als derselbe Himmelskörper erkannt, wenn er sich am Morgen oder am Abend zeigte. Jahrtausende lang hatte Venus verschiedene Namen, je nachdem, ob sie sich als Morgenstern oder Wochen später als Abendstern zeigte.

Ein ganz anderes Verhalten zeigen Mars, Jupiter und Saturn. Gelegentlich sind sie sehr nahe bei der Sonne, in „Konjunktion“, dann wiederum sind sie 180 Grad von ihr entfernt, in „Opposition“, dazwischen nehmen sie alle möglichen Positionen ein. Ihre Bewegungsfreiheit ist zwar größer, doch auch ihr Verhalten hängt mit der Sonne zusammen. Diese drei Planeten zeigen ihre rückläufige Bewegung nur, wenn sie in Opposition sind. In diesem Stadium erscheinen sie auch heller als zu irgendeiner anderen Zeit. Diese vermehrte Leuchtkraft, die zumindest seit dem vierten vorchristlichen Jahrhundert allgemein als Anzeichen gedeutet wurde, daß sich der Abstand des Planeten von der Erde verkleinert hatte, zeigt sich besonders auffallend beim Mars. Gewöhnlich ist er ein unauffälliger Planet, doch in Opposition wird Mars häufig alle Himmelskörper am Nachthimmel außer dem Mond und der Venus an Leuchtkraft übertreffen.

Das Interesse an den fünf Wandelsternen ist keineswegs so alt, wie das Interesse an Sonne und Mond, vermutlich weil die Planeten keine offensichtliche praktische Bedeutung für das Leben der antiken Völker hatten. Doch wurden Beobachtungen von Venus-Aufgängen und -Untergängen bereits im 19. vorchristlichen Jahrhundert in Mesopotamien aufgezeichnet, wahrscheinlich zum Zweck der Zukunftsdeutungen, ähnlich den Vorzeichen, die aus den Eingeweiden der Opferschafe gelesen wurden. Diese vereinzelten Beobachtungen waren die Vorläufer der höher entwickelten systematischen Astrologie, eines Mittels der Vorhersage, dessen innige Beziehung zur Entwicklung der Astronomie der Planeten im nächsten Kapitel betrachtet wird. Dasselbe Interesse an Vorzeichen motivierte die systematischeren und vollständigeren Aufzeichnungen von Verfinsternungen, rückläufigen Bewegungen und anderen auffälligen Planetenerscheinungen, die babylonische Beobachter nach der Mitte des achten vorchristlichen Jahrhunderts anlegten. Ptolemäus, der Hauptvertreter der antiken Astronomen, führte später Klage, daß selbst diese Aufzeichnungen bruchstückhaft waren, doch auf jeden Fall boten sie

die ersten Daten, die das volle Problem der Planeten andeuteten, wie es sich in Griechenland nach dem vierten vorchristlichen Jahrhundert entwickeln sollte.

Das Problem der Planeten ist durch die grobe Beschreibung ihrer Bewegung nur teilweise angegeben. Wie können die komplizierten und veränderlichen Planetenbewegungen auf eine einfache Ordnung zurückgeführt werden? Warum schreiten die Planeten zurück, und wie kann man die unregelmäßige Geschwindigkeit selbst ihrer normalen Bewegung erklären? Diese Fragen deuten die Hauptrichtung der astronomischen Forschung in den zwei Jahrtausenden von Plato zu Kopernikus an. Die qualitative Beschreibung der Planetenbewegungen erfaßt aber die Problematik nicht vollständig, sondern vereinfacht sie in vielleicht sogar irreführender Weise. Wie wir in Kürze sehen werden, kann man leicht Planetentheorien angeben, die den Beobachtungen qualitativ entsprechen: Die obige Beschreibung kann auf verschiedene Weise gedeutet werden. Das Problem des Astronomen ist aber nicht so einfach. Er muß nicht nur die Existenz der immer wieder auftretenden westwärts gerichteten Bewegungen erklären, sondern auch die genaue Position jedes Planeten am Sternenhimmel langfristig vorhersagen. Das wahre Problem der Planeten, das schließlich zur kopernikanischen Revolution führte, ist die quantitative Angabe der Planetenpositionen in Form von langen Tabellen, welche die jeweiligen Positionen in Graden und Minuten angeben.

### *Der Ort der Planeten*

Soweit das Zwei-Kugel-Universum bisher entwickelt wurde, gibt es keine Information über die Örter und die Bewegungen der sieben Planeten. Nicht einmal die Position der Sonne wurde diskutiert. Um am Frühlingsäquinoktium oder einem anderen Punkt der Sternenkugel zu erscheinen, braucht die Sonne bloß irgendwo auf einer Linie zu stehen, die sich vom Auge des Beobachters zum entsprechenden Punkt am Sternenhintergrund erstreckt. Die Sonne könnte sich wie die anderen Planeten entweder innerhalb, auf oder vielleicht sogar außerhalb der Sternkugel befinden. Obwohl das Zwei-Kugel-Universum bei der Angabe der Gestalt und des Ortes der Planetenbahnen versagt, läßt es doch gewisse Annahmen plausibler erscheinen als andere. Es leitet die Vorstellung des Astronomen und schränkt dadurch seine Lösung des Problems ein. Die Frage der Planetenpositionen ergab sich aus Beobachtungen, sie wurde jedoch ab dem vierten Jahrhundert vor Christus im Begriffsrahmen des Zwei-Kugel-Universums bearbeitet. Sowohl Beobachtung als auch Theorie trugen wesentlich dazu bei.

Zum Beispiel sollten innerhalb eines Zwei-Kugel-Modells die Planetenbahnen möglichst die grundlegende Symmetrie erhalten, die in den ersten zwei Kugeln verkörpert wurde. Idealerweise sollten daher die Bahnen Kreise mit der Erde im Mittelpunkt sein, die Planeten sollten sich auf diesen Kreisen mit derselben Gleichmäßigkeit wie die Sternkugel drehen. Doch das Ideal stimmt nicht mit der Beobachtung überein. Wie wir sofort sehen werden, gibt eine Kreisbahn mit der Erde im Mittelpunkt eine gute Beschreibung der jährlichen Sonnenbewegung, ein ähnlicher Kreis kann in angenehmer Weise die etwas weniger gleichmäßige Bewegung des Mondes wiedergeben. Doch geben Kreisbahnen keinen Hinweis auf die großen Unregelmäßigkeiten, wie die rückläufigen Bewegungen, die bei den anderen fünf Wandelsternen beobachtet werden. Trotzdem dachten die Astronomen, die an das Zwei-Kugel-Universum glaubten, Jahrhundertelang, daß erdzentrierte Kreise die natürlichen Bahnen der Planeten wären. Solche Bahnen trugen zumindestens der mittleren, ostwärts gerichteten Bewegung Rechnung. Die beobachteten Abweichungen von der mittleren Bewegung – Änderungen in der Geschwindigkeit oder Richtung der Bewegung eines Planeten – deuteten an, daß der Planet selbst von seiner natürlichen Kreisbahn abgewichen wäre, zu der er wieder zurückkommen würde.

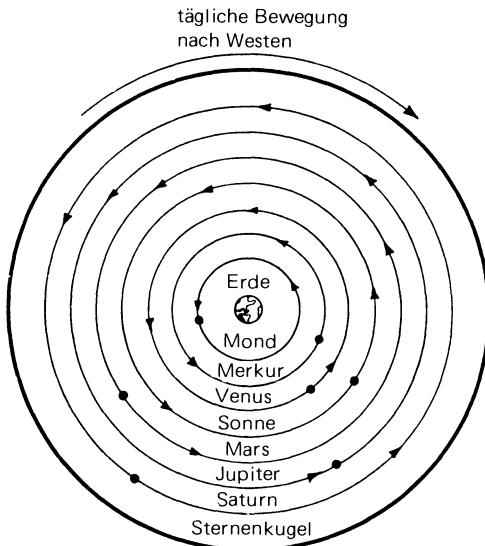
Wir werden einige der antiken Erklärungen der Abweichungen in den nächsten Abschnitten behandeln, doch zuerst sollten wir sehen, wie weit wir bei Vernachlässigung der Planetenunregelmäßigkeiten und unter der Annahme näherungsweise kreisförmiger Bahnen kommen können. Es erscheint nahezu sicher, daß sich die Planeten im Zwei-Kugel-Universum im Bereich zwischen der Erde und den Sternen bewegen. Die Sternenkugel selbst wurde oft als die äußere Begrenzung des Universums angesehen, so daß die Planeten nicht außerhalb sein konnten. Der Unterschied zwischen den Stern- und den Planetenbewegungen deutete daraufhin, daß die Planeten wahrscheinlich nicht auf der Kugel lagen, sondern in einem Zwischenbereich, wo sie Einflüssen ausgesetzt waren, die auf der Sternenkugel keine Wirkung mehr hatten. Diese Beweisführung erhielt von den Einzelheiten Unterstützung. Auch die auf der Mondscheibe sichtbaren Einzelheiten ließen vermuten, daß zumindest der Mond der Erde näher als die Sterne wäre. Die antiken Astronomen verlegten die Planetenbahnen deshalb in den weiten und früher als leer betrachteten Raum zwischen Erde und Sternenkugel. Gegen Ende des vierten Jahrhunderts begann sich also das Zwei-Kugel-Universum zu füllen, und später wurde es regelrecht überfüllt.

Sobald Ort und Gestalt ihrer Bahnen im großen bekannt waren, konnte man plausible Annahmen über die Anordnung der Planeten treffen. Planeten

wie Saturn und Jupiter, deren ostwärts gerichtete Bewegung langsam war, und die daher mit den Sternen nahezu Schritt hielten, wurden fern von der Erde und in der Nähe der Sternenkugel angesiedelt. Auf der anderen Seite muß der Mond, der täglich im Rennen mit den Sternen mehr als 12 Grad zurückbleibt, der ruhenden Oberfläche der Erde näher sein. Einige antike Philosophen scheinen diese Anordnung mit einer Vorstellung begründet zu haben, nach der die Planeten in einem gigantischen Ätherwirbel schwimmen, dessen äußerer Rand mit der Sternenkugel dahingetragen wird und dessen Inneres auf der Erdoberfläche ruht. Jeder Planet, der in einem solchen Wirbel gefangen ist, würde bezüglich der Sternenkugel umso mehr zurückbleiben, je näher er der Erde wäre. Andere Philosophen kamen mit einem anderen Argument zum selben Schluß, wie er zumindest in seinen wesentlichen Zügen vom römischen Architekten Vitruv (1. Jahrhundert vor Chr.) berichtet wurde. Bei der Analyse der Unterschiede zwischen den Umlaufsdauern der verschiedenen Planeten schlug Vitruv eine interessante Analogie vor:

Setze sieben Ameisen auf eine Töpferscheibe, die um den Mittelpunkt sieben Rillen hat, die nach außen im Umfang zunehmen. Nimm an, daß diese Ameisen gezwungen sind, diese Rillen entlang zu laufen, während sich die Scheibe in der entgegengesetzten Richtung dreht. Obwohl sie sich in einer Richtung entgegengesetzt zu der der Scheibe bewegen müssen, müssen die Ameisen ihre Wege in der entgegengesetzten Richtung vollenden, und jene Ameise, die dem Mittelpunkt am nächsten ist, muß ihren Kreis früher beenden, während die Ameise, die am äußeren Rand der Scheiben entlangläuft, wegen der Größe des Umfangs viel später ihren Weg vollendet, obwohl sie sich genauso schnell wie die anderen bewegt. In der gleichen Weise vollenden diese Sterne, die gegen die Drehung des Firmaments ankämpfen, ihre Kreisbahnen; doch wegen der Drehung der Himmel werden sie jeden Tag zurückgeworfen.<sup>1</sup>

Argumente wie das obige führten noch vor dem Ende des vierten Jahrhunderts vor Christus zu einem Bild des Universums, das Bild 16 entspricht. Ähnliche Diagramme oder ihre Beschreibung findet man in Einführungsbüchern zur Astronomie und Kosmologie bis ins 17. Jahrhundert, lange nach Kopernikus' Tod. Die Erde steht im Mittelpunkt der Sternenkugel, die das Universum begrenzt. Von außen nach innen befinden sich die Bahnen von Saturn, der am längsten für seine Reise durch den Zodiak braucht, gefolgt von Jupiter und Mars. Bis dahin ist die Reihenfolge eindeutig. Die Planeten werden von außen mit abnehmender Umlaufsdauer angeordnet; dasselbe Argument führt dazu, die Mondbahn als erdnächste zu betrachten.



**Bild 16**

*Ungefährre Planetenbahnen im Zwei-Kugel-Universum. Der äußerste Kreis ist ein Querschnitt durch die Sternenkugel in der Ebene der Ekliptik.*

Doch die Anordnung der drei restlichen Planeten ist problematisch. Sonne, Venus und Merkur vollenden ihre Reise um die Erde in einem Jahr, ihre Ordnung kann daher nicht mit Hilfe des bei den anderen Planeten angewandten Prinzips bestimmt werden. In der Tat herrschten über ihre Anordnung in der Antike große Meinungsverschiedenheiten. Bis zum zweiten Jahrhundert vor Christus plazierten die meisten Astronomen die Sonnenbahn als erste außerhalb der Mondbahn, sie ließen darauf Venus, Merkur und schließlich Mars folgen. Später jedoch wurde die im Bild gezeigte Anordnung – Mond, Merkur, Venus, Sonne, Mars – zunehmend beliebter. Im besonderen wurde sie von Ptolemäus angenommen, und seine Autorität zwang sie den meisten seiner Nachfolger auf. Wir werden daher diese Reihenfolge als die Standardreihenfolge betrachten.

Bild 16 gibt nur den groben Aufbau wieder. Es bietet keinen Hinweis auf die relativen Größenverhältnisse der einzelnen Bahnen und versucht nicht, die beobachteten Unregelmäßigkeiten der Planetenbewegungen zu erklären. Doch hatte diese Vorstellung vom Bau des Universums, zwei wichtige Funktionen bei der folgenden Entwicklung von Astronomie und Kosmologie. Zunächst enthält das Diagramm den Großteil der Information über die Struktur des geozentrischen Universums, soweit sie jemals unter Nichtastronomen Allgemeinwissen wurde. Die weiteren Errungenschaften antiker

Astronomie waren den meisten Nichtfachleuten zu mathematisch. Wie wir noch sehen werden, haben die wichtigsten Kosmologien der Antike und des Mittelalters die antike Astronomie nicht viel weitergehend berücksichtigt. Die Astronomie wurde in der Folge eine esoterische Wissenschaft, deren Entwicklung dem Menschen kein Zuhause bot.

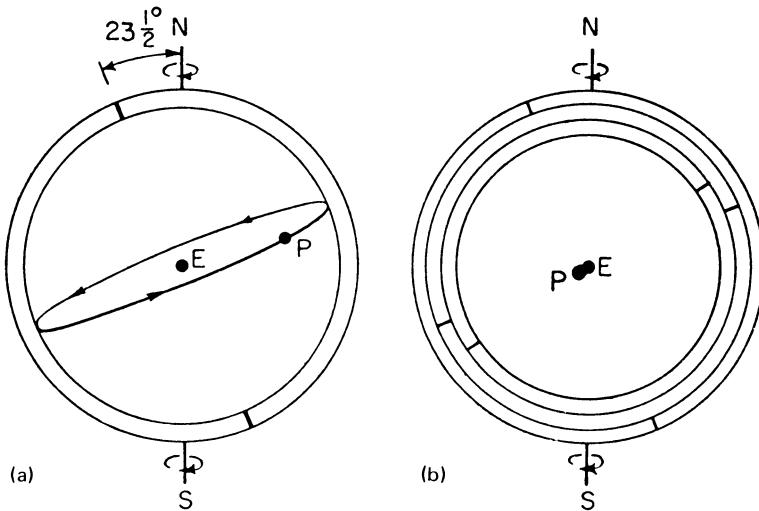
Außerdem erwies sich ein Diagramm wie in Bild 16 als wirkungsvolles Hilfsmittel für die astronomische Forschung. Zum Beispiel konnte im Lauf des vierten Jahrhunderts vor Christus daraus eine vollständige qualitative Erklärung der Mondphasen und Mondesfinsternisse hergeleitet werden. Im Laufe des vierten und dritten Jahrhunderts führten dieselben Vorstellungen auf eine Reihe relativ genauer Bestimmungen des Erdumfanges. Während des zweiten Jahrhunderts vor Christus gaben sie die Grundlage für eine brillant ersonnene Abschätzung von Größe und Entfernung der Sonne und des Mondes. Diese Erklärungen und Messungen, besonders die letzte, zeugen von den großen Leistungen der antiken Astronomie. Wir haben sie jedoch auf den technischen Anhang (Abschnitt 3 und 4) verschoben, da sie vom Wandel der astronomischen Theorie im Laufe der kopernikanischen Revolution nicht beeinflußt wurden. Trotzdem haben sie für ihren Ablauf Bedeutung. Die Möglichkeit, aus dem detaillierten Zwei-Kugel-Universum Himmelserscheinungen wie etwa Finsternisse, zu erklären und vorherzusagen und auch Abmessungen der Himmelsregionen anzugeben, stärkte seinen Einfluß auf das Denken von Laien und Astronomen in ungeheurem Maß.

Diese Errungenschaften haben jedoch nichts mit dem grundlegenden Problem der Unregelmäßigkeit der Planetenbewegung zu tun, das den Anstoß zur kopernikanischen Revolution gab. Wie viele Probleme der antiken Astronomie scheint es erstmalig im vierten Jahrhundert aufgetaucht zu sein, als die Erklärung der täglichen Bewegung durch das Zwei-Kugel-Modell es den griechischen Astronomen erstmals ermöglichte, die auftretenden Unregelmäßigkeiten festzustellen. Während der folgenden fünf Jahrhunderte brachten verschiedene Versuche zur Erklärung dieser Unregelmäßigkeiten einige Planetentheorien von bisher unerreichter Genauigkeit hervor. Und doch bilden diese Versuche gleichzeitig den absonderlichsten und mathematischsten Teil antiker Astronomie und werden daher meist aus Büchern wie diesem weggelassen. Obwohl ein Abriß der antiken Planetentheorie Voraussetzung zum Verständnis der kopernikanischen Revolution ist, werden es vielleicht einige Leser vorziehen, die nächsten drei Abschnitte (besonders den ersten) zu überspringen und erst wieder den Schlußabschnitt dieses Kapitels zu lesen, in dem wir wissenschaftliche Annahmen diskutieren.

## *Die Theorie der homozentrischen Kugeln*

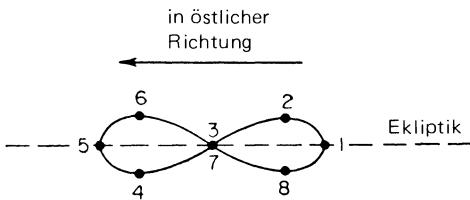
Der Philosoph Plato, dessen tiefeschürfende Fragen einen Großteil des nachfolgenden griechischen Denkens dominierten, scheint der erste gewesen zu sein, der das Problem der Planeten erkannte. Früh im vierten Jahrhundert soll Plato gefragt haben: „Auf welche gleichförmigen und geordneten Bewegungen können die scheinbaren Bewegungen der Planeten zurückgeführt werden?“<sup>2</sup> Die erste Antwort auf diese Frage wurde von seinem früheren Schüler Eudoxus (ca. 408 bis 355 vor Chr.) gegeben. Im Planetensystem des Eudoxus wurde jeder Planet auf die innerste Kugel einer Gruppe von zwei oder mehr verbundenen konzentrischen Kugeln gesetzt, deren gleichzeitige Drehung um verschiedene Achsen die beobachtete Bewegung des Planeten hervorrief. Bild 17a zeigt einen Querschnitt von zwei solchen ineinander-gesteckten Kugeln, deren gemeinsamer Mittelpunkt die Erde ist, und deren Berührungsstellen die Enden der geneigten Achse der inneren Kugel sind, die als Drehpunkte dienen. Die äußere Kugel ist die Sternenkugel, oder sie weist zumindest deren Bewegung auf. Ihre Achse verläuft durch den Himmels-nord- und -südpol, sie dreht sich westwärts um diese Achse einmal in 23 Stunden 56 Minuten. Die Achse der inneren Kugel trifft die äußere Kugel an zwei entgegengesetzten Punkten,  $23\frac{1}{2}$  Grad von Nord- und Südhimmelstpol entfernt. Daher stimmt der Äquator der inneren Kugel von der Erde aus betrachtet unabhängig von der Drehung der beiden Kugeln stets mit der Ekliptik auf der Sternenkugel überein.

Wenn die Sonne auf einen Punkt des Äquators der inneren Kugel gesetzt wird und sich diese Kugel in östlicher Richtung einmal im Jahr um Ihre Achse dreht, während sich die äußere Kugel einmal im Tag dreht, wird die Summe der beiden Bewegungen die beobachtete Sonnenbewegung wiedergeben. Die äußere Kugel führt zur beobachteten, westwärts gerichteten, täglichen Bewegung mit dem Sonnenauf- und -untergang, die innere Kugel führt auf die langsamere jährliche Bewegung der Sonne auf der Ekliptik. Wenn man in ähnlicher Weise den Mond auf den Äquator der inneren Kugel setzt und diese in  $27\frac{1}{3}$  Tagen umdrehen lässt, dann muß die Bewegung dieser inneren Kugel die mittlere Bewegung des Mondes entlang der Ekliptik darstellen. Die Abweichungen des Mondes von der Ekliptik nach Norden und nach Süden und einige Unregelmäßigkeiten in der Umlaufsdauer können durch die Hinzunahme einer weiteren sich langsam drehenden Kugel ange-nähert werden. Eudoxus benutzte (überflüssigerweise) zur Beschreibung der Sonnenbewegung noch eine dritte Kugel, so daß für die Beschreibung von Sonnen- und Mondbewegung sechs Kugeln notwendig waren.



**Bild 17** Homozentrische Kugeln. Im Zwei-Kugel-System (a) bewirkt die äußerste Kugel die tägliche Drehung, die innere führt den Planeten (Sonne oder Mond) ostwärts um die Ekliptik. Im Vier-Kugel-System (b) liegt der Planet P außerhalb der Zeichenebene, fast auf einer Linie von der Erde E zum Betrachter. Die zwei innersten Kugeln erzeugen die in Bild 18 gezeigte Schleifenbewegung, die äußeren verursachen die tägliche Bewegung und die mittlere Bewegung des Planeten nach Osten.

Die Kugeln in Bild 17a wurden homozentrische Kugeln genannt, weil sie ein gemeinsames Zentrum, nämlich die Erde besitzen. Zwei oder drei solcher Kugeln können die Bewegung der Sonne und des Mondes näherungsweise darstellen. Sie können aber den rückläufigen Bewegungen der Planeten nicht Rechnung tragen. Das Genie des Geometers Eudoxus zeigte sich in der Abänderung des Systems, die er zur Behandlung des Verhaltens der restlichen fünf Planeten einführte. Für jeden von ihnen benützte er insgesamt vier Kugeln, wie in Bild 17b skizziert ist. Die zwei äußeren Kugeln bewegen sich genauso wie die Kugeln von Bild 17a. Die äußere Kugel weist die tägliche Bewegung der Sternenkugel auf, und die zweite Kugel dreht sich einmal in der mittleren Umlaufszeit des Planeten in östlicher Richtung. Die dritte Kugel steht mit der zweiten an zwei diametral entgegengesetzten Punkten auf der Ekliptik in Kontakt, und die Achse der innersten Kugel ist schließlich an der dritten Kugel unter einem Winkel befestigt, der von den Details der zu beschreibenden Bewegung abhängt. Der Planet selbst befindet sich auf dem Äquator der vierten Kugel.



**Bild 18** Schleifenbewegung auf Grund der beiden innersten homozentrischen Kugeln. Im vollständigen Vier-Kugel-System wird dieser Schleifenbewegung die gleichmäßige Ostwärtsbewegung der zweiten Kugel überlagert, die den Planeten allein mit gleichmäßiger Geschwindigkeit um die Ekliptik führen würde. Durch die Zusammensetzung der Bewegungen beschränkt sich die Gesamtbewegung des Planeten nicht mehr auf die Ekliptik und variiert in ihrer Geschwindigkeit. Von 1 nach 5 auf der Schleife ist die Gesamtbewegung schneller als die mittlere Bewegung, von 5 nach 1 langsamer, in der Nähe von 3 kann sich der Planet nach Westen bewegen, also rücklaufen.

Man stelle sich nun vor, daß die äußersten zwei Kugeln festgehalten werden und die innersten zwei Kugeln in entgegengesetzten Richtungen rotieren. Jede vollendet eine Umdrehung in der Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bewegungsumkehrungen des Planeten (z. B. 399 Tage für den Jupiter). Ein Beobachter, der die Bewegung des Planeten gegen den im Augenblick stationären Hintergrund der zweiten Kugel beobachtet, wird den Planeten in einer Achterfigur bewegt sehen, deren Schleifen von der Ekliptik geteilt werden. Diese Bewegung ist in Bild 18 skizziert; der Planet läuft langsam durch die Positionen 1, 2, 3, ... und braucht gleiche Zeiten von einem nummerierten Punkt zum nächsten. Während seiner Bewegung von eins über drei nach fünf bewegt sich der Planet dabei in östlicher Richtung auf der Ekliptik.

Nun lassen wir die zweite Kugel nach Osten rotieren, wobei sie die zwei inneren rotierenden Kugeln mitführt, und beobachten die Gesamtbewegung des Planeten gegen den Sternhintergrund der ersten Kugel, die zunächst stationär gehalten werde. Der Planet wird durch die Bewegung der zweiten Kugel stets nach Osten geführt. Während sich der Planet in Bild 18 von 1 nach 5 bewegt, erhält er eine zusätzliche gleichgerichtete Bewegung, so daß er sich schneller als die zweite Kugel bewegt. Während der Planet von 5 nach 1 in Bild 18 wandert, ist die ostwärtsgerichtete Bewegung der zweiten Kugel jedoch der westwärts gerichteten der beiden inneren Kugeln entgegengesetzt. Wenn letztere am schnellsten ist, nahe Punkt 7 in Bild 18

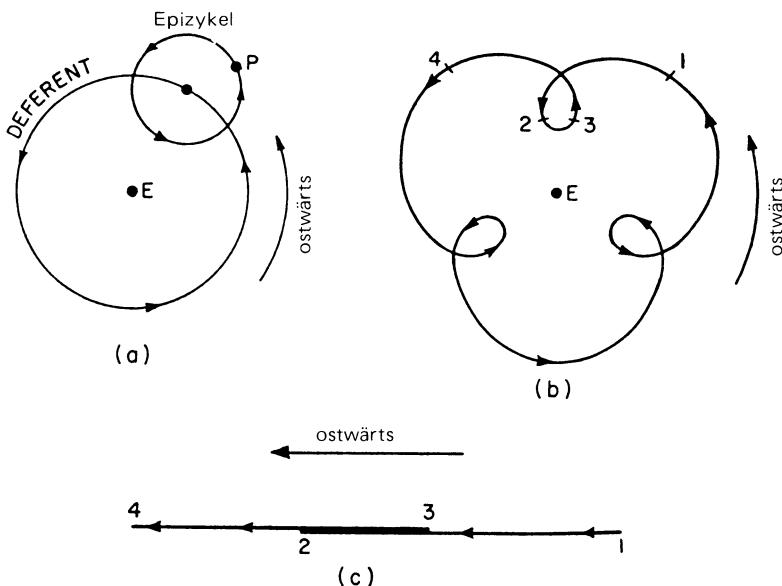
kann die Gesamtbewegung des Planeten gegen die Sternenkugel tatsächlich nach Westen gerichtet sein, also in rückläufiger Richtung. Dieses Charakteristikum der Planetenbewegungen wollte Eudoxus in seinem Modell reproduzieren.

Ein System von vier verschachtelten homozentrischen Kugeln beschreibt die Bewegung des Jupiters näherungsweise, weitere vier Kugeln können die Bewegung des Saturn beschreiben. Für die restlichen drei Planeten brauchte man auf Grund einer Erweiterung, die etwa 330 v. Chr. von Eudoxus' Nachfolger Kallipp vorgenommen wurde, 5 Kugeln, wodurch die Analyse der resultierenden Bewegungen zunehmend komplizierter wird. Glücklicherweise brauchen wir diese Kombinationen von rotierenden Kugeln nicht weiter zu verfolgen, weil alle homozentrischen Systeme einen schweren Nachteil haben, der in der Antike bald zu ihrer Ablehnung führte. Da die Theorie des Eudoxus jeden Planeten auf eine Kugel mit der Erde im Mittelpunkt setzt, kann der Abstand zwischen einem Planeten und der Erde nicht variieren. Die Planeten erscheinen jedoch heller und daher der Erde näher zu sein, wenn sie rückwärts schreiten. In der Antike wurden die homozentrischen Kugeln häufig wegen der mangelhaften Erklärung dieser Tatsache kritisiert, und das System wurde von den meisten Astronomen sogleich aufgegeben, als eine bessere Erklärung dieser Erscheinung vorgeschlagen wurde.

Obwohl sie als astronomisches Hilfsmittel nur ein kurzes Leben führte, spielte die Theorie der homozentrischen Kugeln eine große Rolle in der Entwicklung astronomischen und kosmologischen Denkens. Durch einen historischen Zufall enthielt das Jahrhundert, in dem sie die beste Erklärung der Planetenbewegung abzugeben schien, den Großteil der Lebenszeit des griechischen Philosophen Aristoteles, der diese Gedanken in die umfassendste, detailreichste und wichtigste Kosmologie der Antike einbaute. Keine Kosmologie von vergleichbarer Vollständigkeit hat jemals das mathematische System von Epizyklen und Deferenten benutzt, die in den Jahrhunderten nach Aristoteles zur Erklärung der Planetenbewegungen verwendet wurden. Die Vorstellung, daß Planeten auf rotierenden sphärischen Schalen mit der Erde im Mittelpunkt sitzen, blieb ein anerkannter Teil kosmologischen Denkens bis ins frühe 17. Jahrhundert. Selbst die Schriften des Kopernikus zeigen wichtige Spuren dieser Vorstellung. Im Titel des großen Werkes *De Revolutionibus Orbium Caelestium* bedeutet das Wort „orbs“ nicht die Planeten selbst, sondern die konzentrischen Kugelschalen, auf denen die Planeten und die Sterne sitzen.

## Epizykel und Deferenten

Der Ursprung der Vorstellung, die die homozentrischen Kugeln bei der Erklärung der Einzelheiten der Planetenbewegung ablöste, ist unbekannt, doch ihre Grundzüge wurden früh erforscht und von zwei griechischen Astronomen und Mathematikern, Apollonius und Hipparch, entwickelt, deren Werk die Zeitspanne von der Mitte des dritten Jahrhunderts zum Ende des zweiten vorchristlichen Jahrhunderts umfaßt. In seiner einfachsten Form besteht der neue mathematische Mechanismus aus einem kleinen Kreis, dem Epizykel, der gleichförmig um einen Punkt am Umfang eines zweiten rotierenden Kreises, des Deferenten, rotiert (Bild 19a). Der Planet  $P$  wird auf den Epizykel gesetzt, der Mittelpunkt des Deferenten fällt mit dem Mittelpunkt der Erde zusammen.



**Bild 19** Das grundlegende System Epizykel-Deferent. In (a) sind ein typischer Deferent und Epizykel gezeigt; die von ihnen erzeugte Schleifenbewegung in der Ebene der Ekliptik ist in (b) dargestellt; (c) zeigt den Teil 1-2-3-4 der Bewegung in (b), wie er von einem Beobachter auf der im Mittelpunkt stehenden Erde  $E$  gesehen wird.

Das Epizykel-Deferenten System soll nur Bewegungen bezüglich der Sternenkugel beschreiben. Sowohl Epizykel als auch Deferent sind in Bild 19a in der Ebene der Ekliptik gezeichnet, so daß die Drehung der Sternenkugel das gesamte Diagramm (ausgenommen die zentrale Erde) eine Umdrehung pro Tag machen läßt und auf diese Weise die tägliche Bewegung des Planeten hervorruft. Wären der Epizykel und der Deferent auf dem Bild stationär und hätten sie keine zusätzliche Eigenbewegung, wäre der Planet in der Ebene der Ekliptik fixiert und würde daher die Bewegung eines Sterns, eine westwärts gerichtete Kreisbahn mit einer Umlaufsdauer von 23 Stunden 56 Minuten ausführen. Unter Bewegung wollen wir dabei stets die *zusätzliche* Bewegung des Deferenten oder des Epizykels in der Ebene der Ekliptik verstehen. Die tägliche Bewegung der Kugel und der Ebene der Ekliptik wird als bekannt vorausgesetzt.

Nehmen wir z. B. an, daß sich der Deferent einmal jährlich in östlicher Richtung dreht, und vernachlässigen wir den Epizykel zunächst. Dann trägt die Drehung des Deferenten die Sonne einmal im Jahr um die Ekliptik. Und ihre Bewegung ist damit näherungsweise mit Hilfe eines einzelnen Deferenten beschrieben. Diese Technik wurde bereits bei der Erklärung der mittleren Planetenbewegung in Bild 16 verwendet.

Nun berücksichtigen wir auch den Epizykel. Wenn dieser genau drei Umdrehungen ausführt, während sich der Deferent einmal im gleichen Sinne dreht, dann ergibt sich die in Bild 19b gezeigte Gesamtbewegung des Planeten innerhalb der Sternenkugel. Wenn die Drehung des Epizykels den Planeten außerhalb des Deferenten führt, dann addieren sich die Drehungen zu einer ostwärts gerichteten Gesamtbewegung des Planeten. Bringt die Drehung des Epizykels den Planeten dagegen ins Innere des Deferenten, dann führt der Epizykel den Planeten in westlicher Richtung, der Bewegung des Deferenten entgegen. Ist daher der Planet der Erde am nächsten, so können sich die beiden Bewegungen zu einer westwärts gerichteten rückläufigen Gesamtbewegung zusammensetzen. Dies tritt auf den Innenseiten der kleinen Schleifen in Bild 19b ein. Auf dem Rest seiner Bahn bewegt sich der Planet wie üblich nach Osten, doch variiert seine Geschwindigkeit dabei.

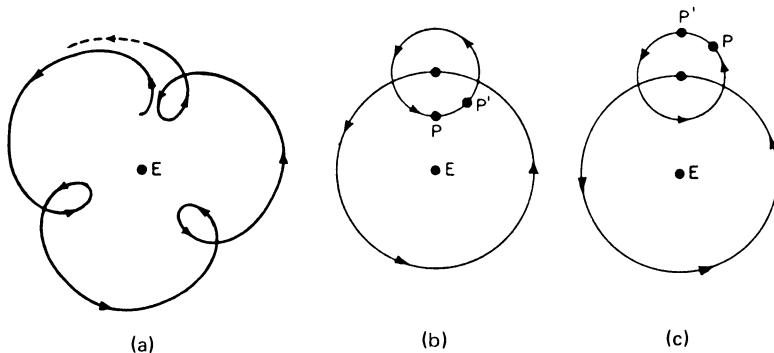
Bild 19c zeigt die Bewegung des Planeten auf einer der drei Schleifen, wie sie ein Beobachter von der Erde gegen die Sternenkugel sieht. Da sowohl Beobachter als auch Schleife in derselben Ebene liegen, nämlich der Ekliptik, kann der Beobachter die Schleife selbst nicht sehen. Er kann lediglich die Stellung des Planeten gegen den Hintergrund der Ekliptik feststellen. Während sich so der Planet in Bild 19b und 19c von 1 nach 2 bewegt, sieht ihn der Beobachter entlang der Ekliptik nach Osten ziehen. Sobald der Planet den

Punkt 2 erreicht, scheint er immer langsamer zu werden, in 2 kurz anzuhalten und dann in umgekehrter Richtung von 2 nach 3 zu wandern. Schließlich findet die westwärts gerichtete Reise des Planeten auf der Ekliptik ein Ende, und der Planet bewegt sich wieder nach Osten; er verläßt 3 und wandert nach 4.

Ein System aus einem Epizykel und einem Deferenten trägt daher einen Planeten im Mittel in einer Zeit um die Ekliptik, die mit dem Umlauf des Deferenten übereinstimmt. Die ostwärts gerichtete Bewegung wird jedoch unterbrochen und der Planet bewegt sich in regelmäßigen Abständen, die der Umdrehungszeit des Epizykel entsprechen, nach Westen. Die Umdrehungsgeschwindigkeiten von Epizykel und Deferent können den Beobachtungen so angepaßt werden, daß die Bewegung der Planeten im Bezug auf die Sterne der Beobachtung entspricht. Außerdem reproduziert dieses System einen weiteren wichtigen Zug der Himmelserscheinungen: Ein Planet kann nur dann rückwärts schreiten, wenn ihn seine Bewegung der Erde am nächsten bringt, und dies ist die Position, in der der Planet am hellsten erscheint. Die große Einfachheit und die neue Erklärung der variierenden Helligkeit der Planeten waren für den Sieg des neuen Systems über das ältere der homozentrischen Kugeln ausschlaggebend.

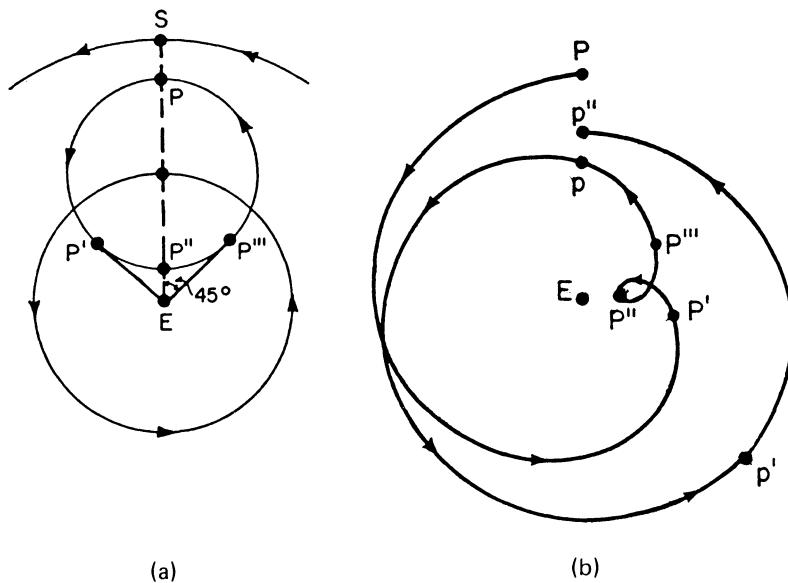
Das in Bild 19 beschriebene System zeigt allerdings eine spezielle Vereinfachung, die für die Planetenbewegung nicht charakteristisch ist. Wir ließen den Epizykel *genau* dreimal pro Umdrehung des Deferenten rotieren. Daher bringt der Epizykel nach jeder vollständigen Umdrehung des Deferenten den Planeten an dieselbe Stelle zurück, die er zu Beginn der Bewegung einnahm. Die Rückwärtsschleifen finden stets am selben Ort statt, und der Planet braucht stets dieselbe Zeit, um seine Reise entlang der Ekliptik zu vollenden. Die Beobachtungen der Planeten erfordern ein etwas anderes Epizykel-Deferenten-System. Zum Beispiel benötigt Merkur im Mittel ein Jahr für seine Reise um die Ekliptik, seine Rückwärtswanderungen finden jedoch alle 116 Tage statt. Daher muß der Epizykel des Merkur sich etwas öfter als 3 mal drehen, während sich der Deferent einmal dreht; der Epizykel vollendet drei Umdrehungen in 348 Tagen, der Deferent braucht jedoch ein Jahr.

Bild 20a zeigt den Weg eines Planeten, dessen Epizykel sich etwas mehr als dreimal pro Umdrehung des Deferenten dreht. Der Planet beginnt in der Mitte einer Rückwärtsschleife und vollendet seine dritte vollständige Schleife, bevor der Deferent seine erste Umdrehung vollendet; im Mittel zeigt der Planet daher etwas mehr als drei Rückwärtsschleifen auf seiner Bahn um die Ekliptik. Die Rückwärtsbewegung tritt bei aufeinanderfolgenden Umläufen an verschiedenen Stellen des Tierkreises ein, und dies gehört zu den beobachteten Charakteristiken der Planetenbewegung.



**Bild 20** Bewegung auf Grund von Epizykel und Deferent, wenn sich der Epizykel knapp mehr als dreimal pro Umdrehung des Deferenten dreht. (a) zeigt den Weg des Planeten auf einer einzigen vollständigen Reise gegenüber den Sternen. Diese erfordert mehr als eine Umdrehung des Deferenten, wie in (b) gezeigt, wo die Planetenposition zu Beginn ( $P$ ) und am Ende ( $P'$ ) einer vollständigen Umdrehung des Deferenten gezeichnet ist. (c) zeigt die Stellung des Planeten zu Beginn und Ende einer späteren Umdrehung des Planeten, die ihn mehr als einmal um die Ekliptik herumführt.

Bild 20b zeigt ein weiteres Merkmal der Bewegung, die von einem Epizykel hervorgerufen wird, dessen Umlaufsfrequenz kein ganzes Vielfaches derjenigen des Deferenten beträgt. Der Planet im Punkt  $P$  der Abbildung ist in seiner erdnächsten Stellung. Nach einer Umdrehung des Deferenten wird sich der Epizykel etwas mehr als dreimal gedreht haben, und der Planet wird an die Stelle  $P'$  gelangen, so daß er nun westlich vom Ausgangspunkt erscheint. Um daher den Planeten vollständig um die Ekliptik zu führen, muß sich der Deferent etwas mehr als einmal in östlicher Richtung herumdrehen; die entsprechende Reise durch die Sternzeichen erfordert daher im Mittel mehr Zeit. Andere Reisen wieder erfordern weniger: Nach einigen weiteren Umläufen des Deferenten, wird der Planet eine neue Reise vom Punkt  $P$  in Bild 20c beginnen. Eine weitere Umdrehung des Deferenten wird den Planeten nach  $P'$  bringen, einem Punkt östlich von  $P$ . Da diese Umdrehung des Deferenten den Planeten etwas mehr als eine Rundreise auf der Ekliptik machen läßt, ist diese Reise besonders schnell. Bild 20b und 20c zeigen annähernd die Extremwerte der Zeit, die für eine Reise entlang der Ekliptik gebraucht werden. Auf diese Weise ergibt sich eine einfache Beschreibung einer beobachteten Unregelmäßigkeit der Planetenbewegungen.



**Bild 21** (a) Ein System aus einem Epizykel und einem Deferenten für Venus; (b) die dadurch in der Ebene der Ekliptik beschriebene Bahn. In (a) beachte man folgende wichtige Konstruktionsmerkmale: Der Deferent dreht sich einmal pro Jahr, wenn sich sein Zentrum einmal auf einer Linie Erde-Sonne (ES) befindet hat, wird es immer darauf bleiben, und Venus wird niemals fern der Sonne sichtbar sein. Die Winkel  $SEP'$  und  $SEP''$  sind die größten Winkel, die zwischen Venus und Sonne auftreten können; sie müssen 45 Grad betragen, wodurch die relativen Größen von Epizykel und Deferent festgelegt sind. Der Epizykel dreht sich einmal in 584 Tagen; wenn Venus in  $P$  ihre Reise beginnt, wird sie nach 219 Tagen in  $P'$  (maximale Elongation als Abendstern) nach 3/8 Umdrehungen eintreffen, in  $P''$  nach 292 Tagen (1/2 Umdrehung), in  $P'''$  (maximale Elongation als Morgenstern) nach 365 Tagen (5/8 Umdrehungen).

Das zweite Diagramm zeigt die zuletzt beschriebene Bewegung in der Ekliptik.  $P$  ist wiederum der Ausgangspunkt;  $P'$  die Position der Venus nach 219 Tagen zur größten östlichen Elongation;  $P''$  die Position in der Mitte einer Schleifenbewegung nach 292 Tagen;  $P'''$  die Position zur größten westlichen Elongation nach 365 Tagen. Die erste Reise von Venus um die Ekliptik endet nach 406 Tagen in  $p$  und schließt einen Rücklauf und zwei maximale Elongationen ein. Ihre nächste Reise (von  $p$  über  $p'$  nach  $p''$ ) erfordert nur 295 Tage und enthält keine dieser auffälligen Erscheinungen. In  $p'$  ist Venus der Sonne nach einer vollständigen Umdrehung des Epizykels (584 Tage) wiederum am nächsten. Dies ist wenigstens qualitativ das Verhalten der Venus!

Um die Bewegungen aller Planeten zu beschreiben, muß für jeden ein eigenes Epizykel-Deferenten-System entworfen werden. Die Bewegung der Sonne und des Mondes können mit guter Genauigkeit durch einen Deferenten ohne Epizykel beschrieben werden, weil diese Planeten nicht rückwärts schreiten. Der Deferent der Sonne dreht sich einmal im Jahr, der des Mondes einmal in  $27\frac{1}{3}$  Tagen. Das Epizykel-Deferenten-System des Merkur entspricht dem oben diskutierten: Der Deferent dreht sich einmal im Jahr, der Epizykel einmal in 116 Tagen. Wir könnten ähnliche Systeme für die anderen Planeten entwerfen. Die meisten würden geschlungene Planetenbewegungen, wie die in Bild 20a, zeigen. Wenn der Epizykel im Vergleich zum Deferenten groß ist, wird die Schleife vergrößert; wenn der Epizykel sich rascher dreht, dann enthält eine Reise um die Ekliptik mehr Schleifen. Jupiter macht jedes mal etwa 11, Saturn ungefähr 28 solcher Schleifen. Kurz gesagt, dieses System von gekoppelten Kreisbewegungen kann durch die geeignete Wahl der relativen Größen und Geschwindigkeiten der Epizykel und der Deferenten so angepaßt werden, daß es die Vielfalt der Planetenbewegungen approximativ beschreibt. Eine entsprechende Kombination von Kreisen wird sogar eine gute qualitative Beschreibung der beträchtlichen Unregelmäßigkeiten der Venusbewegung (Bild 21) geben.

### *Ptolemäische Astronomie*

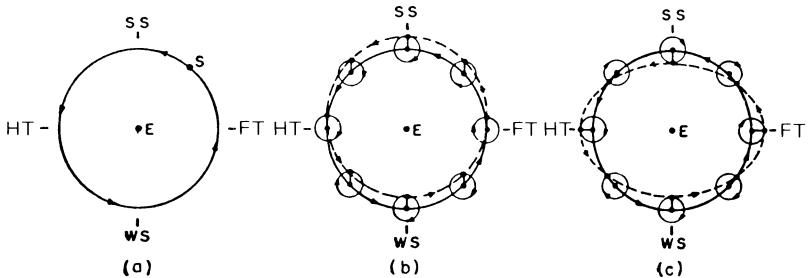
Die bisherige Diskussion hat die Anpassungsfähigkeit des Epizykel-Deferenten-Systems bei der Beschreibung und Vorhersage der Planetenbewegungen gezeigt. Doch dies ist nur der erste Schritt. Sobald das System den auffälligsten Unregelmäßigkeiten der Planetenbewegung – rückschreitende Bewegung und unregelmäßige Umlaufzeiten auf der Ekliptik – Rechnung tragen konnte, wurde es offenkundig, daß weitere, wenn auch sehr viel kleinere, Unregelmäßigkeiten untersucht werden mußten.

Genau wie das Zwei-Kugel-Modell einen präzisen Rahmen für die täglichen Bewegungen bot, und so genaue Untersuchungen der wichtigsten Planetenunregelmäßigkeiten erlaubte, so gestattete das Epizykel-Deferenten-System gerade durch die Beschreibung dieser Züge der Planetenbewegungen die Beobachtung von viel kleineren Unregelmäßigkeiten. Dies ist das erste Beispiel seiner Fruchtbarkeit. Sobald die Bewegung, die von einem Ein-Epizykel-Ein-Deferenten-System vorhergesagt wird, mit der beobachteten Bewegung irgend eines Planeten verglichen wird, zeigt sich, daß der Planet nicht immer genau an der Stelle der Ekliptik steht, an der er auf Grund des

Modells sein sollte. Bei genauer Beobachtung findet man, daß z. B. die Venus nicht immer ihre größte Entfernung von 45 Grad von der Sonne erreicht; die zeitlichen Abstände zwischen aufeinanderfolgenden rückläufigen Bewegungen eines Planeten sind nicht immer genau gleich lang, und keiner der Planeten, die Sonne ausgenommen, bleibt immer auf der Ekliptik. Daher war das System aus einem Epizykel und einem Deferenten nicht die endgültige Antwort auf das Problem der Planeten. Es war nur ein sehr erfolgversprechender Anfang, der zur fortgesetzten Weiterentwicklung anregte. Während der 17 Jahrhunderte, die Hipparch und Kopernikus trennen, versuchten alle bedeutenden Astronomen, kleinere Änderungen des Modells einzuführen, die das zugrundeliegende Modell den beobachtenden Planetenbewegungen anpassen sollten.

In der Antike wurde der bedeutendste Versuch in dieser Richtung etwa im Jahre 150 n. Chr. von Ptolemäus unternommen. Da sein Werk das seiner Vorgänger verdrängte und alle späteren Astronomen, Kopernikus eingeschlossen, ihre Untersuchungen darauf gründeten, bezeichnet man die Serie von Versuchen, für die Ptolemäus zum Vorbild wurde, als Ptolemäische Astronomie. Diese Bezeichnung bezieht sich auf die Methode und nicht auf eine der speziellen Lösungen. Diese Lösungen sind zu kompliziert, um hier betrachtet zu werden, obgleich besonders diejenige von Ptolemäus großes Interesse, sowohl in technischer, als auch in historischer Hinsicht verdient. Statt eines Überblicks über die Entwicklung der verschiedenen Ptolemäischen Planetensysteme werden wir hier nur die wichtigsten Modifikationen beschreiben, denen das Epizykel-Deferenten-System zwischen seiner Erfundung im dritten vorchristlichen Jahrhundert und seiner Überwindung durch die Nachfolger des Kopernikus unterworfen wurde.

Zwar wurden die Modifikationen des Systems vor allem in Hinblick auf die komplizierten Planetenbewegungen entworfen, doch beschreibt man die in der Antike und im Mittelalter vorgenommenen Modifikationen am besten anhand ihrer Anwendungen auf die offensichtlich einfacheren Bewegungen von Sonne und Mond. Die Sonne schreitet niemals rückwärts, so daß ihre Bewegung nicht einen größeren Epizykel der früher beschriebenen Art erfordert. Wenn man die Sonne aber auf einem Deferenten fixiert, der gleichförmig um die Erde rotiert, ergibt dies keine quantitativ genaue Beschreibung der Sonnenbewegung. Wie sich anhand der Daten über die Sonnenwenden und Tag- und Nachtgleichen ergibt, braucht die Sonne fast 6 Tage länger, um vom Frühlingsäquinoktium zur Herbst-Tag- und Nachtgleiche zu gelangen, als sie für den umgekehrten Weg benötigt. Die Bewegung der Sonne auf der Ekliptik ist also im Winter geringfügig schneller als im Sommer. Eine



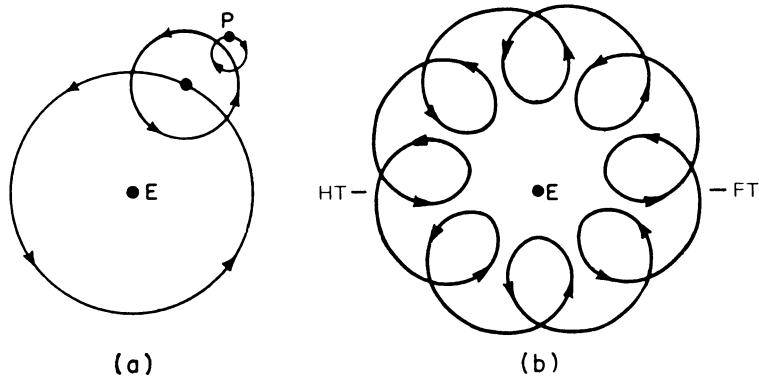
**Bild 22** Wirkungsweise eines kleineren Epizykel. In (a) braucht die Sonne auf einem geozentrischen Deferenten die gleiche Zeit von HT nach FT wie zurück. In (b) führt die Kombination des Deferenten mit einem kleineren Epizykel die Sonne auf der strichlierten Kurve, so daß sie von FT nach HT mehr Zeit braucht als zurück. Diagramm (c) zeigt die Kurve, wenn sich der Epizykel doppelt so schnell dreht wie in (b).

solche Bewegung kann nicht durch einen fixen Punkt auf einem gleichmäßig rotierenden Kreis mit der Erde im Mittelpunkt hervorgerufen werden. Überzeugen Sie sich davon anhand von Bild 22a, in dem die Erde im Mittelpunkt eines gleichförmig rotierenden Deferenten gezeichnet ist, und die Positionen der Frühlings- (FT) und Herbst-Tag- und -Nachtgleichen (HT) auf der Sternenkugel durch die Marken FT und HT angedeutet sind. Eine gleichförmige Drehung des Deferenten wird die Sonne S von FT nach HT in der gleichen Zeit bringen, die sie von HT nach FT braucht; dies entspricht nur näherungsweise der Beobachtung.

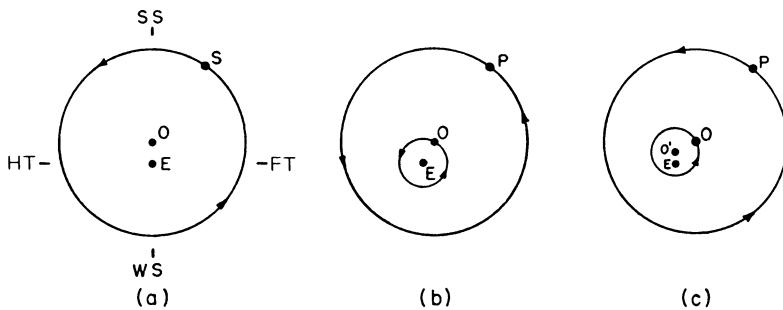
Stellen Sie sich jedoch vor, daß die Sonne statt dessen auf einen kleinen Epizykel gesetzt wird, der sich in westlicher Richtung einmal pro Umdrehung des Deferenten dreht. Acht Positionen der Sonne in einem solchen System sieht man in Bild 22b. Man versteht, daß die Sommerhälfte der Drehung des Deferenten die Sonne nicht den vollen Weg von FT nach HT trägt, und daß die Winterhälfte der Drehung die Sonne weiter bewegt als von HT nach FT. Daher besteht der Effekt des Epizykel in der Vergrößerung der Zeitdauer, die die Sonne zwischen FT und HT verbringt. Auf diese Weise vermindert sich die Zeit in der anderen Hälfte der Ekliptik zwischen HT und FT. Wenn der Radius des kleineren Epizykel  $\frac{3}{100}$  des Radius des Deferenten beträgt, dann unterscheiden sich die Zeitdauern, während denen sich die Sonne in der Winter- beziehungsweise der Sommerhälfte der Ekliptik aufhält, um die erforderlichen 6 Tage.

Der Epizykel, der in der vorangegangenen Diskussion verwendet wurde, um eine kleinere Unregelmäßigkeit der Sonnenbewegung zu korrigieren, ist vergleichsweise klein und führt auf keine rückläufige Bewegung. Daher ist seine Aufgabe völlig verschieden von den größeren Epizykeln, die wir im letzten Abschnitt betrachtet haben. Es wird sich als zweckmäßig erweisen, diese beiden Aufgaben zu trennen, wenn auch die ptolemäischen Astronomen dies nie taten. „Größere Epizykel“ sollen also zur Beschreibung rückläufiger Bewegung verwendet werden, während „kleinere Epizykel“ die zusätzlichen kleinen Unterschiede zwischen Theorie und Beobachtung ausgleichen sollen. Alle Versionen des ptolemäischen Systems, sowohl vor als auch nach Ptolemäus, hatten genau fünf größere Epizykeln, die von Kopernikus' Reform betroffen wurden. Im Gegensatz dazu hing die Zahl der kleineren Epizykeln von der Genauigkeit der verfügbaren Beobachtungen und der Genauigkeit der Vorhersagen, die man treffen wollte, ab. Die Anzahl von kleineren Epizykeln, die in den verschiedenen Versionen der ptolemäischen Astronomie verwendet wurden, variierte stark. Systeme, die bis zu einem Dutzend solcher Epizykel verwendeten, waren in der Antike und der Renaissance bekannt, denn durch eine geeignete Wahl von Größe und Geschwindigkeit der kleineren Epizykeln konnte fast jede kleine Unregelmäßigkeit erklärt werden. Das war der Grund, warum das kopernikanische System fast ebenso kompliziert war wie das ptolemäische. Obwohl seine Reform die größeren Epizykeln eliminierte, benötigte Kopernikus die kleineren Epizykeln genauso dringend wie seine Vorgänger.

Die Verwendung kleinerer Epizykeln beschränkt sich nicht auf Sonne und Mond. Ein kleinerer Epizykel kann einem größeren Epizykel hinzugefügt werden und zur Vorhersage komplizierterer Planetenbewegungen verwendet werden. In der Tat bildeten die Planetenbewegungen die Hauptanwendung der kleineren Epizykeln. Eine solche Anwendung, nämlich ein Epizykel auf einem Epizykel auf einem Deferenten, zeigt Bild 23a. Wenn sich der größere Epizykel achtmal in östlicher Richtung dreht, und der kleinere einmal in westlicher, während sich der Deferent einmal dreht, wird die Bahn, die der Planet innerhalb der Sternenkugel beschreibt, wie in Bild 23b aussehen. Sie hat acht rückläufige Schleifen, doch sind sie in der Hälfte der Ekliptik zwischen dem Frühlings- und dem Herbstäquinoktium dichter als in der anderen Hälfte. Wird die Umdrehungsgeschwindigkeit des kleineren Epizykels verdoppelt, so wird die Bahn des Planeten wie in Bild 22c gestreckter. Diese Zeichnungen geben einen Eindruck von den verschlungenen Bahnen, die die kleineren Epizykeln hervorrufen können.



**Bild 23** Ein Epizykel auf einem Epizykel auf einem Deferenten (a) und eine typische Bahn auf Grund dieser Kombination. Zur Vereinfachung wurde die Bahn geschlossen gezeichnet, was bei den Planeten nicht auftritt.



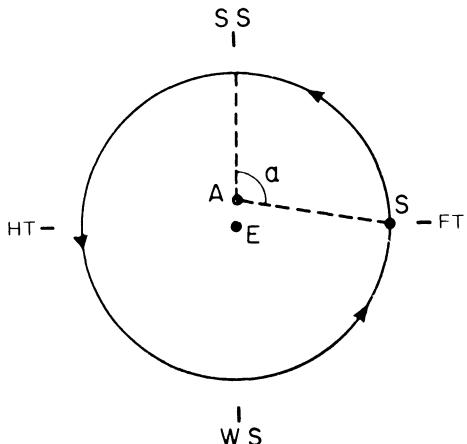
**Bild 24** Ein Exzenter (a), ein Exzenter auf einem Deferenten (b) und auf einem Exzenter (c)

Ein kleinerer Epizykel ist jedoch nicht das einzige Mittel, um kleinere Abweichungen des beobachteten Verhaltens der Planeten vom Ein-Epizykel-Ein-Deferenten-System zu korrigieren. Ein Blick auf Bild 22b zeigt, daß der Effekt, der dort durch einen kleineren Epizykel hervorgerufen wird, der sich entgegengesetzt zum Deferenten dreht, auch durch einen einzigen Deferenten erreicht werden kann, dessen Mittelpunkt gegenüber dem Erdmittelpunkt verschoben ist. Einen solchen verschobenen Kreis, der von den antiken Astronomen als exzentrisch bezeichnet wurde, zeigt Bild 24a. Wenn der Abstand

zwischen der Erde  $E$  und dem Mittelpunkt  $O$  des Exzentrers 3 % vom Radius des Exzentrers beträgt, wird dieser verschobene Kreis die sechs Tage erklären, die die Sonne zwischen dem Frühlings- und dem Herbstäquinoktium länger braucht. Diesen neuen Kunstgriff hat Ptolemäus bei seiner Beschreibung der Sonnenbewegung verwendet. Andere Werte für den Abstand  $EO$  können zusammen mit einem oder mehreren Epizykeln andere kleine Unregelmäßigkeiten der Planetenbewegungen erklären. Weitere Effekte kann man erklären, indem man den Mittelpunkt des Exzentrers auf einen kleinen Deferenten (Bild 24b) oder auf einen zweiten kleineren Exzenter (Bild 24c) verlegt. Diese beiden Hilfsmittel sind in geometrischer Hinsicht einem kleineren Epizykel auf einem Deferenten, beziehungsweise einem kleineren Epizykel auf einem Exzenter äquivalent. Die meisten Astronomen verwendeten diese kleinen Kreise und zogen sie den kleineren Epizykeln vor. Auf jeden Fall können weitere Epizykeln hinzugefügt werden, jeder beliebige von ihnen kann in verschiedene Raumrichtungen verdreht werden, so daß man auf diese Weise die Abweichungen der Planeten von der Ekliptik nach Norden und Süden erklären kann.

Ein weiteres Hilfsmittel, der Äquant, wurde in der Antike entwickelt, um den Vergleich der Theorie mit den genauen Beobachtungen zu erleichtern. Dieses Hilfsmittel ist von besonderer Bedeutung, da Kopernikus' ästhetische Bedenken dagegen (Kap. 5) ein wesentliches Motiv für seine Ablehnung des ptolemäischen Systems und seine Suche nach einer völlig neuen Rechen-Methode waren. Kopernikus verwendete Epizykeln und Exzenter, genau wie seine antiken Vorfürher, doch hat er keine Äquanten verwendet; er fühlte, daß ihr Fehlen in seinem System einer der größten Vorteile und einer der besten Gründe für seine Wahrheit wären.

Der Einfachheit halber beschreiben wir den Äquanten anhand der früher diskutierten unregelmäßigen Geschwindigkeit der Sonne (siehe Bild 25). Der Mittelpunkt des Sonnenderferenten fällt wie zuvor mit dem Mittelpunkt der Erde  $E$  zusammen, doch soll die Umdrehungsgeschwindigkeit des Deferenten nun nicht bezüglich seines geometrischen Mittelpunkts  $E$  gleichförmig sein, sondern bezüglich des sogenannten Äquanten  $A$ , der in diesem Fall in Richtung Sommersonnenwende verschoben ist. Das bedeutet, daß sich der Winkel  $\alpha$ , der von den Verbindungslien vom Äquanten  $A$  zur Sonne, beziehungsweise zur Sommersonnenwende gebildet wird, mit gleichförmiger Geschwindigkeit ändern soll. In Bild 25 wird die Sonne am Frühlingsäquinoktium  $FT$  gezeigt. Um die Herbsttag- und -nachtgleiche  $HT$  zu erreichen, muß sie einen Halbkreis vollenden, wodurch sich der Winkel  $\alpha$  um mehr als  $180^\circ$  ändern wird; um von  $HT$  nach  $FT$  zurückzukehren, muß die Sonne



**Bild 25**

Der Äquant. Die Sonne  $S$  bewegt sich auf dem geozentrischen Kreis mit unregelmäßiger Geschwindigkeit; der Winkel  $\alpha$  ändert sich gleichförmig mit der Zeit.

einen zweiten Halbkreis durchlaufen, wobei sich  $\alpha$  um weniger als  $180^\circ$  ändern wird. Daher dauert der erste Teil des Umlaufs länger als der zweite, und die Sonne bewegt sich mit unregelmäßiger Geschwindigkeit: am schnellsten ist sie in der Nähe der Wintersonnenwende, am langsamsten nahe der Sommersonnenwende.

Die Umdrehungsgeschwindigkeit eines Deferenten oder eines anderen Planetenkreises soll also nicht bezüglich seines eigenen geometrischen Mittelpunktes, sondern bezüglich eines Äquantenpunktes gleichförmig sein. Gesehen vom geometrischen Mittelpunkt seines Deferenten scheint sich der Planet mit unregelmäßiger Geschwindigkeit zu bewegen. Gerade deswegen fühlte jedoch Kopernikus, daß der Äquant kein zulässiges Hilfsmittel in der Astronomie war. Für ihn bildeten die offensichtlichen Unregelmäßigkeiten der Umlaufgeschwindigkeit Verletzungen der einheitlichen Kreissymmetrie, die das System aus Epizykeln, Deferenten und Exzentern glaubwürdig und annehmbar machte. Da der Äquant normalerweise auf Exzenter angewendet wurde, und ähnliche Hilfskonstruktionen gelegentlich den Epizykel ebenfalls mit unregelmäßiger Geschwindigkeit drehen ließen, kann man sich leicht vorstellen, was Kopernikus von diesem Zug der ptolemäischen Astronomie hielt.

Die oben beschriebenen mathematischen Hilfsmittel wurden weder gleichzeitig entwickelt noch stammen sie alle von Ptolemäus. Im dritten Jahrhundert vor Christus kannte Apollonius sowohl die größeren Epizykeln (Bild 19a) als auch die Exzenter mit bewegten Mittelpunkten (Bild 24b).

Im folgenden Jahrhundert fügte Hipparch die kleineren Epizykel und eine allgemeinere Theorie der Exzenter dem Arsenal astronomischer Hilfsmittel hinzu. Außerdem verband er diese Mittel, um zum ersten Mal den Unregelmäßigkeiten der Sonnen- und Mondbewegung quantitativ Rechnung zu tragen. Ptolemäus fügte den Äquanten hinzu, und während der 13 Jahrhunderte zwischen ihm und Kopernikus verwendeten zuerst mohammedanische, später europäische Astronomen weitere Kombinationen von Kreisen – den Epizykel auf einem Epizykel (Bild 23a) und den Exzenter auf einem Exzenter (Bild 24c) –, um weiteren Unregelmäßigkeiten der Planetenbewegungen Rechnung zu tragen. Doch Ptolemäus' Beitrag ist der wesentlichste. Diese Methode, das Problem der Planetenbewegung zu lösen, trägt zu Recht seinen Namen, denn Ptolemäus war es, der als erster damit nicht bloß die Bewegungen der Sonne und des Mondes, sondern die beobachteten Regelmäßigkeiten und Unregelmäßigkeiten der scheinbaren Bewegungen aller sieben Planeten erklärte. Sein *Almagest*, das Buch, das die größten Errungenschaften antiker Astronomie zusammenfaßt, war die erste systematische mathematische Abhandlung, die eine *vollständige, detaillierte* und *quantitative* Beschreibung aller Himmelsbewegungen gab. Seine Resultate waren so gut und die Methode so wirkungsvoll, daß nach Ptolemäus' Tod das Problem der Planeten eine neue Gestalt annahm. Um die Genauigkeit oder die Einfachheit der Planetentheorie von Ptolemäus zu verbessern, fügten seine Nachfolger Epizykel auf Epizykel und Exzenter auf Exzenter, indem sie die ungeheure Vielseitigkeit der ptolemäischen Methode ausnützten, doch selten oder nie suchten sie grundlegende Änderungen dieser Methode. Das Planetenproblem war zu einem Konstruktionsproblem geworden, das immer neue Kombinationen existierender Elemente erforderte. Welche spezielle Kombination von Dferenten, Exzentern, Äquanten und Epizykel würde die Planetenbewegungen am einfachsten und genauesten beschreiben?

Wir können die verschiedenen quantitativen Vorschläge zur Lösung dieses Problems nicht weiter verfolgen, da sie in mathematischer Hinsicht sehr kompliziert sind. Ein Großteil des *Almagest* besteht aus mathematischen Tabellen, Diagrammen, Formeln und Beweisen, aus langen Berechnungen und aus zahllosen Beobachtungen. Doch die Probleme, die Kopernikus zur Suche nach einer neuen Lösung des Planetenproblems veranlaßten, und die Vorteile, die er für sein neues System in Anspruch nahm, fußen alle auf dem schwer verständlichen Teil der quantitativen Theorie. Kopernikus griff die Vorstellung vom Zwei-Kugel-Universum nicht an, obwohl sein Werk dieses Weltbild am Ende vernichtete, und er gab auch die Epizykel und Exzenter nicht auf, obwohl auch diese von seinen Nachfolgern verworfen wurden. Was Ko-

pernikus angriff, und was die Revolution in der Astronomie auslöste, waren mathematische Details, wie die Äquanten, die in den komplizierten mathematischen Systemen von Ptolemäus und seinen Nachfolgern enthalten waren. Der Streit zwischen Kopernikus und den antiken Astronomen betraf also zunächst technische Details!

### *Wissenschaftlicher Glaube*

Bis weit in die Neuzeit kannte man in der Geschichte der Naturwissenschaften keine andere Theorie, die so weit wie die Epizykel-Deferenten-Technik ausgearbeitet wurde. In ihrer höchst entwickelten Form war das System kombinierter Kreise eine erstaunliche Errungenschaft. *Und doch hat es nie völlig gestimmt.* Die ursprüngliche Idee des Apollonius löste das Hauptproblem der Planeten – die rückläufige Bewegung, die Veränderlichkeit der Helligkeit, die verschiedenen Umlaufdauern – und dies geschah in einfacher Weise. Doch machte sie weitere sekundäre Unregelmäßigkeiten offenkundig. Einige von ihnen konnten durch das kompliziertere System kombinierter Kreise, das von Hipparch entwickelt worden war, erklärt werden, doch immer noch stimmte die Theorie mit der Beobachtung nicht völlig überein. Sogar Ptolemäus' komplizierte Kombination von Deferenten, Exzentren, Epizykel und Äquanten brachte keine völlige Übereinstimmung mit der Beobachtung und sein System war bei weitem nicht die komplizierteste Version. Seine zahlreichen Nachfolger, zuerst in der moslemischen Welt, dann im mittelalterlichen Europa, griffen das Problem dort auf, wo er stehen geblieben war, und suchten vergeblich nach der Lösung, die ihm nicht gelungen war. Kopernikus kämpfte immer noch mit demselben Problem.

Neben dem *Almagest* gab es noch viele Varianten des ptolemäischen Systems und einige erreichten beträchtliche Zuverlässigkeit bei der Vorhersage der Planetenörter. Doch wurde Genauigkeit stets um den Preis von Kompliziertheit erreicht, durch Hinzufügen neuer kleiner Epizykel – und die erhöhte Kompliziertheit führte bloß auf eine bessere Näherung, nicht auf eine endgültige Bestimmung der Planetenbewegungen. Keine Version hat jemals völlig mit weiteren verbesserten Beobachtungen übereingestimmt. Dieses Versagen – zusammen mit dem totalen Mangel an gedanklicher Ökonomie –, die frühere Versionen des Zwei-Kugel-Universums so überzeugend erscheinen ließ, führte schließlich zur kopernikanischen Revolution.

Doch dauerte es lange, bis es so weit war. Fast 1800 Jahre lang, von der Zeit des Apollonius und des Hipparch bis zu der Geburt des Kopernikus,

stand die Vorstellung der kombinierten Kreisbahnen zusammen mit dem geozentrischen Universum im Mittelpunkt jedes Lösungsversuches. Trotz seiner, zwar geringen, aber doch erkannten Ungenauigkeiten und seines auffallenden Mangels an Ökonomie hatte das ptolemäische System eine sehr lange Lebensdauer, was uns auf zwei Fragen führt: Wie konnte das Zwei-Kugel-Universum und die damit verknüpfte Planetentheorie der Epizykel und Deferenten so fest in der Vorstellung der Astronomen verankert sein? Und wie kam es, daß sich der psychologische Druck dieses traditionellen Zugangs zu einem alten Problem schließlich doch lockerte? Um dieselben Fragen noch direkter zu stellen: Warum kam die kopernikanische Revolution so spät? Und wie konnte sie überhaupt zustande kommen?

Diese Fragen über die geschichtliche Entwicklung spezieller Ideen werden wir noch vom historischen Gesichtspunkt eingehend untersuchen. Doch gleichzeitig betreffen sie ganz allgemein das Wesen von Weltbildern und den Prozeß, durch den ein Weltbild ein anderes ersetzt. Es ist daher angebracht, kurz zu den früher eingeführten abstrakten logischen und psychologischen Kategorien zurückzukehren. Wir haben die Aufgaben eines Weltbildes bereits untersucht; jetzt fragen wir, wie ein funktionierendes Modell, wie das frühe Zwei-Kugel-Universum verdrängt werden kann. Wir wollen die Logik des Ablaufes zuerst betrachten.

Es gibt stets viele alternative Vorstellungen, die imstande sind, einer beliebigen *vorgegebenen* Liste von Beobachtungen zu entsprechen, doch sie unterscheiden sich in ihren Vorhersagen über Phänomene, die nicht in der Liste enthalten sind. Sowohl das kopernikanische, als auch das Newtonsche System werden den ohne Instrument gemachten Beobachtungen der Gestirne und der Sonne genau so gut Rechnung tragen wie das Zwei-Kugel-System; das System des Heraklid würde genauso entsprechen wie das von Tycho Brahe, dem Nachfolger des Kopernikus. Man kann sich unendlich viele andere Alternativen daneben vorstellen, sie stimmen jedoch nur bezüglich der Beobachtungen überein, die bereits ausgeführt wurden. Andererseits geben sie bei weiteren möglichen Beobachtungen keineswegs identische Voraussagen. Das kopernikanische System unterscheidet sich z. B. vom Zwei-Kugel-Universum, indem es eine scheinbare jährliche Bewegung der Sterne vorhersagt und auf diese Weise einen wesentlich größeren Durchmesser der Sternkugel fordert, und indem es – allerdings nicht für Kopernikus – eine neue Lösung des Planeten-Problems nahelegt. Wegen solcher Unterschiede muß ein Wissenschaftler an sein System *glauben*, bevor er sich darauf als Leitlinie für fruchtbare Untersuchungen des *Unbekannten* verlassen wird. Nur eine der verschiedenen Alternativen kann *denkbarerweise* die Wirklichkeit darstellen. Der

Wissenschaftler, der neue Gebiete erforscht, muß darauf vertrauen, daß er das richtige System oder das, das dem richtigen am nächsten kommt, gewählt hat. Doch dafür zahlt er einen Preis: Er kann sich irren. Eine einzige Beobachtung, die mit seiner Theorie unverträglich ist, beweist, daß er die ganze Zeit die falsche Theorie verwendet hat. Der Glaube daran muß aufgegeben werden, und eine neue Theorie wird anerkannt, worauf sich dieser Prozeß wiederholt. Diese Skizze trifft zwar die Grundidee jeder wissenschaftlichen Revolution, da ihr Grund schließlich in der Unverträglichkeit von Theorie und Beobachtung zu suchen ist. Der historische Revolutionsprozeß läuft aber niemals so einfach ab, wie die logische Skizze anzudeuten scheint. Denn unsere Überlegungen haben ja bereits gezeigt, daß eine Beobachtung mit einem Weltbild niemals *absolut* unverträglich ist.

Für Kopernikus war das Verhalten der Planeten mit dem Zwei-Kugel-Modell des Universums nicht im Einklang. Er fühlte, daß seine Vorgänger durch die Hinzufügung von immer mehr Kreisen das Ptolemäische System mit Gewalt in Einklang mit den Beobachtungen brachten. Er sah in der Notwendigkeit solcher Gewaltakte einen klaren Hinweis darauf, daß ein völlig neuer Versuch erforderlich war. Doch seine Vorgänger, denen genau dieselben Instrumente und Beobachtungen zur Verfügung standen, hatten dieselbe Situation anders eingeschätzt. Was Kopernikus als Gewaltakt erschien, war für sie ein natürlicher Prozeß der Erweiterung und Anpassung, genau wie er früher unternommen worden war, um die Bewegung der Sonne im Zwei-Kugel-Universum, das ursprünglich nur zur Beschreibung der Beziehung zwischen Erde und den Sternen diente, unterzubringen. Die Vorläufer des Kopernikus hatten wenig Zweifel, daß das System schließlich funktionieren würde.

Obwohl Wissenschaftler Weltbilder verwerfen, wenn sie in unlösbarem Konflikt mit der Beobachtung zu sein scheinen, so verschleiert doch die Betonung *logischer* Unverträglichkeit ein wesentliches Problem. Wodurch wird eine anscheinend vorübergehende Diskrepanz zum unausweichlichen Konflikt? Wie kann eine Vorstellung, die eine Generation bewundernd als subtil und anpassungsfähig betrachtet hat, für eine spätere Generation obskur, mehrdeutig und unsinnig werden? Warum klammern sich Wissenschaftler trotz der Diskrepanzen an eine Theorie, die sie später aufgeben? Diese Fragen betreffen die Grundlagen des Glaubens an Wissenschaft. Mit ihnen werden wir uns in den nächsten zwei Kapiteln beschäftigen, die den Rahmen für die eigentliche kopernikanische Revolution abstecken.

Unser erstes Problem ist jedoch die Analyse des Einflusses, den die antike Tradition astronomischer Forschung auf das Denken der Menschen

ausgeübt hat. Wie konnte diese Tradition zu Denkgewohnheiten führen, die Begriffe und Vorstellungen in der Astronomie einschränken und manche Neuerungen schwer verständlich und noch schwerer akzeptabel machen? Wir haben uns bereits mit den rein astronomischen Aspekten dieses Problems beschäftigt. Sowohl das Zwei-Kugel-Universum, als auch das damit verknüpfte Modell der Epizykel und Deferenten war ursprünglich höchst ökonomisch und fruchtbar. Erste Erfolge schienen die grundlegende Richtigkeit der Methode zu garantieren, und geringfügige Modifikationen schienen auszureichen, um die mathematischen Vorhersagen mit den Beobachtungen in Einklang zu bringen. Eine Überzeugung dieser Art ist schwer abzubauen, besonders, wenn sie sich in der Praxis von Generationen von Astronomen verfestigt hat, die sie durch ihre Lehre und ihre Schriften an ihre Nachfolger weitergeben. Dies ist der Leithammeleffekt im Bereich der wissenschaftlichen Ideen.

Dieser Effekt erklärt jedoch die Wirksamkeit astronomischer Tradition nicht völlig. Beim Versuch einer vollständigen Erklärung werden wir uns zeitweilig ganz von astronomischen Problemen entfernen. Das Zwei-Kugel-Universum bot einen fruchtbaren Ansatz zur Lösung von Problemen sowohl innerhalb als auch außerhalb der Astronomie. Zum Ende des vierten Jahrhunderts vor Christus wurde es nicht nur auf Planetenprobleme angewandt, sondern auch auf irdische Probleme, wie den Fall eines Blattes und den Flug eines Pfeiles, auch auf religiöse Probleme, wie die Beziehung des Menschen zu seinen Göttern. Wenn das Zwei-Kugel-Universum, insbesondere die Vorstellung einer im Mittelpunkt ruhenden Erde, damals der unzweifelhafte Ausgangspunkt der astronomischen Forschung war, so deshalb, weil der Astronom das Zwei-Kugel-Universum nicht mehr aufgeben konnte, ohne Physik und Religion gleichzeitig in Unordnung zu bringen. Grundlegende astronomische Konzepte waren zu Fäden in einem wesentlich größeren Gedanken gewebe geworden, und die nichtastronomischen Fäden wurden für das Denken der Astronomen ebenso wichtig wie die astronomischen. Die Geschichte der kopernikanischen Wende ist daher nicht bloß eine Geschichte von Astronomen und Himmelskörpern.

### 3 Das Zwei-Kugel-Universum im aristotelischen Denken

#### *Das aristotelische Universum*

Um das antike Weltbild zu studieren, in dem astronomische und nicht-astronomische Begriffe zu einem einzigen, zusammenhängenden Gedanken-gewebe verwoben waren, müssen wir zur Mitte des vierten vorchristlichen Jahrhunderts zurückkehren. Zu jener Zeit hatte der technisch hochentwickelte Lösungsversuch des Planetenproblems noch kaum begonnen, jedoch hatte das Zwei-Kugel-Universum wesentliche nichtastronomische Funktionen übernommen. Viele davon kann man in den umfangreichen Werken des großen griechischen Philosophen und Wissenschaftlers Aristoteles (384–322 v. Chr.) finden, dessen einflußreiche Ansichten noch im Mittelalter und zum Teil auch in der Renaissance den Ausgangspunkt kosmologischer Überlegungen bildeten.

Die Schriften des Aristoteles, die uns nur in unvollständiger und stark bearbeiteter Form erreicht haben, handeln von den wissenschaftlichen Fächern, die jetzt Physik, Chemie, Astronomie, Biologie und Medizin genannt werden, und von solchen außerwissenschaftlichen Gebieten wie Logik, Metaphysik, Politik, Rhetorik und Literaturkritik. Zu allen von ihnen, besonders zur Biologie, Logik und zur Metaphysik, trug er neue Ideen bei, die ganz eindeutig seine eigenen waren, doch noch bedeutender als seine zahlreichen eigenständigen Beiträge war die von ihm durchgeführte Ordnung alles Wissens zu einem systematischen und zusammenhängenden Ganzen. Er war dabei nicht immer erfolgreich. Man kann leicht Unstimmigkeiten und gelegentliche Widersprüche in seinen Schriften finden. Doch findet man in seinen Ansichten über den Menschen und das Universum eine zugrundeliegende Einheit, die seither niemals wieder in einem zusammenfassenden Werk von vergleichbarem Horizont erreicht wurde. Dies ist einer der Gründe, warum seine Schriften einen solch ungeheuren Einfluß hatten. Den anderen werden wir am Ende dieses Kapitels kennenlernen. An die folgende Einführung in das aristotelische Universum schließt eine detaillierte Diskussion der zahlreichen Funktionen an, die die irdische und die Himmelskugel im aristotelischen Denken hatten.

Für Aristoteles war das gesamte Universum in der Sternenkugel eingeschlossen. In jedem Punkt innerhalb der Kugel existierte Materie, ein Vakuum oder leerer Raum durften im aristotelischen Universum nicht auftreten. Außerhalb der Sternenkugel war nichts, keine Materie, kein Raum, überhaupt nichts. Bei Aristoteles sind Raum und Materie verknüpft, sie sind zwei Aspekte derselben Erscheinung: die Vorstellung eines Vakuums ist absurd. Auf diese Weise erklärte er die endliche Größe und die Einzigartigkeit des Universums. Raum und Materie müssen zusammen ein Ende finden: Man braucht keine Mauer zu bauen, um das Universum zu begrenzen und sich dann zu fragen, was die Mauer begrenzt. Aristoteles formuliert es so in seinem Buch *Über die Himmel*:

Aus dem Gesagten ist demnach klar, daß die Masse keines Körpers außerhalb des Himmels sein oder dorthin gelangen kann. Folglich besteht die Welt aus dem gesamten ihr zukommenden Stoff. ... Daher gibt es weder jetzt noch je mehrere Himmel noch gab es sie, sondern dieser Himmel ist allein der einzige und vollendete.

Zugleich erkennt man, daß auch Raum und Leeres und Zeit außerhalb des Himmels nicht sein kann. Denn in jedem Raum muß auch ein Körper sein können, unter ‚leer‘ versteht man etwas, wo kein Körper ist, aber einer sein könnte. ...<sup>1</sup>

Wie das Universum Platos, das in Kapitel 1 kurz beschrieben wurde, ist das Aristotelische Universum in sich abgeschlossen und vollständig. Aristoteles jedoch differenziert das Innere des Universums wesentlich weitgehender als Plato. Der größte Teil des Inneren wird von einem einzigen Element, dem Äther, erfüllt, der sich in konzentrischen Schalen zu einer gigantischen Hohlkugel verdichtet, deren äußere Oberfläche die Sternenkugel, und deren innere Oberfläche jene Sphäre ist, die den Mond als niedrigsten Planeten trägt. Äther ist in den Aristotelischen Schriften ein kristalliner fester Körper, obwohl seine Festigkeit häufig in Frage gestellt wurde. Im Gegensatz zu den auf der Erde bekannten Substanzen ist er rein und unwandelbar, transparent und gewichtlos. Aus ihm bestehen die Planeten und die Sterne genau wie die verschachtelten konzentrischen Himmelkugeln, deren Drehungen für die Bewegungen der Himmelskörper sorgen.

Von Aristoteles bis zu Kopernikus' Zeit gab es verschiedenste Ansichten über die Form und die physikalische Realität der Himmelkugeln, die die Gestirne bewegten. Aristoteles hatte die am weitesten ausgearbeiteten Vorstellungen darüber. Er glaubte, daß es genau 55 reale kristalline Schalen aus

Äther gibt, die in einem physikalischen Mechanismus eingebettet sind, der dem mathematischen System der konzentrischen Kugeln nach Eudoxus und Callippus entspricht. Aristoteles verdoppelte die Anzahl der Kugeln beinahe, die von früheren Mathematikern verwendet wurden, doch waren die von ihm hinzugefügten Kugeln in mathematischer Hinsicht überflüssig. Sie sollten die mechanischen Verbindungen herstellen, die notwendig waren, um den Satz konzentrischer Schalen in Bewegung zu halten. Sie führten diese Anordnung von Kugeln in eine gigantische Himmelsuhr über, die von der Sternenkugel angetrieben wurde. Da das Universum angefüllt war, waren alle Kugeln miteinander in Kontakt und die Reibung von Kugel zu Kugel gab dem ganzen System den Antrieb. Die Himmelskugel trieb ihren nächsten inneren Nachbarn an, die äußerste der sieben konzentrischen Schalen, die für die Bewegung des Saturn sorgte. Jene Schale trieb ihren nächst inneren Nachbarn an und so ging es weiter, bis die Bewegung schließlich auf die innerste Schale übertragen wurde, auf der der Mond saß. Dies war die innerste der Ätherschalen, die untere Begrenzung der Himmelsregion.

Die Epizykel und Deferenten, die in der mathematischen Astronomie die konzentrischen Kugeln verdrängten, paßten nicht sehr gut in dieses Bild der kristallinen Kugeln. Daher wurde selten der Versuch unternommen, eine *mechanische* Erklärung der Epizykel-Bewegungen zu finden, sogar die Existenz der kristallinen Kugeln wurde gelegentlich in Frage gestellt. Zum Beispiel wird aus dem *Almagest* nicht klar, ob Ptolemäus an sie überhaupt geglaubt hat. Doch in der Zeit zwischen Ptolemäus und Kopernikus scheinen die meisten gebildeten Leute – die Astronomen eingeschlossen – zumindest an eine vereinfachte Version der aristotelischen Kugeln geglaubt zu haben. Sie gaben den Sternen eine Kugelschale, ebenso jedem Planeten eine Schale. Jede Planetenschale sollte hinreichend dick sein, um den Planeten bei seiner größten Erdnähe auf der inneren Oberfläche, bei seiner größten Erdferne auf der äußeren Oberfläche zu enthalten. Diese acht Kugeln waren eine in die andere geschachtelt und erfüllten die gesamte Himmelsregion. Die Bewegung der Sternenkugel gab eine genaue Erklärung der täglichen Bewegungen der Sterne. Die stetige Drehung der sieben Planetenkugeln erklärte die mittlere Bewegung der Planeten. Menschen, die nichts von den Unregelmäßigkeiten der Planetenbewegungen wußten, oder sich darum nicht kümmerten, konnten diese dicken Kugelschalen wörtlich nehmen. Die Astronomen hingegen benützten Epizykel, Deferenten, Äquanten und Exzenter zur Beschreibung der Bewegung eines jeden Planeten innerhalb seiner eigenen dicken Kugelschale.

Für sie waren die Kugeln zumindest eine Hilfsvorstellung, doch kümmerten sie sich kaum um eine physikalische Erklärung der Bewegung der Planeten innerhalb ihrer Sphären.

Fünf Jahrhunderte nach Aristoteles' Tod brachte diese Vorstellung der dicken, verschachtelten Kugelschalen einen weiteren wichtigen technischen Zug in die Astronomie der nachptolemaischen Zeit. Sie erlaubte den Astronomen, die tatsächliche Größe der einzelnen Planetensphären und damit die Größe des ganzen Universums zu berechnen. Beobachtungen einer Planetenbewegung gegenüber den Sternen gibt den Astronomen nur die *relative Größe* seiner Epizykel und Deferenten oder den *relativen Betrag* ihrer Exzentrizität. Doch wenn jede sphärische Schale hinreichend dick sein muß, um den Planeten bei Erdnähe und Erdferne zu enthalten, dann reicht die Kenntnis der relativen Abmessungen von Epizykel, Deferent, usw. aus, um das Verhältnis der inneren und äußeren Durchmesser jeder Schale zu berechnen. Wenn ferner die Schalen ineinander enthalten sind, so daß sie den gesamten Himmelsraum ausfüllen, so muß der äußere Durchmesser der einen dem inneren Durchmesser der nächsten gleich sein, und das Verhältnis der Abstände zu allen Schalenbegrenzungen kann berechnet werden. Schließlich können die relativen Abmessungen in absolute Werte übergeführt werden, indem man den Abstand zur Mondsphäre benutzt, der während des zweiten vorchristlichen Jahrhunderts mit der Methode gefunden wurde, die wir im technischen Anhang diskutieren.

Entsprechende Abschätzungen der Größe der raumfüllenden Kugelschalen erscheinen in der astronomischen Literatur erst nach dem Tod des Ptolemäus, vermutlich weil die ersten Astronomen an der Realität solcher Kugeln gezweifelt haben. Doch nach dem fünften Jahrhundert nach Christus wurden derartige Abschätzungen immer häufiger und gaben der Kosmologie den Anschein von Realität. Einen weithin bekannten Satz kosmologischer Dimensionen verdanken wir dem arabischen Astronomen Al Fargani, der im 9. Jahrhundert lebte. Nach seiner Berechnung war die äußere Oberfläche der Mondsphäre  $64 \frac{1}{6}$  Erdradien vom Mittelpunkt des Universums entfernt, die äußere Oberfläche der Merkursphäre war 167 Erdradien vom Mittelpunkt, die der Venus 1120 Erdradien, die der Sonne 1220, des Mars 8867, des Jupiter 14 405 und des Saturn 20 110. Da Al Fargani den Erdradius zu 3250 römischen Meilen angab, verlegte er die Sternenkugel in eine Entfernung von mehr als 75 Millionen Meilen vom Erdmittelpunkt. Dies ist eine immense Distanz, doch ist es fast 2 Millionen mal kleiner als der Abstand zum nächsten Fixstern.

Ein Blick auf die Messungen des Al Fargani zeigt, daß die irdische Region, der Raum unterhalb der Unterseite der Mondsphäre bloß ein winziger Teil des Universums ist. Der Großteil des Raumes ist Himmelsraum. Der Großteil der Materie ist der Äther, aus dem die kristallinen Sphären bestehen, und doch macht die geringe Größe der sublunaren Region diese nicht unwichtig. Sogar in der aristotelischen Version und in größerem Ausmaß in der mittelalterlichen christlichen Fassung der aristotelischen Kosmologie ist die winzige zentrale Region des Universums der Kern, für den der Rest geschaffen wurde. Es ist die Heimstätte des Menschen, und sein Wesen ist völlig von dem der darüberliegenden Himmelsregion verschieden.

Die sublunare Region ist nicht von einem Element erfüllt, sondern von vier (oder – nach späteren Autoren – einer anderen kleinen Zahl von Elementen). Die Verteilung dieser vier irdischen Elemente ist zwar in der Theorie einfach, tatsächlich äußerst kompliziert. Entsprechend den aristotelischen Bewegungsgesetzen, die wir noch diskutieren werden, sollten sich die Elemente bei Fehlen jeglicher äußerer Einwirkungen in vier konzentrische Schalen ähnlich den Ätherschalen des fünften Elements, das sie umgibt, anordnen. Das schwere Element Erde würde natürlich eine Kugel im geometrischen Mittelpunkt des Universums bilden. Wasser, das zwar auch schwer, jedoch nicht so schwer wie die Erde ist, würde sich in einer Kugelschale um die zentrale Erdregion ansammeln. Das leichteste Element Feuer würde von selbst empor steigen und unmittelbar unter der Mondsphäre ihre eigene Schale bilden; Luft, ebenfalls ein leichtes Element, würde den Aufbau vollenden und die verbleibende Schale zwischen Wasser und Feuer füllen. Hätten sie diese Positionen erreicht, würden die Elemente an ihrem Platz in ihrer völligen elementaren Reinheit bleiben. Die sich selbst überlassene sublunare Region wäre ohne Störung durch äußere Kräfte eine statische Region, sie würde die Himmelkugeln in ihrer Struktur widerspiegeln.

Doch ist die irdische Region niemals ungestört. Sie wird von der bewegten Sphäre des Mondes begrenzt, und die Bewegung dieser Begrenzung überträgt sich beständig auf die Schichten des Feuers darunter; sie führt zu Wirbeln, die die Elemente in der gesamten sublunaren Welt durcheinander mischen. Daher können die Elemente niemals in ihrer reinen Form beobachtet werden. Die beständigen äußeren Einflüsse halten sie in verschiedenen und veränderlichen Proportionen gemischt. Die Struktur der Schalen ist nur mehr eine Näherung. Das entsprechende Element überwiegt in der entsprechenden Region. Doch jedes Element enthält zumindest Spuren der anderen; diese ändern seinen Charakter und führen je nach Mischungsgrad zu all den verschiedenen Substanzen, die auf der Erde gefunden werden. Die Bewe-

gungen des Himmels sind also für alle Veränderungen und für nahezu alle Vielfalt, die man in der sublunaren Welt beobachtet, verantwortlich.

Der Grund für das Beharrungsvermögen der vorkopernikanischen Astronomie ist daher im aristotelischen Universum zu suchen, dessen umfassende Bedeutung wir bisher nur angedeutet haben. Warum hielten die Astronomen angesichts der Schwierigkeiten des ptolemäischen Systems solange an der Ansicht fest, daß die Erde der feste Mittelpunkt des Universums und zumindest der mittleren Planetenbahnen sein müsse? Eine bekannte Antwort auf diese Frage lautet: Aristoteles, der größte Philosoph und Wissenschaftler der Antike, hatte die Erde als ruhend erklärt, und sein Wort wurde von seinen Nachfolgern ungeheuer ernst genommen. Für viele von ihnen wurde er zu dem Philosophen schlechthin, zur obersten Autorität in allen Fragen der Wissenschaft und Kosmologie.

Doch die Autorität des Aristoteles ist trotz ihrer Bedeutung nur der Anfang einer Antwort, da Aristoteles sehr viele Dinge gesagt hat, die die Philosophen und Wissenschaftler später ohne Zögern ablehnten. In der Antike gab es wissenschaftliche und kosmologische Schulen, die offensichtlich von der aristotelischen Meinung wenig beeinflußt waren. Selbst im späten Mittelalter, als Aristoteles die dominierende Autorität in der Wissenschaft wurde, zögerten die Gelehrten nicht, an vielen isolierten Teilen seiner Lehre drastische Änderungen vorzunehmen. Die Liste dieser Änderungen ist nahezu unerschöpflich, einige davon sind bei weitem nicht trivial. Wie wir im nächsten Kapitel sehen werden, spielen einige der von seinen Nachfolgern gegen Aristoteles gerichteten Kritiken eine direkte und kausale Rolle in der kopernikanischen Revolution.

Und doch hat kein späterer Anhänger des Aristoteles angenommen, daß die Erde ein Planet wäre oder daß sie nicht im Zentrum des Universums ruhe. Diese neue Ansicht mußte für einen Aristoteliker besonders schwierig zu verstehen oder zu akzeptieren sein, weil die Vorstellung einer einzigen, im Mittelpunkt stehenden Erde mit so vielen anderen wichtigen Begriffen innerhalb des aristotelischen Gedankengebäudes verknüpft war. Ein aristotelisches Universum kann genauso gut mit drei oder fünf irdischen Elementen wie mit vier aufgebaut werden, doch kann es nicht – und konnte es auch nicht – die Modifikation überleben, die die Erde zu einem Planeten machte. Kopernikus versuchte ein im wesentlichen aristotelisches Universum zusammen mit einer bewegten Erde zu entwickeln, doch er schaffte es nicht. Seine Nachfolger sahen die vollen Konsequenzen seiner neuen Idee, und das gesamte aristotelische Gebäude fiel in sich zusammen. Die Vorstellung von der im Mittelpunkt ruhenden Erde war einer der wenigen grundlegenden Begriffe in einem eng zusammenhängenden und widerspruchsfreien Weltbild.

## *Die aristotelischen Bewegungsgesetze*

Ein erstes Beispiel für die Vereinigung von astronomischem und nicht-astronomischem Denken bietet die aristotelische Erklärung der irdischen Bewegung. Wie wir bereits gesehen haben, glaubte Aristoteles, daß jedes der irdischen Elemente ohne äußere Anstöße aus der Atmosphäre in dem ihm angemessenen Teil der irdischen Region bleiben würde. Der natürliche Ort der Erde ist der Mittelpunkt, der des Feuers an der Peripherie. Die Elemente und die aus ihnen zusammengesetzten Körper werden beständig aus ihren natürlichen Orten herausgerissen. Dies erfordert jedoch die Anwendung einer Kraft. Ein Element leistet einer Ortsveränderung Widerstand und versucht stets auf kürzestem Weg an seinen natürlichen Ort zurückzukehren. Nehmen Sie doch einen Stein oder ein anderes erdhaftes Material und fühlen Sie, wie es nach unten zieht und versucht, seinen natürlichen Platz im Mittelpunkt des Universums wieder zu erreichen. Oder beobachten Sie, wie die Flammen eines Feuers in einer klaren Nacht nach oben schlagen, während sie versuchen, ihren natürlichen Platz an der Peripherie der irdischen Region zu erreichen.

Wir werden später die psychologischen Quellen und die Bedeutung dieser Erklärung der irdischen Bewegungen untersuchen. Doch sollte man zunächst zur Kenntnis nehmen, welche Unterstützung diese Lehren, die aus der irdischen Physik gezogen wurden, dem geozentrischen Universum des Astronomen bieten. In einer wichtigen Passage seines Werkes *Über die Himmel* leitet Aristoteles die Kugelgestalt, die Unbewegtheit und die zentrale Position der Erde daraus ab. Wir haben sie früher aus astronomischen Argumenten gewonnen gesehen, doch jetzt spielen astronomische Überlegungen eine zweitrangige Rolle.

Weiter: die natürliche Bahn ihrer Teile und der ganzen Erde ist zur Mitte des Alls hin gerichtet. Deswegen eben befindet sie sich jetzt in diesem Mittelpunkt. Nun könnte man fragen, wenn beide Mittelpunkte zusammenfallen, zu welchem strebt alles Schwere und die Teile der Erde naturgemäß hin, zu dem des Alls oder zu dem der Erde? Notwendig zu dem des Alls, da auch alles Leichte und das Feuer, das die Gegenbewegung zum Schweren ausführt, nach dem Rande des die Mitte umschließenden Raumes strebt. Nur mittelbar ist Mitte der Erde auch Mitte des Alls, der Sturz erfolgt auch zur Mitte der Erde hin, aber nur mittelbar, insofern sie ihre Mitte an der Mitte des Alls hat. ... Daß die Erde sich nicht bewegt, auch nicht außerhalb der Mitte, ist hieraus zu erkennen. Zudem ist aus dem Gesagten auch der Grund

ihres Verweilens klar. Denn wenn, wie man beobachtet, die Körper von allen Seiten nach der Mitte zu fallen und das Feuer von der Mitte zum Rande hin steigt, dann kann unmöglich irgendein Teil von ihr die Mitte verlassen, es sei denn mit Gewalt. ...

Wenn also keiner der Teile von der Mitte sich fortbewegen kann, dann erst recht nicht das Ganze, weil Teil und Ganzes dieselbe natürliche Bewegung haben. ... Man muß sich das Gesagte so vorstellen, wie es die Naturgelehrten beschreiben, die sie geworden sein lassen, nur daß jene Gewalt für die Abwärtsbewegung verantwortlich machen. Besser ist es, den wahren Grund anzugeben und zu lehren, dies geschehe, weil es in der Natur alles Schweren liege, zur Mitte zu eilen. Zur Zeit der großen Mischung nun sonderten sich die Bestandteile und stürzten von allen Seiten gleichmäßig zur Mitte. ...

Das ist jedenfalls klar, daß, wenn alles gleichmäßig vom Rande aus zu einer einzigen Mitte hin stürzt, eine allseitig gleichmäßige Masse entstehen muß. Denn wenn überall gleichviel sich anreichert, muß schließlich der Rand von der Mitte überall denselben Abstand haben. Das aber ist die Gestalt einer Kugel. Doch macht es für diesen Beweisgang keinen Unterschied, wenn auch ihre Teile nicht gleichmäßig von allen Seiten herbeigestürzt kommen. Denn eine größere Masse muß die vorher angekommene kleinere weiterstoßen, bis beide ihre Wucht zur Mitte weitergeleitet haben und das Schwerere das leichtere Gewicht bis hierher vor sich hergetrieben hat. ...

Dies paßt auch zu den beobachteten Erscheinungen, da andernfalls die Schnittlinien bei Mondfinsternissen nicht diese Gestalt haben könnten. ...

Auch aus den Sternbeobachtungen geht hervor, daß sie nicht nur rund ist, sondern auch gar nicht einmal so groß. Denn wenn wir unsren Ort nur wenig nach Norden oder Süden verschieben, hat sich ersichtlich der Gesichtskreis schon verändert, so daß die Sterne über uns sich sehr verändert haben und uns nicht mehr dieselben erscheinen, wenn wir nach Norden oder Süden weitergehen. Manche Sterne kann man nämlich in Ägypten und auf Cypern sehen, die man in nördlichen Ländern nicht sehen kann, und Sterne, die man hier das ganze Jahr sieht, gehen dort unter. Daraus geht nicht nur hervor, daß die Erde rund ist, sondern auch, daß sie keine große Kugel bildet, da sonst nicht bei so kleinen Veränderungen die Wirkung so schnell sich zeigte. Wer also meint, die Gegend um die Säulen des Herakles und die um Indien berührten sich und auf diese Weise gebe es nur ein einziges Meer, vertritt keine so unglaubliche Ansicht. ...<sup>2</sup>

Zitate wie dieses deuten an, daß Astronomie und irdische Physik nicht unabhängig sind. Beobachtungen und Theorien beider Zweige werden innig miteinander verbunden. Obwohl die Schwierigkeit, das Problem der Planetenbewegungen zu lösen, einen Astronomen dazu führen könnte, *in der Astronomie* das Konzept einer bewegten Erde zu versuchen, so konnte er es nicht, ohne die anerkannten Grundlagen der irdischen Physik dabei umzustoßen. Er hätte sich wahrscheinlich die bewegte Erde nicht vorstellen können, weil sie aus Gründen, die aus seinem nichtastronomischen Wissen stammten, nicht annehmbar schien. Dies haben wohl Ptolemäus und seine Nachfolger gemeint, als sie später die astronomischen Hypothesen von Aristarch, Heraklid und den Pythagoräern als „lächerlich“, wenn auch astronomisch befriedigend beschrieben.

Nehmen wir zum Beispiel die folgende Passage aus dem *Almagest*, in der Ptolemäus die Theorie des Heraklid verwirft, daß die Sternenkugel ruht, und daß ihre scheinbare tägliche Bewegung in Wahrheit eine tägliche Bewegung der im Mittelpunkt stehenden Erde in entgegengesetzter Richtung ist. Ptolemäus beginnt mit Argumenten über die Kugelgestalt und die zentrale Lage der Erde, die jenen des Aristoteles, die wir soeben zitierten, sehr ähnlich sind. Dann setzt er fort:

„Obwohl sie den gebrachten Argumenten nichts entgegenzusetzen haben, haben gewisse Denker ein Schema ersonnen, das sie für akzeptabler halten, von dem sie glauben, daß nichts dagegen eingewendet werden kann, wenn sie zum Beispiel vorschlagen, daß der Himmel ruht, jedoch die Erde um ein und dieselbe Achse von West nach Ost rotiert, indem sie eine Umdrehung in ungefähr einem Tag vollendet.

Diese Leute vergessen jedoch, daß es zwar keinen Einwand gegen diese Theorie geben mag, soweit Himmelserscheinungen betroffen sind, doch nach den [irdischen] Bedingungen zu urteilen, die uns und die Objekte in der Luft um uns betreffen, muß eine solche Hypothese ganz lächerlich erscheinen. ....

[Wenn die Erde] in einer solch kurzen Zeit solch eine große Drehung um ihre Achse macht ... muß alles, was nicht auf der Erde steht, ein und dieselbe Bewegung im Gegensinn zur Erde gemacht haben, und Wolken sowie alle Dinge, die fliegen oder geworfen werden können, könnten niemals nach Osten wandern, denn die Erde würde sie alle stets überholen, so daß alles nach Westen zurückbleiben würde.<sup>3</sup>

Der Kern des Ptolemäischen Argumentes ist derselbe wie bei Aristoteles, und viele andere Gründe wurden aus denselben Prinzipien im Laufe des Mittelalters und der Renaissance abgeleitet. Ein Körper wird sich, wenn er nicht gestoßen wird, geradewegs an seinen natürlichen Ort bewegen und dort zur Ruhe kommen. Diese natürlichen Orte und die Linien, auf denen sich die Körper hinbewegen, werden vollständig von der Geometrie eines absoluten Raumes bestimmt, in dem jeder Ort und jede Richtung permanent bezeichnet sind, ob der Ort nun materieerfüllt ist oder nicht. So schreibt Aristoteles in seinem Buch über den Himmel: „Wenn man nämlich die Erde dahin brächte, wo jetzt der Mond steht, dann wird nicht mehr jeder Teil von ihr auf sie herabfallen, sondern dahin, wohin er jetzt auch fällt.“<sup>4</sup>

Die natürliche Bewegung eines Steines wird nur vom Raum bestimmt, nicht von der Beziehung des Steines zu anderen Körpern. Daher bewegt sich ein senkrecht nach oben geworfener Stein entlang einer geraden Linie, die ein für allemal im Raum feststeht; wenn sich aber die Erde bewegt, während der Stein in der Luft ist, wird der Stein nicht an die Stelle zurückkehren, von der er weggeschleudert wurde. In gleicher Weise würden Wolken, die bereits ihren natürlichen Ort eingenommen haben, zurückbleiben, während sich die Erde dreht. Nur wenn die bewegte Erde die Luft mit sich mitführt, könnte eine Wolke oder ein Stein der Erde überhaupt folgen, und doch würde die Bewegung der Luft einen Stein nicht weit genug mitnehmen, um ihn mit der Erdrehung Schritt halten zu lassen.

In dieser aristotelischen Theorie der Bewegung gibt es allerdings Schwierigkeiten. Einige davon werden später eine bedeutende Rolle in der kopernikanischen Revolution spielen. Doch wie das Zwei-Kugel-Universum ist die aristotelische Theorie der Bewegung ein ausgezeichneter erster Schritt zu einem Verständnis der Bewegung, und sie macht eine im Mittelpunkt ruhende Erde notwendig. Anhänger einer Vorstellung der Erde als Planeten werden daher eine neue Theorie der Bewegung benötigen. Bis zu ihrer Erfindung wird die Kenntnis der irdischen Physik, so wie es sich während des Mittelalters zugetragen hat, die astronomische Phantasie behindern.

### *Aristoteles' gefüllter Raum*

Eine zweite Illustration der Scheuklappen, die Astronomen durch die Wechselbeziehung zwischen ihrem astronomischen und nichtastronomischen Wissen hatten, bietet die aristotelische Vorstellung eines vollen Universums oder Plenums. Dieses Beispiel ist typischer als das letzte, da die Verknüpfung

gen zwischen den verschiedenen Wissensbereichen hier sowohl zahlreicher, als auch weniger zwingend als die früher geschilderten sind. Das komplizierte Bild aristotelischen Denkens beginnt sich nun zu zeigen.

Die antike Vorstellung der Gefülltheit des Universums wird oft als *horror vacui*, als Abscheu der Natur vor einem Vakuum, bezeichnet. Man kann es kurz so beschreiben: Die Natur wird stets die Bildung eines Vakuums zu verhindern trachten. In dieser Form leiteten die Griechen dieses Prinzip ab und verwendeten es dazu, eine Vielfalt von Erscheinungen zu erklären. Wasser wird nicht aus einer offenen Flasche mit einer kleinen Öffnung fließen, bevor nicht ein zweites Loch in die Flasche gemacht ist; denn ohne dieses, durch das Luft eintreten kann, würde das ausfließende Wasser ein Vakuum hinter sich lassen. Siphone, Wasseruhren und Pumpen wurden auf dieser Grundlage in einfacher Weise erklärt. Einige antike Denker wandten die Anschauung des *horror vacui* auf die Erklärung der Adhäsion und auf die Konstruktion von Heißluft- und Dampfmaschinen an. Die experimentelle Grundlage des Prinzips konnte nicht in Frage gestellt werden. Die Griechen kannten noch keine Apparate, mit denen überzeugende Demonstrationen von Vakua gezeigt werden konnten. Es gab noch keine pneumatischen Phänomene, um das Prinzip in Frage zu stellen. Erst im Laufe der Entwicklung des Bergbaues im Laufe des 16. Jahrhunderts entdeckte man, daß Hebe-pumpen Wasser nicht mehr als 10 Meter heben können. Eine Ablehnung des *horror vacui* bedeutete notwendigerweise die Zerstörung einer durchaus befriedigenden wissenschaftlichen Erklärung vieler irdischer Phänomene.

Für Aristoteles und die meisten seiner Nachfolger war jedoch der *horror vacui* mehr als ein erfolgreiches experimentelles Prinzip, das auf und in der Nähe der Erdoberfläche anwendbar war. Aristoteles glaubte nicht nur, daß es in der irdischen Welt *überhaupt* keine Vacua gäbe, sondern daß sie auch *prinzipiell* nicht irgendwo im Universum existieren könnten. Der bloße Begriff des Vakuums bedeutete für ihn einen Widerspruch in sich wie die Vorstellung eines „quadratischen Kreises“. Heute überzeugen Aristoteles' logische Beweise der Unmöglichkeit eines Vakuums fast niemanden mehr, da jeder zumindest eine Vakuumröhre gesehen hat und von einer Vakuum-pumpe gehört hat, doch ist es häufig schwierig, den Fehler in seinen Argumenten zu finden. Doch ohne die experimentellen Gegenbeweise, die wir jetzt besitzen, schienen sie überzeugend, denn sie entsprangen einer tiefen Schwierigkeit, die mit den Worten verbunden ist, mit denen wir Probleme von Raum und Materie diskutieren. Offensichtlich kann Raum nur durch das Volumen definiert werden, das ein Körper einnimmt. Ohne materiellen Körper gibt es nichts, womit man Raum definieren kann; augenscheinlich kann

er nicht alleine existieren. Raum und Materie sind untrennbar, zwei Ansichten derselben Sache. Es kann keinen Raum ohne Materie geben. Oder in Aristoteles' komplizierteren Worten: „Es gibt keine räumliche Ausdehnung außer jener von materiellen Substanzen.“<sup>5</sup>

Logik und Experiment stützten daher die Theorie des vollständig gefüllten Universums, die bald ein wesentlicher Bestandteil kosmologischer und astronomischer Theorien wurde. Sie spielte zum Beispiel bei der aristotelischen Erklärung der andauernden Bewegung im Inneren der Sternenkugel eine wichtige Rolle. Wäre irgendeine der himmlischen Schalen durch ein Vakuum ersetzt, müßte alle Bewegung innerhalb dieser Schale aufhören. Die Reibung von Schale zu Schale ruft alle Bewegung (außer der Rückkehr zum natürlichen Ort) hervor, ein Vakuum würde die Kette der Stöße unterbrechen. Wie wir bereits festgestellt haben, ist wiederum die Unmöglichkeit eines Vakuums die Grundlage der Endlichkeit des Universums. Außerhalb der Sternenkugel ist weder Raum noch Materie – überhaupt nichts. Ohne eine Vorstellung, die Materie und Raum untrennbar vereinigte, wäre Aristoteles gezwungen gewesen, die Unendlichkeit des Universums einzugehen. Materie könnte dann an den leeren Raum grenzen, der leere Raum könnte wiederum an Materie grenzen. Doch es würde keine letzte Grenze geben, an der das Universum ein für allemal enden würde.

Ein unendliches Universum würde kaum ein aristotelisches Universum bleiben. Ein unendlicher Raum hat keinen Mittelpunkt. Jeder Punkt ist von allen Punkten des Umfangs gleich weit entfernt, und wenn es keinen Mittelpunkt gibt, gibt es keinen ausgezeichneten Punkt, in dem sich das schwere Element Erde anhäufen kann, es gibt keine natürliche Richtung „oben“ und „unten“, die die natürliche Bewegung eines Elements bestimmen würde. Es gäbe außerdem keinen natürlichen Ort in einem unendlichen Universum, denn jeder Ort ist wie jeder andere. Die aristotelische Theorie der Bewegung ist jedoch untrennbar mit der Vorstellung eines endlichen und vollständig erfüllten Raumes verknüpft. Die beiden stehen und fallen zusammen.

Dies sind jedoch nicht die einzigen Schwierigkeiten, die die Unendlichkeit des Raumes einem Aristoteliker bietet. Wenn der Raum unendlich ist, und es keinen ausgezeichneten Mittelpunkt gibt, so kann man kaum verstehen, daß die gesamte Erde, das Wasser, die Luft und das Feuer des Universums sich an einem einzigen Platz angehäuft haben. In einem unendlichen Universum liegt es nahe anzunehmen, daß es durch den gesamten Raum verteilt noch andere Welten gibt. Vielleicht gibt es auf den anderen Welten Pflanzen, Menschen und Tiere. So verschwindet die Einzigartigkeit der Erde. Die Kraft, die vom Umfang her das Ganze antreibt, verschwindet gleichzeitig.

Mensch und Erde hören auf, im Brennpunkt des Universums zu stehen. Die meisten Philosophen der Antike und des Mittelalters, die wie die Atomisten glaubten, daß das Universum unendlich wäre, fühlten sich zur Annahme der Existenz des leeren Raums und einer Vielzahl von Welten gezwungen. Und bis zum 17. Jahrhundert konnte niemand, der an diese Vorstellungen glaubte, eine kosmologische Vorstellung entwickeln, die mit der aristotelischen bei der Erklärung der täglichen irdischen und himmlischen Phänomene in Konkurrenz treten konnte. Heute mag das unendliche Universum eine alltägliche Sache sein, doch was alltäglich ist, wird auch durch die Schule bestimmt.

Die vielfältigen Rollen der Vorstellung eines vollkommen erfüllten Universums im aristotelischen Denken sind das beste Beispiel für die Zusammenhänge innerhalb eines Weltbildes. Diese Vorstellung liegt der Pneumatik, der Erhaltung des Bewegungszustandes, der Endlichkeit des Raumes, der Einzigartigkeit der Erde und so weiter zugrunde. Obwohl sie weder die Einzigartigkeit der Erde noch ihre Unbeweglichkeit logisch erzwingt, paßt sie doch in ein zusammenhängendes Bild, in der die einzigartige im Mittelpunkt ruhende Erde eine weitere wesentliche Größe darstellt. Auf der anderen Seite erzwingt die Bewegung der Erde weder die Existenz eines Vakuums noch die Unendlichkeit des Universums. Trotzdem ist es kein Zufall, daß diese beiden Ansichten nach dem Sieg der kopernikanischen Theorie Anerkennung fanden.

Kopernikus selbst glaubte nicht daran. Wie wir sehen werden, versuchte er die meisten wichtigen Züge der aristotelischen und ptolemäischen Kosmologien zu erhalten. Doch indem er der Erde eine Drehung um ihre Achse gab, brachte er die Sternenkugel zum Stillstand, er nahm ihr die physikalische Funktion. Und indem er die Erde sich auf einer Bahn bewegen ließ, vergrößerte er die Sternenkugel beträchtlich. Die kopernikanische Kosmologie nahm der interplanetarischen Materie viele Funktionen, die Aristoteles ihr gegeben hatte; gleichzeitig forderte sie jedoch, daß es mehr davon gäbe. Seine Nachfolger gaben bald die nunmehr funktionslose Sternenkugel auf, sie verstreuten die Sterne im gesamten Raum, sie ließen ein Vakuum, oder etwas ähnliches zwischen den Sternen zu, und träumten von anderen Welten, die in den Weiten jenseits unseres Sonnensystems von anderen Menschen bewohnt würden. Selbst das irdische Prinzip des *horror vacui* überlebte nicht lange. Im neuen Universum konnten Wissenschaftler viel leichter erkennen, daß Bergbauingenieure bereits ein Jahrhundert lang mit überlangen Wasserpumpen Vakua auf der Erde produziert hatten. Viele Einflüsse, darunter

aber auch die neue Astronomie des Kopernikus, spielten eine wesentliche Rolle bei der Modifikation der Pneumatik. Wieder einmal zeigt sich die innige Verknüpfung der Astronomie mit anderen Wissenschaften, wobei diese die astronomischen Vorstellungen mitformen.

### *Die Majestät der Himmel*

Unsere früheren Diskussionen der Motive zur Himmelsbeobachtung haben mehrmals angedeutet, daß die antike astronomische Tradition ihre Existenz zum Teil dem vielfach wahrgenommenen Kontrast zwischen der Stabilität des Himmels und der ohnmächtigen Unsicherheit des irdischen Lebens verdankte. Dieselbe Wahrnehmung floß in die Kosmologie des Aristoteles in Form der absoluten Unterscheidung zwischen der superlunaren und der sublunaren Region. Doch in der von Aristoteles genau formulierten Weise hängt ihre Unterscheidbarkeit sowohl von der zentralen Position der Erde als auch der vollständigen Symmetrie der Kugeln, die die Sternen- und Planetenbewegungen erzeugen, ab.

Nach Aristoteles teilt die Innenseite der Mondsphäre das Universum in zwei völlig getrennte Regionen, die mit verschiedenen Arten von Materie gefüllt sind und die verschiedenen Gesetzen unterliegen. Die irdische Region, in der der Mensch lebt, ist der Bereich der Vielfalt und des Wandels, von Geburt und Tod, von Entstehen und Vergehen. Im Gegensatz dazu ist die Himmelsregion ewig und ohne Wandel. Von allen Elementen ist nur der Äther rein und unvermischbar. Nur die verschachtelten Himmelskugeln bewegen sich in natürlicher Weise auf ewig in Kreisen, ihre Geschwindigkeit ändert sich nie, sie nehmen stets genau dieselbe Region des Raumes ein, sie drehen sich auf ewig um ihre eigenen Achsen. Die Substanz und die Bewegung der Himmelssphären sind als einzige mit der Unwandelbarkeit und Erhabenheit des Himmels verträglich, und es sind die Himmel, die auf Erden alle Vielfalt und jeden Wandel hervorrufen und kontrollieren. Genauso wie in jeder primitiven Religion sind in der aristotelischen physikalischen Beschreibung des Universums die einschließenden Himmel der Ort der Vollendung und der Kraft, auf der das irdische Leben fußt. Die Schrift *Über die Himmel* sagt dazu:

„Daß also der Urkörper aller Körper ewig sei, ohne Wachsen und Schwinden, ohne Altern, Veränderung und Leiden, das ergibt sich aus dem Gesagten, wenn man nur den Grundlagen traut, auf denen man

gebaut hat. Unsere Begründung scheint für die Erscheinungen und die Erscheinungen scheinen für unsere Begründung zu sprechen. Alle Menschen nämlich nehmen Götter an und weisen dem Göttlichen den obersten Raum zu, Barbaren wie Griechen, soweit sie an Götter glauben, offenbar um das Unsterbliche mit dem Unvergänglichen zu verbinden. Anders nämlich geht es nicht. Wenn es nun etwas Göttliches gibt – und das gibt es! –, dann sind auch unsere Ausführungen von vorhin über das Urwesen der Körper [nämlich, daß sie gewichtslos, unzerstörbar, usw. sind] richtig. Und das ergibt sich auch hinlänglich aus der Wahrnehmung, um nach menschlicher Fassungskraft zu reden. Denn in der ganzen Vergangenheit und nach aller Überlieferung ist offenbar keinerlei Veränderung eingetreten, weder im Ganzen des äußeren Himmels noch in seinen besonderen Bildern. Auch der Name scheint von den Alten bis auf die Gegenwart in diesem Sinne weitergegeben zu sein. Daher hat man den obersten Raum ‚Äther‘ genannt, als etwas anderes neben Erde und Feuer und Luft und Wasser, davon, daß er ewige Zeiten läuft, die Benennung herleitend.“<sup>6</sup>

Aristoteles selbst arbeitete die Vorstellung von der Erhabenheit und der Göttlichkeit der Himmelsregionen kaum weiter aus. Sowohl die Materie als auch die Bewegungen des Himmels waren perfekt. Jeder irdische Wandel wird durch eine Folge von Stößen verursacht, die von der einheitlichen Bewegung der Himmelssphären ausgehen, die die Erde symmetrisch umschließen. Bereits hier sieht man ein wichtiges außerwissenschaftliches Argument für die einzigartige zentrale Position der Erde. In den Jahrhunderten nach dem Tod des Aristoteles wurde dieses Argument verstärkt, indem die Vorstellung der Vollkommenheit der Himmel weitergeführt wurde und in zwei andere, unabhängige Glaubenssätze eingearbeitet wurde, welche unabhängig voneinander entstanden waren. Wir müssen eine dieser Entwicklungen, die detaillierte Integration der aristotelischen Kosmologie in der christlichen Theologie auf das nächste Kapitel aufschieben. Sie führte auf ein Universum, dessen Details sowohl religiöse als auch physikalische Bedeutung hatten. Die Hölle war der geometrische Mittelpunkt, Gottes Thron war jenseits der Sternenkugel, jede Planetensphäre und jeder Epizykel wurde von einem Engel angetrieben. Eine andere wichtige Anwendung des Konzeptes der himmlischen Erhabenheit – die Astrologie – ist älter als die christlich-aristotelische Kosmologie und hatte einen stärkeren Einfluß auf die Astronomen. Da sie berufsmäßig damit beschäftigt waren, kann die Astronomie eine der wichtigsten Kräfte gewesen sein, die die Astronomen an die Vorstellung der Einzigartigkeit der Erde banden.

Wir haben bereits die wichtigsten Wurzeln des astrologischen Glaubens und ihre Beziehung zur aristotelischen Vorstellung von der Rolle der Himmel beschrieben. Entfernung und Unveränderlichkeit machen den Himmel zu einem plausiblen Ort für die Götter, die nach Belieben in die menschlichen Geschäfte eingreifen. Unterbrechungen der himmlischen Regelmäßigkeiten – insbesondere Kometen und Verfinsterungen – wurden als Vorzeichen unüblichen Glücks oder Unglücks betrachtet. Zusätzlich gab es aufgrund der Beobachtungen gute Gründe, eine himmlische Kontrolle über zumindest einige irdische Ereignisse anzunehmen. Es ist heiß, wenn die Sonne im Sternbild des Krebses steht, kalt, wenn sie im Steinbock ist; die verschiedene Höhe der Flut folgt den Mondphasen; der Monatszyklus der Frauen kehrt in Intervallen wieder, die mit der Länge des Mondmonats übereinstimmen. In einer Zeit, in der das Bedürfnis des Menschen, sein Schicksal zu verstehen und zu kontrollieren, gewaltig seine physikalischen und intellektuellen Hilfsmittel überstieg, wurde dieser offensichtliche Einfluß himmlischer Mächte natürlich auch auf andere Himmelskörper ausgedehnt. Besonders nachdem Aristoteles einen physikalischen Mechanismus vorgeschlagen hatte – den Reibungsantrieb –, durch den Himmelskörper Veränderungen auf der Erde hervorruften konnten, gab es eine Basis für den Glauben, daß die Fähigkeit, künftige Himmelserscheinungen vorherzusagen, die Menschen auch zur Vorhersage der Zukunft von Individuen und Nationen befähigen würde.

Vor dem zweiten Jahrhundert vor Christus zeigen antike Berichte kaum Anzeichen einer vollständig entwickelten Kunst, die Details irdischer Angelegenheiten aus den beobachteten und berechneten Positionen von Sternen und Planeten vorherzusagen. Doch nach diesem relativ späten Beginn war die Astrologie 1800 Jahre untrennbar mit der Astronomie verknüpft. Zusammen bildeten sie ein einziges Gewerbe. Die Astrologie, die die Zukunft der Menschen aus den Sternen vorhersagte, wurde kritische Astrologie genannt, die Astronomie, die das Schicksal der Gestirne aus ihren gegenwärtigen und vergangenen Positionen vorhersagte, wurde Naturastrologie genannt. Jene, die in einem Zweig Ruhm erlangten, waren gewöhnlich im anderen genauso gut bekannt. Ptolemäus, dessen *Almagest* die antike Astronomie in ihrer Blüte beschrieb, war für sein Werk *Tetrabiblos*, einen klassischen Beitrag zur Astrologie, genauso berühmt. Europäische Astronomen wie Brahe und Kepler, die spät in der Renaissance das kopernikanische System seiner modernen Gestalt näherbrachten, wurden vor allem deswegen gefördert, weil man von ihnen die besten Horoskope erwartete.

Während eines Großteils der Zeit, mit dem sich der Rest dieses Buches beschäftigt, übte die Astrologie einen ungeheuren Einfluß auf das Denken

der meisten gebildeten Menschen Europas aus. Sie wurde im frühen Mittelalter von der Kirche teilweise unterdrückt, deren Lehre, daß der Mensch in Freiheit das christlich Gute wählen könne, mit der strikten Bestimmtheit der Astrologie unverträglich war. Doch während der fünf Jahrhunderte rund um Christi Geburt und während des späten Mittelalters und der Renaissance bildete die Astrologie einen Leitfaden für die Könige und ihre Feldherren, und es ist kein Zufall, daß in diesen Zeiten, die geozentrische Astronomie große Fortschritte machte. Die genauen Tabellen der Planetenörter und die komplizierte Berechnungstechnik, die von den Astronomen von der Antike bis zur Renaissance entwickelt wurde, waren Hauptbedingungen für astrologische Vorhersagen. Bis nach Kopernikus' Tod hatten diese wesentlichen Ergebnisse astronomischer Forschung wenig andere sozial bedeutsame Anwendung. Astrologie bot daher das Hauptmotiv für die Beschäftigung mit dem Planetenproblem, so daß die Astrologie eine besonders wichtige bestimmende Größe in der astronomischen Vorstellungswelt wurde.

Jedoch verlieren Astrologie und die Vorstellung des himmlischen Einflusses viel von ihrer Glaubwürdigkeit, wenn die Erde ein Planet ist. Eine Erde als Planet wird genauso kräftig auf den Saturn einwirken, wie der Saturn auf sie. Dasselbe Argument gilt für andere Planeten. Die Dichotomie Erde – Himmel bricht zusammen. Wenn die Erde ein Himmelskörper ist, muß sie an der Unwandelbarkeit der Himmel teilnehmen, die Himmel wiederum müssen die Vergänglichkeit der Erde zeigen. Es kann kein Zufall sein, daß der feste Griff der Astrologie auf das menschliche Denken schließlich während jener Zeit nachließ, in der die kopernikanische Theorie erstmalig akzeptiert wurde. Es mag sogar bezeichnend sein, daß Kopernikus, der Autor jener Theorie, die dem Himmel seinen speziellen Einfluß nahm, zu jener kleinen Gruppe von Astronomen gehörte, die im Zeitalter der Renaissance keine Horoskope stellten.

Astrologie und der Einfluß der Himmel bieten daher ein weiteres Beispiel für die indirekten Folgerungen aus der Einzigartigkeit und der Stabilität der Erde, Folgerungen, die wiederholt angeschnitten, jedoch durch unsere ausführliche Diskussion der vielfachen Aufgaben einer im Mittelpunkt ruhenden Erde im aristotelischen Weltbild keineswegs erschöpft sind. Diese und ähnliche Konsequenzen machen aus der kopernikanischen Wende eine wahre Revolution. Wenn man die Neuerung, die von Kopernikus begonnen wurde, als bloße Vertauschung des Ortes von Erde und Sonne beschreibt, macht man einen Maulwurfshügel aus einem Gebirgszug des menschlichen Denkens. Hätte der kopernikanische Vorschlag keine Konsequenzen außerhalb der Astronomie gehabt, er wäre nicht so lange verzögert und nicht so hart bekämpft worden.

## *Das aristotelische Weltbild (kurz gefaßt)*

Das aristotelische Weltbild war die wichtigste Basis für die präkopernianische Tradition in der Astronomie. Doch die Zeiten des Aristoteles sind nicht unsere, man muß umdenken, wenn man seine Schriften, besonders jene über Physik und Kosmologie lesen möchte. Verschiedentlich hat die Unfähigkeit, dies zu berücksichtigen, zu gekünstelten und entstellten Erklärungen für das Behauptungsvermögen der aristotelischen Physik in Antike und Mittelalter geführt. Man erzählt uns oft, daß nur ihre Vorliebe für die Autorität des geschriebenen Wortes, besonders des antiken, die Wissenschaftler des Mittelalters an Aristoteles' absurder Aussage festhalten ließ, daß schwere Körper schneller fallen als leichte, statt daß sie sich auf ihre eigenen Sinneswahrnehmungen verließen. Nach dieser weit verbreiteten Meinung begann moderne Naturwissenschaft, als Galilei schriftliche Aussagen zugunsten von Experimenten verwarf und beobachtete, daß zwei Körper verschiedenen Gewichtes, die man von der Spitze des Turms zu Pisa fallen ließ, gleichzeitig am Boden aufschlugen. Heute weiß jeder Schuljunge, daß schwere Körper und leichte Körper gleich schnell fallen. Doch der Schüler irrt sich, genauso geht es uns mit dieser Geschichte. Im Alltag fallen schwere Körper schneller als leichte, was auch Aristoteles sagte. Das ist die primitive Wahrnehmung. Galileis Gesetz ist für die Wissenschaft nützlicher als das aristotelische, nicht weil es die Erfahrung besser beschreibt, sondern weil es hinter die von unseren Sinnen wahrgenommenen oberflächlichen Regelmäßigkeiten zu einem wesentlicheren, aber verborgenen Aspekt der Bewegung führt. Galileis Gesetz durch Beobachtung nachzuprüfen, erfordert spezielle Ausrüstung. Die bloßen Sinne werden es nicht bestätigen. Galilei erhielt sein Gesetz nicht aus der Beobachtung, zumindest nicht aus einer neuen Beobachtung, sondern durch eine Kette logischer Argumente, ähnlich jenen, die wir im nächsten Kapitel kennen lernen werden. Vermutlich hat er das Experiment auf dem Turm zu Pisa nicht durchgeführt. Es wurde von einem Kritiker durchgeführt, das Resultat sprach für Aristoteles: der schwere Körper traf zuerst auf dem Boden auf.

Die populäre Geschichte der Widerlegung des Aristoteles durch Galilei ist zum Großteil eine Sage, sie findet ihre Begründung im Fehlen des richtigen historischen Standpunktes. Wir neigen dazu zu vergessen, daß viele Vorstellungen, an die wir glauben, uns in unserer Jugend mühselig eingehämmert wurden. Wir nehmen sie dann allzu leicht als natürlich und unzweifelhaftes Produkt unserer bloßen Sinne, wir bezeichnen Vorstellungen, die von unseren eigenen abweichen, als Fehler, die in der Unwissenheit oder Dummheit wur-

zeln oder durch blinden Gehorsam gegenüber der Autorität verewigt werden. Unsere eigene Erziehung steht zwischen uns und der Vergangenheit. Im besonderen steht sie zwischen uns und der aristotelischen Physik, sie führt oft zu einer falschen Deutung des Wesens von Aristoteles' Einfluß auf die späteren Generationen.

Ein Teil der Autorität der aristotelischen Schriften folgt aus der Brillianz seiner eigenen originellen Ideen, ein Teil leitet sich aus ihrer ungeheuren Breite und logischen Kohärenz ab, die heute ebenso eindrucksvoll wie vor zweitausend Jahren sind. Doch die wichtigste Ursache der Autorität des Aristoteles liegt nach meiner Meinung in einem dritten Aspekt seines Denkens, der für den modernen Menschen schwieriger zu fassen ist. Aristoteles konnte in abstrakter und konsistenter Weise viele Anschauungen über das Universum formulieren, die Jahrhunderte hindurch bereits existiert hatten, bevor er ihnen eine logische Erklärung gab. In vielen Fällen sind dies gerade die Ansichten, die die Schulbildung im Bereich der Wissenschaft seit dem 17. Jahrhundert mit wachsendem Erfolg dem Denken der Erwachsenen im Abendland ausgetrieben hat. Heute zeigt die Anschauung der Natur, wie sie die meisten gebildeten Erwachsenen haben, nur wenig wichtige Parallelen zur aristotelischen Anschauung, doch die Ansichten von Kindern, von Angehörigen primitiver Stämme und einiger Völker, die nicht im Abendland leben, stimmen mit seinen Ansichten weitgehend überein. Hin und wieder sind die Parallelen schwer zu entdecken, da sie in Aristoteles' abstraktem Wortschatz und in seiner kunstvoll logischen Methode verborgen sind. Diese Elemente der aristotelischen Dialektik kann man nur in Anfängen in primitiven Gesellschaften und bei Kindern finden. Doch die Hauptideen des Aristoteles über die Natur zeigen im Gegensatz zu der Art, in der er sie ausgedrückt und dokumentiert, wesentliche Spuren früherer und elementarer Auffassungen des Universums. Wenn wir jedoch von diesen Spuren nichts wissen, so werden wir die Bedeutung und die Stärke wichtiger Teile der aristotelischen Lehre falsch einschätzen.

Das Wesen der primitiven Anschauungsreste und die Weise, in der sie durch die aristotelische Dialektik umgewandelt wurden, wird an Aristoteles' Diskussionen von Raum und Bewegung klar. Die Weltbilder primitiver Gesellschaften und von Kindern sind häufig animistisch. Sie ziehen daher nicht wie wir einen schnellen und unerbittlichen Trennungsstrich zwischen der organischen und der anorganischen Natur, zwischen Lebewesen und unbelebten Dingen. Das organische Reich hat in der Vorstellung höheren Rang, das Verhalten von Wolken, Feuer und Steinen wird gerne mit inneren Antrieben und Wünschen erklärt, wie sie Menschen und vermutlich auch Tiere bewegen.

Auf die Frage, warum Ballone aufsteigen, antwortete ein Kind von vier Jahren: „Weil sie wegfliegen wollen.“ Ein anderes Kind im Alter von sechs Jahren erklärt, daß Ballone aufsteigen, weil „sie die Luft lieben; wenn man sie losläßt, dann steigen sie in den Himmel“. Und als man ihn fragt, warum eine Schachtel zu Boden fällt, antwortet Hans, 5 Jahre alt., „weil sie dorthin möchte.“ „Warum?“ „Weil es so gut ist“<sup>7</sup>. In primitiven Gesellschaften findet man häufig ähnliche Erklärungen, obwohl man sie schwerer verstehen kann; sie sind in Sagen eingesponnen, die man nicht wörtlich nehmen darf. Wir haben bereits die ägyptische Erklärung der Sonnenbewegung kennengelernt, nach der ein Gott in seinem Boot über den Himmel fährt.

Die Steine des Aristoteles sind ohne Leben, obwohl sein Universum häufig, zumindestens im übertragenen Sinn, belebt zu sein scheint. (Es gibt in Aristoteles' Werk Passagen, die an jene im ersten Kapitel zitierte Passage aus Platos *Timäus* erinnern.) Doch seine Vorstellung von dem Stein, der aus der Hand fällt, um seinen natürlichen Platz im Mittelpunkt des Universums zu erreichen, ist nicht sehr von der Vorstellung des Kindes verschieden, dessen Luftballon die Luft liebt. Das Vokabular hat sich geändert. Die Konzepte werden mit der Logik der Erwachsenen manipuliert, der Animismus wurde umgeformt. Doch der Großteil der Wirkung der aristotelischen Lehre muß in der Natürlichkeit der Auffassung liegen, die der Lehre zugrunde liegt.

Animismus ist jedoch nicht die einzige psychologische Grundlage der aristotelischen Erklärung der Bewegung. Meiner Meinung nach leitet sich ein wesentlich wichtigeres Element aus der aristotelischen Umformung primitiver Vorstellung über den Raum ab. Den Angehörigen prähistorischer Kulturen und primitiver Stämme erscheint der Raum völlig anders als der Newtonsche Raum, in dem wir aufgewachsen sind – meist ohne uns dessen bewußt zu sein. Letzterer ist physikalisch neutral: Ein Körper hat seinen Ort *im* Raum, er bewegt sich *durch* den Raum, doch der spezielle Teil des Raumes und die jeweilige Bewegungsrichtung üben auf den Körper keinen Einfluß aus. Jeder Ort und jede Richtung ist wie die andere. In moderner Sprechweise ist Raum homogen und isotrop, er hat weder „Oben“ noch „Unten“, „Ost“ noch „West“!

Im Gegensatz dazu ist der Raum der Primitiven öfters einem Lebensraum ähnlich: dem Raum in einem Haus oder in einer Gemeinschaft. Er hat „Oben“ und „Unten“, „Ost“ und „West“, oder „Vorder“- und „Rückseite“ – in vielen primitiven Gesellschaften werden die Richtungsbeschreibungen aus Bezeichnungen für Körperteile abgeleitet und spiegeln deren Unterschiede wieder. Jeder Ort ist ein Ort „für“ ein Objekt oder „für“ besondere Vorgänge. Jeder Ort hat seine besondere Aufgabe. Jeder Bereich und jede Richtung des

Raumes sind voneinander in charakteristischer Weise verschieden, die Unterschiede bestimmen teilweise das Verhalten von Körpern im jeweiligen Bereich. Üblicherweise ist der Raum der Primitiven der dynamische Raum des Alltaglebens.

Die ägyptische Kosmologie bot ein Beispiel: Der Bereich der Zirkumpolarsterne wurde zum Bereich des ewigen Lebens. Eine ähnliche Auffassung des Raumes gibt einen wichtigen Hinweis auf das astrologische Denken. Das Wesen und der Einfluß der Planeten hängt von ihrer Position ab. Ein alter babylonischer Text lautet: „Wenn der Stern Marduk [der Planet Jupiter] im Aszendenten ist [das ist über dem östlichen Horizont], dann ist er Nebo [Gott Merkur]. Wenn er ... [Zahl fehlt] Stunden gestiegen ist, dann ist er Marduk [Gott Jupiter]. Wenn er in der Mitte des Himmels steht, ist er Nibiru [der höchste, der allmächtige Gott]. Jeder Planet wird dies am Zenit“.<sup>8</sup>

Die primitiven Überlieferungen, die in der aristotelischen Anschauung vom Raum enthalten sind, werden selten so klar. Dies soll die folgende Diskussion der Bewegung aus Aristoteles' *Physik* zeigen:

Die typischen Ortsveränderungen der elementaren natürlichen Körper – Feuer, Erde usw. – zeigen nicht nur, daß Raum irgendetwas ist, sondern daß er einen gewissen Einfluß ausübt. Jedes Element wird an seine Stelle gebracht, wenn es nicht daran gehindert wird, das eine nach oben, das andere nach unten, ... Es ist nicht jede zufällige Richtung, die „oben“ ist, sondern wo Feuer und Licht hingetragen werden. Ähnlich ist „unten“ nicht jede beliebige Richtung, sondern jene, wohin alles mit Gewicht und alles aus Erde getragen wird – es folgt also, daß diese Örter nicht bloß in ihrer relativen Lage sich unterscheiden, sondern auch verschiedenen Einfluß haben<sup>9</sup>.

Diese Passage ist eine fast perfekte Zusammenfassung der aristotelischen Raumvorstellung, die seiner Erklärung der Bewegung zugrunde liegt: „Raum übt einen Einfluß aus“, „Örter unterscheiden sich nicht bloß in der relativen Lage ...“. Sie sind Örter in einem Raum, der bei der Bewegung von Körpern eine aktive und dynamische Rolle besitzt. Der Raum selbst bewirkt die Kraft, die das Feuer und die Steine zu ihren natürlichen Ruheplätzen im Mittelpunkt und an der Peripherie treibt. Die Wechselwirkungen von Raum und Materie bestimmen die Bewegung der Körper. Für uns ist dies eine wenig vertraute Vorstellung, denn wir sind die Erben der kopernikanischen Revolution, die es notwendig machte, die aristotelische Raumauflässung aufzugeben. Doch die Vorstellung ist nicht unplausibel. Vielleicht ist es ein

bloßer Zufall, daß die Raumvorstellung in Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie in wichtigen Zügen der aristotelischen näher sind als der newtonschen. Einsteins Universum könnte ähnlich dem aristotelischen – doch im Gegensatz zum newtonschen – endlich sein.

Aristoteles' Weltbild war nicht das einzige, das in der Antike entstanden war, es war auch nicht das einzige, das Anhänger fand. Doch es war vielen ursprünglichen Auffassungen der Welt näher, als ihre antiken Konkurrenten, und entsprach den mit bloßen Sinnesorganen gemachten Wahrnehmungen besser. Dies ist ein weiterer Grund, warum es besonders im späten Mittelalter so ungeheuer einflußreich war. Nachdem wir zumindestens einen Teil seiner Wirkung dargestellt haben, können wir das Beharrungsvermögen besser einschätzen, das die aristotelische Kosmologie der antiken astronomischen Tradition gegeben hat. Doch nun müssen wir entdecken, was jener Tradition zustieß, so daß der Weg für Kopernikus frei wurde.

## 4 Der Wandel der Tradition: von Aristoteles zu Kopernikus

### *Europäische Wissenschaft und Gelehrsamkeit vor dem 13. Jahrhundert*

Aristoteles war der letzte große Kosmologe der Antike, Ptolemäus, der fast fünf Jahrhunderte nach Aristoteles lebte, war ihr letzter großer Astronom. Ihre Schriften beherrschten das astronomische und kosmologische Denken des Abendlandes bis nach dem Tode von Kopernikus im Jahre 1543. Kopernikus scheint ihr unmittelbarer Erbe zu sein, denn in den dreizehn Jahrhunderten zwischen Ptolemäus' Tod und Kopernikus' Geburt erfolgte keine größere und dauerhaftere Modifikation ihres Werkes. Weil Kopernikus dort begann, wo Ptolemäus aufgehört hatte, glauben viele Leute, daß es in den dazwischenliegenden Jahrhunderten keine Naturwissenschaften gegeben habe. Doch gab es sehr starke, wenn auch nicht kontinuierliche, wissenschaftliche Tätigkeit. Sie spielte eine wesentliche Rolle bei der Vorbereitung der kopernikanischen Wende.

Wenn es hier ein Paradoxon gibt, so ist dies nur ein scheinbares. 13 Jahrhunderte Forschung führten zu keiner grundlegenden Änderung der wesentlichen Ansichten der Forscher. Kopernikus' Lehrer glaubten immer noch an die Struktur des Universums, wie sie von Aristoteles und Ptolemäus beschrieben wurde, und stellten ihre Ansichten in die antike Tradition. Ihre Haltung diesen Ansichten gegenüber war jedoch nicht antik. Denkweisen altern mit den Generationen, die an sie glauben. Zu Beginn des 16. Jahrhunderts glaubten die Leute an die antike Beschreibung des Universums, und doch sahen sie es völlig anders. Die verwendeten Begriffe waren die gleichen, aber man sah neue Vor- und Nachteile in ihnen. So wie wir die Ursprünge und die Vorteile der antiken astronomischen Theorie erkundet haben, so müssen wir entdecken, was ihnen mit fortschreitendem Alter zustieß. Wir werden herausfinden müssen, wie die antike Tradition verloren ging und später wieder entdeckt wurde, denn der erste Wandel in der europäischen Haltung gegenüber dieser Überlieferung entstand aus der Notwendigkeit, sie wieder herzustellen.

Der Verlust der antiken Naturwissenschaften für das Abendland erfolgte in zwei Stufen, zunächst in einem langsamen Niedergang von Qualität und Quantität wissenschaftlicher Tätigkeit, darauf in einem vollständigen Verschwinden traditioneller Gelehrsamkeit. Nach dem zweiten vorchristlichen Jahrhundert wurde der Mittelmeerraum immer mehr von den Römern dominiert, die Mittelmeerkultur verfiel mit dem Niedergang der römischen Vorherrschaft in den ersten Jahrhunderten der christlichen Ära. Der Astronom Ptolemäus und der Arzt Galen waren die letzten großen Gestalten der antiken Wissenschaft, sie lebten beide im zweiten Jahrhundert nach Christus. Nach ihnen waren die wichtigsten wissenschaftlichen Werke des Abendlandes Kommentare und Enzyklopädien. Als die Mohamedaner in das Mittelmeerbecken eindrangen, fanden sie nur die Dokumente und die Tradition antiker Gelehrsamkeit. Die Forschungstätigkeit hatte weitgehend aufgehört.

Die islamischen Invasionen verschoben den geographischen Mittelpunkt des europäischen Christentums aus dem Mittelmeerraum nach Norden und verstärkten den anhaltenden Niedergang der westlichen Wissenschaft. Im 7. Jahrhundert verloren die Europäer sogar die Dokumente, die die antike Gelehrsamkeit verkörperten. Euklid war nur durch die unvollständige lateinische Übersetzung bekannt, die Boethius früh im 6. Jahrhundert angefertigt hatte; diese Version gab nur die wichtigsten Sätze wieder und enthielt keine Beweise. Ptolemäus war offensichtlich vollständig unbekannt, Aristoteles nur durch wenige Werke über Logik vertreten. Enzyklopädische Sammlungen von Männern wie Boethius und Isidor von Sevilla retteten Fragmente antiker Wissenschaft, doch waren diese Fragmente oft zu ungenau, verfälscht und mit Fehlern gespickt. Es gab kaum Forschung irgendeiner Art. Die wirtschaftliche Lage der europäischen Christenheit bot ihr kaum den Lebensunterhalt. Außerdem wurde die Naturwissenschaft deshalb vernachlässigt, da ihr, wie wir im nächsten Kapitel sehen werden, die katholische Kirche anfänglich feindlich gegenüberstand.

In den Jahrhunderten, als die europäische Gelehrsamkeit ihren Tiefpunkt erreichte, erfolgte eine Renaissance der Wissenschaft im Islam. Nach der Mitte des 7. Jahrhunderts dehnte sich die moslemische Welt sehr schnell von einer arabischen Oase zu einem Mittelmeerreich aus. Dieses neue Reich erbte die Manuskripte und Überlieferungen, die das Christentum verloren hatte. Moslemische Gelehrte stellten zunächst die antike Wissenschaft durch die Übersetzung syrischer Versionen von griechischen Texten ins Arabische wieder her; dann fügten sie ihre eigenen Beiträge hinzu. Sie machten auf den Gebieten der Mathematik, Chemie und Physik wesentliche und originelle Fortschritte. In der Astronomie führten sie neue Beobachtungen und neue

Methoden zur Berechnung der Planetenposition ein. Sie waren jedoch selten radikale Neuerer. Ihre Astronomie entwickelte sich fast ausschließlich im technischen und kosmologischen Rahmen, der in der klassischen Antike aufgestellt worden war. Daher ist von unserem eingeschränkten Gesichtspunkt her die islamische Kultur vor allem deswegen wichtig, weil sie die Aufzeichnungen der griechischen Wissenschaft für die späteren europäischen Forscher erhielt und weiter verbreitete. Das Christentum entdeckte die antike Wissenschaft zuerst von den Arabern und hauptsächlich aus arabischen Übersetzungen. Der Titel *Almagest*, mit dem wir Ptolemäus' Hauptwerk bezeichnen, ist überhaupt nicht sein griechischer Name, sondern eine Zusammenziehung des arabischen Titels, den es von einem moslemischen Übersetzer des 9. Jahrhunderts erhielt.

Die Europäer entdeckten die antike Wissenschaft im Islam in einer Zeit des allgemeinen europäischen Aufschwunges wieder, der das spätere Mittelalter so wesentlich vom frühen, finsternen Mittelalter unterscheidet. Zum ersten Mal erreichte das Christentum eine gewisse politische Absicherung; damit verbunden war eine beträchtliche Zunahme der Bevölkerung und des Handels, besonders auch mit der moslemischen Welt. Die geistigen Kontakte mit dem Islam vervielfältigten sich mit der Zunahme des Handels. Neu erworbener Reichtum und Sicherheit boten die Möglichkeit, die neu eröffneten wissenschaftlichen Horizonte zu erforschen. Die ersten lateinischen Übersetzungen aus dem Arabischen wurden im 10. Jahrhundert vorgenommen, in den folgenden Jahrhunderten wurden sie immer zahlreicher. Spät im 11. Jahrhundert begannen sich Studenten aus ganz Europa in lockerer Weise, doch in stetig zunehmender Zahl zu versammeln, um einen Lehrer eine neue Übersetzung eines antiken Textes lesen und kommentieren zu hören. Im 12. und 13. Jahrhundert wurden diese ursprünglich informellen Zusammenkünfte so groß, daß Satzungen notwendig wurden, die aus ihnen Universitäten machten, eine neue in Europa geschaffene Form von wissenschaftlicher Institution. Die Universitäten begannen als Zentren für die mündliche Weiterverbreitung antiken Wissens, doch wurden sie schnell die Heimstätte einer neuen schöpferischen Tradition europäischer Gelehrsamkeit, der als Scholastik bekannten kritischen und kämpferischen philosophischen Richtung.

Die Neuentdeckung antiker Astronomie war Teil der umfassenderen Wiederentdeckung von Wissenschaft und Philosophie der Antike. Die ersten astronomischen Tabellen, die in Europa allgemein verwendet wurden, sind im 11. Jahrhundert aus Toledo importiert worden. Der *Almagest* des Ptolemäus und die meisten astronomischen und physikalischen Schriften

des Aristoteles wurden im 12. Jahrhundert ins Lateinische übersetzt und im folgenden Jahrhundert kontinuierlich in den Lehrplan der mittelalterlichen Universitäten aufgenommen. Kopernikus studierte sie am Ende des 15. Jahrhunderts. Sein Studium dieser Klassiker der antiken Wissenschaft machte ihn zum Erben von Aristoteles und Ptolemäus. Doch hätten sie die Erbschaft des Kopernikus kaum als ihr eigenes Werk erkannt. Alte, zwar noch ungelöste Probleme waren verschwunden, neue, wenn auch manchmal bloße Scheinprobleme, hatten ihre Stelle eingenommen. Zusätzlich unterschieden sich die Absichten und Methoden der wiederbelebten Forschung deutlich von denen, die die antiken Forscher geleitet hatten.

Einige der neuen Probleme lagen bloß im Text. Antike Schriften wurden stückweise in einer vom Zufall diktierten Reihenfolge entdeckt. Arabische Manuskripte waren selten treue Übersetzungen griechischer oder syrischer Quellen; das mittelalterliche Latein, in das sie rückübersetzt wurden, hatte zunächst nicht das Vokabular, das der technischen und abstrakten Materie adäquat war; sogar gute Übersetzungen wurden durch wiederholte Transkription von Leuten, die sie nicht vollständig verstanden hatten, immer schlechter. Es war oft schwierig und manchmal unmöglich herauszufinden, wie Aristoteles oder Ptolemäus eine spezielle Frage beantwortet hatten. Und doch bestanden die mittelalterlichen Scholaren immer wieder auf der Rekonstruktion antiker Gedanken, bevor sie ein eigenes Urteil wagten. Die Brillanz, der Umfang und die Logik ihrer unerwarteten Erbschaft blendete die Menschen, die aus dem finsternen Mittelalter kamen. Sie fühlten, daß ihre erste Aufgabe die Aufnahme ihres Erbes war. Probleme der Interpretation nahmen daher im scholastischen Denken großen Raum ein.

Die Aufgabe des mittelalterlichen Wissenschaftlers wurde zusätzlich durch eine verkürzte geschichtliche Perspektive erschwert. Er erwartete, ein umfassendes und widerspruchsfreies System von Wissen wiederzuentdecken, das nach dem Vorbild des Aristoteles geschaffen war, und er erkannte selten, daß die Antike in zahlreichen Detailfragen verschiedene Meinungen hatte. Obwohl die Scholastiker es nicht gerne zur Kenntnis nahmen (oft hielten sie Übersetzungs- oder Überlieferungsfehler für die Ursache), war Aristoteles selbst nicht immer konsistent gewesen. Auch hatten seine Zeitgenossen nicht alle seine Ansichten geteilt. Gelegentliche Mehrdeutigkeiten und Widersprüche hatten die antique Tradition von Anfang an gekennzeichnet. Ihr Umfang wurde von den hellenistischen und islamischen Kommentatoren beträchtlich erweitert, deren Werke, die in den 15 Jahrhunderten zwischen Aristoteles und seinen europäischen Schülern geschrieben worden waren, nun wieder entdeckt wurden, hin und wieder noch vor deren Vorbildern.

Uns erscheinen diese Unverträglichkeiten in der Tradition natürliche Beiprodukte ihrer Entwicklung und Überlieferung, doch dem mittelalterlichen Gelehrten erschienen sie oft als innere Widersprüche in einem einzigen Kenntnisbereich, eben der hypothetischen „antiken Weisheit“. Zum Teil wegen dieser Verwirrung wurde der Vergleich und die kritische Auseinandersetzung mit im Konflikt stehenden Autoritäten ein wesentlicher Zug des scholastischen Denkens. Wie wir noch sehen werden, war die wiederbelebte Tradition der Gelehrsamkeit weniger empirisch, sondern mehr verbal logisch und rational, als ihr antikes Gegenstück.

Eine der Inkonsistenzen der traditionellen Theorie spielte eine besonders bedeutsame Rolle in der Entwicklung der Astronomie: der scheinbare Konflikt zwischen den Kugeln der aristotelischen Kosmologie und den Epizykeln und Deferenten der ptolemäischen Astronomie. Wir haben bisher noch nicht erwähnt, daß dies die wesentlichen Züge zweier antiker Kulturstufen waren: der hellenischen und der hellenistischen. Die hellenische Kultur hatte ihren Schwerpunkt am griechischen Festland zur Zeit, als Griechenland das Mittelmeer dominierte. Die damit verbundene Wissenschaft verwendete qualitative Methoden und hatte kosmologische Zielsetzungen. Aristoteles war ihr größter Vertreter, auch ihr letzter. Knapp vor seinem Tod fand die Entwicklung der hellenischen Wissenschaft ein vorzeitiges Ende, als Alexander der Große Griechenland eroberte und es einem großen Reich einverlebte, das schließlich auch Kleinasien, Ägypten und Persien bis zum Indus umfaßte. Die hellenistische Zivilisation, die aus den Eroberungen Alexanders hervorging, hatte ihren Mittelpunkt in Handelszentren wie Alexandria. Dort verbanden Gelehrte aus vielen Nationen und Rassen Elemente ihrer verschiedenen Kulturen, um eine Wissenschaft zu schaffen, die weniger philosophisch, jedoch mehr mathematisch als ihre hellenische Vorgängerin war. Die Astronomie zeigt diesen Kontrast. Das kosmologische Denken der antiken Astronomie ist zum Großteil ein Ergebnis der hellenischen Tradition, die in den Arbeiten des Aristoteles ihren Höhepunkt fand. Die mathematische Astronomie von Hipparch und Ptolemäus gehörten zur hellenistischen Tradition, die in der Astronomie eine kurze Blüte von etwa zwei Jahrhunderten nach dem Tode des Aristoteles fand.

Die hellenistischen Astronomen, die das Universum vermaßen, die Sterne katalogisierten und mit dem Problem der Planeten kämpften, standen einer Kosmologie nicht gleichgültig gegenüber, die ihre hellenischen Vorfahren entwickelt hatten. Doch waren sie nicht sehr um kosmologische Details bemüht. Sie machten die Autoren von Kosmologien lächerlich, die sich radikal von den üblichen unterschieden. Nur gelegentlich schrieben sie

auch eigenständige kosmologische Abhandlungen. Ptolemäus selbst verfaßte ein kosmologisches Werk, die *Hypothesen über die Planeten*, die eine nicht sehr befriedigende, physikalische Erklärung der Epizykelbewegungen beinhalteten. Doch bei der Formulierung mathematischer Systeme zur Vorhersage von Planetenörtern dachten die hellenistischen Astronomen selten über die Möglichkeit nach, mechanische Modelle für ihre geometrischen Konstruktionen zu finden. Für sie war die physikalische Realität der Kugelschalen und der Mechanismus, der die Planeten auf ihnen kreisen läßt, zu einem zweitrangigen Problem geworden. Kurz gesagt, die hellenistischen Wissenschaftler hatten sich mit einer teilweisen Trennung von Astronomie und Kosmologie abgefunden. Eine befriedigende mathematische Methode zur Vorhersage von Planetenpositionen mußte nicht völlig den psychologischen Ansprüchen kosmologischer Glaubwürdigkeit entsprechen.

Im 16. Jahrhundert bot diese Trennung für Kopernikus einen wichtigen Präzedenzfall. Auch er sah die Astronomie als eine im wesentlichen mathematische Disziplin an, das physikalische Problem eines bewegten Epizykels in einem Universum aus Sphären konnte ihm eine leichte Vorwegnahme des analogen Problems der bewegten Erde erscheinen. Doch dies war nicht die erste Auswirkung dieser Trennung. Vier Jahrhunderte zuvor, als Aristoteles und Ptolemäus von den Europäern wiederentdeckt wurden, hatten sie ebenso den Weg zu einer Revolution geebnet, wenn auch in sehr verschiedener Weise. Wegen ihrer Unkenntnis der vorhergegangenen Jahrhunderte erschienen den Scholastikern Aristoteles und Ptolemäus nahezu als Zeitgenossen. Sie galten als Vertreter einer einzigen Tradition der „antiken Gelehrsamkeit“, und die Unterschiede zwischen ihren Lehrgebäuden wurden zu Inkonsistenzen innerhalb einer einzigen Lehre. Änderungen, die Ptolemäus als natürliche Entwicklung des Wissens im Laufe der fünf Jahrhunderte seit Aristoteles aufgefaßt hatte, erschienen den Scholastikern oft als Widersprüche, und sie führten beim Versuch ihrer Auflösung wieder zu neuen Problemen. Da sich im Laufe der Zeit eine einheitliche Deutung als undurchführbar erwies, weckten diese scheinbaren Widersprüche genau wie andere Konflikte im mittelalterlichen Denken schließlich Zweifel an der gesamten Überlieferung.

Durch ihre Wiedererweckung im Mittelalter hatte die antike Wissenschaftsüberlieferung ein neues Aussehen erhalten. Die vorangegangenen Seiten zeigen einige wichtige Neuerungen auf, die sich schon aus der Notwendigkeit der Wiederentdeckung ableiten. Doch gab es auch wesentlichere Änderungen in der wiederbelebten Tradition, Änderungen, die aus wesentlichen Zügen des Mittelalters und der Renaissance stammten. Zum Beispiel waren die führenden intellektuellen Bewegungen theologischer Art, obwohl

die Naturwissenschaft einen großen Anteil am Denken im späteren Mittelalter hatte; daher gab die Ausübung der Wissenschaft in einem theologischen Milieu den Stärken und Schwächen der wissenschaftlichen Überlieferung neue Aspekte. Zudem war die mittelalterliche Naturwissenschaft keineswegs statisch. Die scholastischen Kritiker des Aristoteles entwickelten wichtige Alternativen zu einigen seiner Ansichten. Einige davon bereiteten den Weg für Kopernikus. Im 16. Jahrhundert waren weitere Kräfte am Werk – intellektuelle, wirtschaftliche und soziale –, wovon einige in direkter Beziehung zu den Problemen der Astronomie und der Bewegung der Erde standen. Wir wollen uns ihnen nun zuwenden.

### *Astronomie und die Kirche*

Während des Mittelalters und eines Großteils der Renaissance war die katholische Kirche die dominierende geistige Autorität Europas. Die europäischen Gelehrten des Mittelalters waren Mitglieder des Klerus, die Universitäten waren kirchliche Schulen. Vom 4. Jahrhundert bis zum 17. Jahrhundert bestimmte die Haltung der Kirche gegenüber der Wissenschaft und der Frage nach der Struktur des Universums den Fortschritt der Astronomie. Doch war die Haltung der Kirche im Laufe dieser Jahrhunderte nicht einheitlich. Nach dem Frühmittelalter begann die Kirche eine Wissenschaftstradition zu unterstützen, die in ihrer Abstraktion, Spitzfindigkeit und Rigorosität völlig neu war. Im Gegensatz dazu war die Kirche vor dem 10. Jahrhundert und nach dem 16. Jahrhundert antiwissenschaftlich eingestellt. Die kopernikanische Theorie entwickelte sich im Rahmen der von der Kirche unterstützten wissenschaftlichen Tradition; Kopernikus selbst war der Neffe eines Bischofs und war Domherr zu Frauenburg. Doch im Jahre 1616 verbot die Kirche alle Bücher, die zu Gunsten der Existenz der Erdbewegung verfaßt wurden. Man kann den beherrschenden Einfluß der Kirche auf die Wissenschaft nicht mit einem allgemeinen Satz beschreiben, denn der Einfluß der Kirche wandelte sich mit ihrer veränderten Situation.

In den frühen Jahrhunderten des Christentums waren die Kirchenväter Kreuzfahrer und Missionare für einen neuen Glauben, der um seine Existenz kämpfte. Gerade dies erforderte, daß sie die heidnische Gelehrsamkeit ihrer Vorgänger ablehnten und die Aufmerksamkeit der rasch schrumpfenden Zahl der Wissenschaftler hauptsächlich auf die Probleme der christlichen Theologie lenkten. Zusätzlich glaubten sie zutiefst, daß die Bibel und ihre Auslegung bereits alles Wissen enthielten, das für die Erlösung notwendig

war. Naturwissenschaft war für sie eine weltliche Wissenschaft. Außer, wenn sie für das tägliche Leben wesentlich war, war sie in bestem Fall nutzlos, gefährlich ablenkend im schlimmsten Fall. Daher rät der heilige Augustinus, der einflußreichste der frühen Kirchenväter, in seinem *Enchiridion*, einem Handbuch für die Christen, dem Gläubigen folgendes:

„Wenn dann die Frage gestellt wird, was wir angesichts der Religion glauben sollen, ist es nicht notwendig, die Natur von Dingen zu erkunden, wie es von denen gemacht wurde, die die Griechen **Physici** nennen. Es braucht uns nicht zu beunruhigen, wenn der Christ die Bedeutung und die Anzahl der Elemente nicht weiß, ebenso die Bewegung, die Ordnung und die Verfinsterungen der Himmelskörper, die Gestalt des Himmels, die Arten der Tiere, Steine, Pflanzen, Quellen, Flüsse und Gebirge, die Zeitmessung und Abstandsmessung, die Anzeichen kommender Stürme, und tausend andere Dinge, die jene Philosophen entweder gefunden haben oder glaubten, gefunden zu haben. Für den Christen genügt es zu glauben, daß die einzige Ursache aller geschaffenen Dinge, ob am Himmel oder auf Erden, ob sichtbar oder unsichtbar, die Güte des Schöpfers ist, des einen wahren Gottes; und daß außer Ihm nichts existiert, das nicht seine Existenz von Ihm ableitet.“<sup>1</sup>

Diese Haltung vertrug sich zumindestens vor den moslemischen Invasionen durchaus mit einem bewundernswerten Wissen antiker Gelehrsamkeit. Augustinus hatte die griechische Wissenschaft aufmerksam studiert, seine Schriften beweisen seine Bewunderung für ihre Genauigkeit und ihre Themen. Doch seine Haltung ließ die aktive Erforschung wissenschaftlicher Probleme nicht zu. Sie gab weiteren negativen Stellungnahmen Rückhalt. In den Schriften der weniger liberalen Zeitgenossen und Nachfolger des Augustinus wird seine spirituell begründete Geringschätzung der heidnischen Wissenschaft meist mit einer völligen Ablehnung ihres Inhalts verbunden. Astronomie war wegen ihrer Beziehung zur Astrologie besonders betroffen, denn die Determiniertheit der Astrologie ließ sie unvereinbar mit der christlichen Lehre erscheinen.

Zu Beginn des 4. Jahrhunderts widmete zum Beispiel Lactantius, der Erzieher des Sohnes von Kaiser Konstantin, das 3. Buch seiner *Göttlichen Satzungen* der „falschen Weisheit der Philosophen“ und verwendete ein ganzes Kapitel darauf, die Vorstellung von der Kugelgestalt der Erde lächerlich zu machen. Ihm genügte es, auf die Unsinnigkeit der Vorstellung einer Gegend hinzuweisen, in der die Menschen kopfüber hinunterhingen, und auf die

Unmöglichkeit, daß der Himmel unter der Erde sei. Später, im selben Jahrhundert erreichte der Bischof von Gabala denselben Effekt mit Bibelzitaten. Der Himmel ist keine Kugel, sondern ein Zelt, oder Tabernakel, denn „ER ist es, der den Himmel wie einen Vorhang ausspannt und wie ein Zelt als Behausung ausbreitet.“ (Jesaja 40: 22). Es gibt „Wasser über dem Firmament“ (Genesis 1: 7). Die Erde ist flach, denn „die Sonne hatte sich über die Erde erhoben, als Lot Zoar betrat“ (Genesis 19: 23). Um die Mitte des 6. Jahrhunderts konnte Kosmas, ein Mönch aus Alexandria, das heidnische System durch eine ausgearbeitete christliche Kosmologie ersetzen, die er hauptsächlich aus der Bibel ableitete. Sein Universum hat die Gestalt der Stiftshütte, die der Herr Moses in der Wildnis bauen ließ. Es hat einen flachen Boden, senkrechte Wände und ein tonnenförmiges Dach, wie ein almodischer Reisewagen. Die Erde, der Fußschemel Gottes, ist eine rechteckige Ebene, doppelt so lang wie breit, sie ruht auf dem flachen Boden des Universums. Die Sonne bewegt sich nachts nicht unter der Erde, sondern sie ist von den nördlichsten Teilen der Erde verborgen, die höher als die südlicheren Regionen sind.

Die Vorstellungen von Männern wie Lactantius und Kosmas wurden niemals zur offiziellen kirchlichen Lehre. Sie haben auch das antike Kugeluniversum nicht vollständig verdrängt, das in Bruchstücken in wissenschaftlichen Enzyklopädien des Mittelalters überlebte. In der ersten Hälfte des Mittelalters gab es keine einheitliche Haltung des Christentums gegenüber der Kosmologie. Wissenschaft und Kosmologie waren nicht wichtig genug. Aber obwohl diese Kosmologien, eine Mischung aus naivsten Sinneswahrnehmungen und einer oberflächlichen Kenntnis der Bibel, niemals offiziellen Rang erhielten, so waren sie doch repräsentativ. Sie zeigen den Niedergang der weltlichen Gelehrsamkeit, der das frühe, finstere Mittelalter, charakterisierte, und sie bereiten uns auf die Überraschung und die Ehrfurcht vor, mit der später die christlichen Gelehrten die Wiederentdeckung antiken Wissens im 11. und 12. Jahrhundert begrüßten.

Als das christliche Europa die kulturellen und kommerziellen Beziehungen mit der Ostkirche in Byzanz und mit den Mohamedanern in Spanien, Syrien und Afrika wieder aufnahm, hatte sich die Haltung der Kirche gegenüber der heidnischen Wissenschaft gewandelt. Der Großteil des europäischen Kontinents war bekehrt, und die intellektuelle und spirituelle Autorität der Kirche unangefochten; die Hierarchie der kirchlichen Verwaltung war fixiert. Die weltliche und heidnische Wissenschaft stellten keine Bedrohung mehr dar, vorausgesetzt die Kirche konnte ihre intellektuelle Führerrolle behaupten, indem sie letztere absorbierte. Die neue wirtschaft-

liche Blüte erlaubte es Klerikern daher, einen Teil ihrer Zeit intensivem Studium der wiederentdeckten Wissenschaft zu widmen. Indem sie den Umfang an Wissen erweiterten, der einem christlichen Gelehrten zustand, bewahrten sie durch fünf weitere Jahrhunderte das katholische Monopol der Wissenschaft. Im 12. Jahrhundert wurde wieder „die Natur der Dinge“, Himmel und Erde eingeschlossen, zu Themen intensiven Studiums. Im 13. Jahrhundert, wenn nicht sogar früher, wurde in groben Zügen das Zwei-Kugel-Universum in den Diskussionen gebildeter Christen wieder als gültig angenommen. In den letzten Jahrhunderten des Mittelalters bildete ein vollkommen aristotelisches Universum den Rahmen christlichen Lebens, sowohl des irdischen, als auch des himmlischen.

Wir nannten den Prozeß, in dem die Christen erkannten, daß sie in einem aristotelischen Universum lebten, eine „Erneuerung“ der antiken Wissenschaft, doch ist dies offensichtlich nicht das richtige Wort. Was vorging, war nahezu ein Umsturz im christlichen Denken und in der antiken wissenschaftlichen Überlieferung.

Vom 4. Jahrhundert an waren Aristoteles, Ptolemäus und andere griechische Autoren, von den Klerikern angegriffen worden, weil zwischen ihren kosmologischen Meinungen und der heiligen Schrift ein Konflikt bestand. Diese Konflikte bestanden auch noch im 12. und 13. Jahrhundert. Man wußte um sie. Im Jahre 1210 verbot ein Provinzkonzil zu Paris die Lehre der aristotelischen Physik und Metaphysik. Das vierte Lateran-Konzil erließ ein ähnliches, wenn auch eingeschränkteres Verbot gegen Aristoteles. Andere Verbote gingen vom heiligen Stuhl im Laufe des Jahrhunderts aus. Sie waren erfolglos. Ihre Befolgung erstreckte sich bloß auf Lippendienst, doch sie sind bezeichnend. Die Edikte beweisen die Unmöglichkeit, in einfacher Weise die weltliche antike Wissenschaft der mittelalterlichen Theologie hinzuzufügen. Mittelalterliche Texte und die heilige Schrift erforderten Modifikationen, bevor aus ihnen eine neue zusammenhängende christliche Lehre entstehen konnte. Danach war die Theologie ein wichtiges Bollwerk für das antike Konzept einer im Mittelpunkt ruhenden Erde.

Die physikalische und kosmologische Struktur des neuen christlichen Universums war vor allem eine aristotelische. Der heilige Thomas von Aquin (1225–1274), der Scholastiker, der am meisten zu der endgültigen Gestalt der christlichen Lehre des Mittelalters beigetragen hat, beschreibt die Vollkommenheit der himmlischen Bewegungen mit Worten, die – von ihrer Klarheit abgesehen – von Aristoteles selbst stammen könnten:

„Es ist daher klar, daß das Material des Himmels auf Grund seiner Natur keine Erzeugung oder Vernichtung erfährt, da es die primäre Sorte von änderbaren Körpern ist und in seiner Beschaffenheit jenen Körpern am nächsten steht, die völlig ohne Wandel sind. [Der einzige wahrhaft unveränderliche Körper im christlichen Universum ist Gott, von dem sich alle Änderungen auf Erden und im Himmel ableiten.] Daher erfährt der Himmel nur das absolute Minimum an Veränderungen. Bewegung ist die einzige Art von Veränderung, die er erfährt, und diese Veränderung [im Gegensatz zur Änderung von Größe, Gewicht, Farbe] modifiziert seine innerste Natur nicht im geringsten. Außerdem ist seine Bewegung eine kreisförmige, und kreisförmige Bewegung ist die einzige, die das absolute Minimum an Veränderung hervorruft, weil der Kreis als ganzes seinen Platz nicht ändert.<sup>2</sup>

Aristoteles konnte nicht immer so buchstabengetreu übernommen werden. Viele Scholastiker fühlten sich zum Beispiel gezwungen, seinen Beweis der absoluten Unmöglichkeit eines leeren Raumes aufzugeben, weil er in willkürlicher Weise Gottes Allmacht einzuschränken schien. Kein Christ konnte die Ansicht des Aristoteles teilen, daß das Universum schon immer existiert hätte. Die ersten Worte der Bibel sind: „Am Anfang schuf Gott Himmel und Erde.“ Außerdem war die Schöpfung ein wesentlicher Teil der katholischen Erklärung für die Existenz des Bösen. Bei einem Gegenstand von solcher Bedeutung mußte Aristoteles zurückstehen; das Universum war zu einem bestimmten Zeitpunkt geschaffen worden. Doch noch öfter mußte die Bibel nachgeben, üblicherweise mußte sie einer metaphorischen Interpretation Platz machen. Etwa bei der Diskussion des Bibeltextes: „Es sei ein Firmament mitten in den Wassern, es seien die Wasser von den Wassern getrennt“ (Genesis 1: 6), beschrieb Thomas von Aquin zunächst eine kosmologische Theorie, die den wörtlichen Sinn der Passage erhält und setzt dann fort:

„Jedoch kann man sehen, daß diese Theorie aus manchen Gründen falsch ist, man kann sie nicht für den Sinn der heiligen Schrift halten. Man sollte statt dessen bedenken, daß Moses zu dem unwissenden Volk sprach, und daß er deshalb nur solche Dinge mitteilte, die den Sinnen zugänglich sind. Nun kann selbst der Ungebildetste mit seinen Sinnen begreifen, daß Erde und Wasser Körper sind, während es überhaupt nicht evident ist, daß Luft ebenso ein Körper ist ... Während also Moses Wasser und Erde erwähnt, erwähnt er die Luft nicht zusätzlich, um nicht vor unwissenden Leuten etwas zu sagen, das ihr Wissen überschreitet<sup>3</sup>.

Indem man „Wasser“ als „Luft“ oder „transparente Substanz“ las, rettete man die Bibel. Doch in diesem Vorgang wird die Bibel gewissermaßen zu einem Propagandainstrument, das für ein unwissendes Auditorium zusammengestellt ist. Dieser Trick ist typisch, und die Scholastiker verwendeten ihn immer wieder.

Die besondere Gründlichkeit, mit der Thomas von Aquin und seine Zeitgenossen die Aufgabe übernahmen, die Bibel und die antike Überlieferung in Einklang zu bringen, zeigt sich an den Schwierigkeiten, die sie mit der biblischen Beschreibung der Himmelfahrt hatten. Nach der Schrift fuhr Christus „über alle Himmel auf“, (Eph. 4, 10). Es gelang Thomas, dieses Stück der christlichen Lehre in ein Universum der Sphären einzupassen, doch mußte er dabei viele verschiedene Probleme lösen, unter ihnen folgende:

„Es scheint, daß es für Christus nicht möglich war, in den Himmel aufzufahren. Denn der Philosoph [Aristoteles] sagt (*Über die Himmel*, Buch II), daß **Dinge die in einem Zustand der Vollkommenheit sind, ihre Eigenschaften ohne Bewegung besitzen**. Doch Christus war in einem Zustand der Vollkommenheit. ... Folglich war er ohne Bewegung, doch die Himmelfahrt ist Bewegung. Daher war es für Christus nicht möglich, in den Himmel zu fahren.“

Weiters gibt es keinen Platz über dem Himmel, wie in *Über die Himmel* I bewiesen wird. Doch muß jeder Körper einen Platz einnehmen. Daher fuhr der Körper Christi nicht über alle Himmel auf. ...

Weiter können zwei Körper nicht denselben Platz besetzen. Da es also keine Passage von einem Platz zu einem anderen, außer durch den Zwischenraum gibt, scheint es, daß Christus nicht über die Himmel aufgefahren sein kann, außer [die Kristallsphären des] Himmels wären geteilt; das ist unmöglich.“<sup>4</sup>

Die Antworten des Thomas von Aquin brauchen uns nicht zu interessieren. Es sind die Einwände selbst, die verblüffend sind, besonders da die Himmelfahrt nur einer der Aspekte der Geschichte Christi ist, der Anlaß zu Problemen gab, und da Thomas von Aquin der bedeutendste von den zahlreichen Klerikern war, die sich damit beschäftigten. Sein Werk *Summa Theologica*, woraus die meisten der vorigen Zitate stammen, ist ein Kompendium christlichen Wissens, das oft in 12 dicken Bänden gedruckt wird. Darin kommt der Name Aristoteles (oder seine aufschlußreichere Bezeichnung als „der Philosoph“) immer wieder vor. Nur durch eine Vielzahl von Werken wie diesen konnte die antike Wissenschaft, besonders in ihrer aristotelischen Ausprägung, wieder ein Grundstein westlichen Denkens werden.

Thomas und seine Zeitgenossen bewiesen, wie christlicher Glaube mit einem Großteil antiker Wissenschaft vereinbar gemacht werden konnten. Indem sie Aristoteles zum Rechtgläubigen erklärten, ließen sie seine Kosmologie zu einem schöpferischen Element im christlichen Denken werden. Doch die Fülle der Einzelheiten ihrer Schriften verschleierte die Gesamtstruktur des neuen christlichen Universums, das im späten Mittelalter entstand. Wenn wir die tiefere Bedeutung verstehen wollen, die jenem geozentrischen Universum seinen festen Platz im Denken des Mittelalters und der Renaissance gab, so brauchen wir einen umfassenderen Überblick. Diesen kann man im 13. Jahrhundert kaum finden. Er entwickelte sich erst später und zeigte sich erstmalig, sicherlich jedoch am deutlichsten, in den Schriften des italienischen Dichters Dante, besonders in der *Göttlichen Komödie*.

Wörtlich genommen ist Dantes Gedicht eine Beschreibung der Reise eines Poeten durch das Universum, wie es sich ein Christ des 14. Jahrhunderts vorstellte. Die Reise beginnt an der Oberfläche der kugelförmigen Erde; schrittweise steigt man in die Erde durch die neun Kreise der Hölle ab, die die neun Himmelssphären darüber widerspiegeln. Die 9. Sphäre, die in der gesamten mittelalterlichen Astronomie aufscheint, wurde von den islamischen Astronomen den acht Sphären der antiken Kosmologie hinzugefügt, um der Präzession der Tag- und Nachtgleichen und der Bewegung des Himmelspoles Rechnung zu tragen (siehe den Technischen Anhang, Abschnitt 2). Im moslemischen System dreht sich die 9. Sphäre einmal in 24 Stunden, wie es im älteren System die Sternenkugel getan hatte. Man kommt in die verderbtesten aller Regionen, den Mittelpunkt des Universums, den Platz, der für den Teufel und seine Legionen bestimmt ist. Dante kehrt dann zur Oberfläche der Erde an einem Punkt zurück, der dem diametral entgegengesetzt ist, wo er in die Erde abgestiegen war, hier findet er den Berg des Purgatoriums, dessen Fuß sich auf der Erde befindet und dessen Spitze sich in die Himmelsregionen darüber ausdehnt. Auf seiner Reise durch das Purgatorium durchmisst der Dichter die irdischen Sphären von Luft und Feuer bis zu der Himmelsregion darüber. Schließlich durchwandert er jede der Himmelssphären, wobei er mit den Geistern, die sie bewohnen, Zwiesprache hält, bis er schließlich Gottes Thron in der letzten Sphäre erreicht. Der Rahmen für die *Göttliche Komödie* ist eine buchstäbliche Übertragung des aristotelischen Universums, das den Epizykeln des Hipparch und dem Gott der heiligen Kirche angepaßt worden war.

Für den Christen hatte jedoch das neue Universum sowohl symbolische als auch direkte Bedeutung, und es war dieser christliche Symbolismus, den Dante hauptsächlich aufzeigen wollte. Mit Hilfe von Allegorien erweckte

seine *Göttliche Komödie* den Eindruck, daß das mittelalterliche Universum keine andere Struktur als die aristotelisch-ptolemäische haben konnte. Nach seiner Beschreibung spiegelt das Universum mit seinen Sphären Hoffnung und Schicksal des Menschen wider. In jeder Hinsicht besetzt der Mensch eine wesentliche Zwischenposition in diesem Universum, das von einer hierarchischen Folge von Substanzen erfüllt ist, die vom trügen Lehm im Zentrum bis zum reinen Geist in der höchsten Sphäre reichen. Der Mensch besteht aus einem materiellen Körper und einer Geistseele: Alle anderen Substanzen sind entweder Materie oder Geist. Der Platz des Menschen ist ebenfalls in der Mitte: Die Oberfläche der Erde ist nahe an ihrem Zentrum voll Körperllichkeit und Verworfenheit, doch unter der himmlischen Peripherie, die sie symmetrisch umgibt. Der Mensch lebt in Schmutz und Unsicherheit, er ist der Hölle sehr nahe. Doch entspricht sein Platz einem Plan, denn er ist stets unter dem Auge Gottes. Sowohl die doppelte Natur des Menschen als auch sein Platz zwingen ihn zu einer Entscheidung, die das Christentum charakterisiert: Er kann seiner erdhaften körperlichen Natur hinunter an ihren natürlichen Platz im Mittelpunkt des Verderbens folgen, oder er kann seiner Seele nach oben durch die immer spirituelleren Sphären folgen, bis er Gott erreicht. Ein Kritiker Dantes hat einmal gesagt, daß in der *Divina Comedia* „das umfassendste aller Themen, das Thema von menschlicher Sünde und Erlösung, dem großen Plan des Universums angepaßt wird“<sup>5</sup>. Sobald diese Anpassung erreicht worden war, mußte jede Änderung in der Vorstellung vom Universum unausweichlich das Drama christlichen Lebens und Sterbens betreffen. Die Erde in Bewegung zu versetzen, bedeutete, die kontinuierliche Kette der Schöpfung zu zerbrechen.

Kein Aspekt mittelalterlichen Denkens ist schwieriger vorzustellen als der Symbolgehalt der Vorstellung, daß sich Natur und Schicksal des Menschen, der Mikrokosmos, in der Struktur des Universums, des Makrokosmos, widerspiegeln. Vielleicht können wir nicht mehr die volle religiöse Bedeutung erfassen, mit der diese Symbolik die aristotelischen Sphären bedacht hat. Doch können wir zumindest vermeiden, sie als bloße Metapher zu verwerfen, oder anzunehmen, daß sie keine aktive Rolle im christlichen Denken der Nichtastronomen gespielt hätte. Eines von Dantes Prosawerken, das zum Teil als Erklärung geschrieben worden war, um seinen Zeitgenossen die Interpretation seiner Verse zu erleichtern, schließt eine Beschreibung der Natur der Sphären und Epizykeln, die in der mittelalterlichen Astronomie verwendet wurden, mit den folgenden Worten:

„Jedoch über allen diesen [kristallischen Sphären] setzt der Katholik den empyreischen Himmel...; man hält ihn für unbeweglich, weil er in jedem seiner Teile bereits das enthält, was seine Beschaffenheit erfordert. Dies ist der Grund, daß sich das **Primum Mobile** [oder die 9. Sphäre] mit ungeheurer Geschwindigkeit bewegt: Weil die glühende Sehnsucht aller seiner Teile mit den Teilen dieses ruhigsten Himmels vereinigt zu sein, ihn mit solcher Heftigkeit rotieren läßt, daß seine Geschwindigkeit fast unvorstellbar ist. Und dieser ruhige und friedvolle Himmel ist der Wohnsitz jener höchsten Gottheit, die sich als einzige selbst in Vollkommenheit erblicken kann“.<sup>6</sup>

In dieser Passage legt der Astronom den Ort (in einer anderen die Abmessungen desselben) von Gottes Sitz fest. Er wurde zum Theologen, doch endete im 14. und 15. Jahrhundert die theologische Funktion des Astronomen nicht immer mit der Vermessung des Himmels. Dante und einige seiner Zeitgenossen wandten sich auch deshalb der Astronomie zu, um die Arten, gelegentlich sogar die Anzahl der Engel, festzustellen, die Gottes Reich bewohnten.

Dante selbst skizziert eine typische mittelalterliche Theorie des Zusammenhangs zwischen der Hierarchie der Geister und den Sphären in einer Passage aus dem *Gastmahl* (*Il convivio*), die der soeben gegebenen Beschreibung der Sphären unmittelbar folgt:

„Da im vorangegangenen Kapitel gezeigt worden ist, was dieser Himmel ist, und wie er in sich gegliedert ist, müssen wir noch diejenigen Wesen zeigen, die ihn bewegen. Man soll daher wissen, daß diese unmaterielle Wesen sind, das heißt, sie sind Geistwesen, das gewöhnliche Volk nennt sie Engel.... Ihre Zahl und ihre Hierarchien werden von den sich bewegenden Himmeln bestimmt, neun an der Zahl; der zehnte verkündet die Einheit und Ewigkeit Gottes. Daher sagt der Psalmist: „Die Himmel künden den Ruhm Gottes, das Firmament verkündet das Werk seiner Hände.“

Daher ist es vernünftig anzunehmen, daß die bewegenden Kräfte [die Wesen, die die Sphären bewegen] des Mondhimmels vom Stamme der Engel sind; jene des Merkur sind Erzengel; jene der Venus sind Thronengel. ... Von letzteren, denen die Herrschaft über diesen [Venus-] Himmel übertragen ist, gibt es nicht viele, die Kundigen sind sich über ihre Zahl nicht einig, da sie über die Bewegungen dieses Himmels keine Einhelligkeit erreichen; sie stimmen jedoch alle darin überein, daß ihre

Anzahl gleich jener der Umdrehungen sein muß. Letztere ist nach dem Buch **Über die Anhäufung der Sterne** drei: Eine, nach der sich der Stern auf seinem Epizykel dreht, die zweite, wonach sich der Epizykel und der ganze Himmel gleichmäßig mit der Sonne drehen, und drittens die gesamte Bewegung dieses Himmels, die der [Präzessions-]Bewegung der Sternenkugel von West nach Ost mit einem Grad in etwa hundert Jahren folgt, so daß es für diese drei Bewegungen drei bewegende Kräfte gibt, [die die drei Mitglieder der Engelschar der Thronengel sind]'.<sup>7</sup>

Sobald Engel für die Bewegung von Epizykeln und Deferenten verantwortlich werden, kann die Vielfalt der spirituellen Geschöpfe in Gottes Heerschar mit der Komplexität einer astronomischen Theorie zunehmen. Astronomie ist daher von der Theologie nicht länger zu trennen. Die Erde in Bewegung zu versetzen, mag eine Verschiebung von Gottes Thron notwendig machen.

### *Die scholastischen Kritiker des Aristoteles*

Die Auswirkungen mittelalterlicher Gelehrsamkeit waren nicht alle so konservativ wie jener Schritt, der die Theologie zu einem Bollwerk des Universums der Sphären gemacht hat. Aristoteles und seine Kommentatoren waren zwar stets der Ausgangspunkt scholastischer Forschung, doch oft auch nicht mehr als dies. Gerade die Intensität, mit der die aristotelischen Schriften studiert wurden, garantierte, daß Inkonsistenzen in der Aussage oder im Beweis bald erkannt wurden, und diese Inkonsistenzen waren oft die Quelle wichtiger schöpferischer Erfolge. Die mittelalterlichen Gelehrten hatten zwar kaum eine Vorahnung der neuen Astronomie und Kosmologie, die ihre Nachfolger im 16. und 17. Jahrhundert schufen, doch erweiterten sie die aristotelische Logik, sie entdeckten Fehler in seinen Beweisen und verworfen viele seiner Erklärungen, weil sie der Überprüfung durch die Erfahrung nicht standhielten. Dabei schufen sie eine Anzahl von Vorstellungen und Hilfsmitteln, die für das Werk von Männern wie Kopernikus und Galileo wichtig wurden.

Wichtige Vorwegnahmen kopernikanischer Gedanken kann man zum Beispiel in dem kritischen Kommentar zu Aristoteles' *Über die Himmel* finden, der im 14. Jahrhundert von Nicole Oresme geschrieben wurde, einem Mitglied der wichtigen Pariser Schule der Nominalisten. Die Methode des

Oresme ist typisch scholastisch. In seinem umfangreichen Werk wird der Text des Aristoteles in kleine Stücke gegliedert, jedes ein paar Sätze lang, und diese Fragmente werden mit langen kritischen und erklärenden Kommentaren versehen. Wenn der Leser das Werk gelesen hat, entdeckt er, daß Oresme mit Aristoteles fast in jedem wichtigen Punkt übereinstimmt, außer bei der Schöpfung. Doch die Gründe seiner Übereinstimmung sind völlig unklar: Seine brillante Kritik hat viele Beweise des Aristoteles zunichte gemacht und wichtige Alternativen für zahlreiche aristotelische Behauptungen aufgestellt. Diese Alternativen wurden von den Scholastikern selbst höchst selten akzeptiert, doch die mittelalterlichen Gelehrten diskutierten sie immer wieder, und dies half, ein Denkklima zu schaffen, in dem sich Astronomen versuchshalber eine bewegte Erde vorstellen konnten.

Oresme stand zum Beispiel dem Hauptargument des Aristoteles für die Einzigartigkeit der Erde sehr kritisch gegenüber<sup>8</sup>. Aristoteles hatte gesagt, wenn es zwei Erden im Raum gäbe (und wenn man die Erde zu einem Planeten macht, dann wird es sechs „Erden“ geben), würden sie beide zum Mittelpunkt des Universums fallen und dort eins werden, weil sich die Erde von selbst zum Mittelpunkt bewege. Oresme sagt, dieser Beweis sei ungültig, weil er eine Theorie der Bewegung voraussetze, die völlig unbewiesen sei. Vielleicht bewegt sich die Erde nicht von selbst zum Mittelpunkt, sondern einfach jedes Stück von ihr zu seinem benachbarten. Unsere Erde hat einen Mittelpunkt, und es kann dieser Punkt sein, zu dem Steine fallen, wo immer er sich im Universum befindet. Auf Grund dieser alternativen Theorie wird die natürliche Bewegung eines Körpers nicht von seinem Platz in einem absoluten aristotelischen Raum, sondern von seiner Lage relativ zu anderen Teilen der Materie bestimmt. Eine Theorie dieser Art war die Voraussetzung für die neuen kosmologischen Vorstellungen des 16. und 17. Jahrhunderts, in denen die Erde weder einzigartig noch im Mittelpunkt stehend gesehen wurde. Ähnliche Theorien sind in verschiedener Form den Arbeiten von Kopernikus, Galilei, Descartes und Newton gemeinsam.

Doch noch wichtigere Vorwegnahmen kopernikanischer Argumente findet man in der Kritik, die Oresme an der aristotelischen Widerlegung des Pythagoräers Heraklid übt, der die tägliche Bewegung der Sterne durch eine ostwärts gerichtete Drehung der im Mittelpunkt stehenden Erde erklärt hatte. Oresme glaubt nicht, daß sich die Erde dreht, zumindestens behauptet er es. Aber er will zeigen, daß die Wahl zwischen einer ruhenden und einer rotierenden Erde aufgrund des Glaubens getroffen werden muß. Er sagt, kein Argument, sei es logisch, physikalisch, oder aus der Bibel, könne die

Vorstellung einer täglichen Drehung der Erde widerlegen. Zum Beispiel könnte man aus der scheinbaren Bewegung der Sterne nichts schließen, sagt Oresme, und argumentiert folgendermaßen:

„Nun nehme ich an, daß eine örtliche Bewegung nur wahrgenommen werden kann, wenn ein Körper in bezug auf einen zweiten Körper eine andere Stellung einnimmt. Wenn sich zum Beispiel ein Mann in einem Boot **a** befindet, welches sich sehr gleichmäßig, schnell oder langsam, fortbewegt, und dieser Mann nichts anderes als ein zweites Schiff **b** sieht, welches sich genau gleich fortbewegt wie Schiff **a**, in dem er sich befindet, so wird es diesem Mann scheinen, daß keines der beiden Schiffe sich fortbewegt. Und wenn **a** stillsteht und **b** sich fortbewegt, so scheint es ihm, daß **b** sich fortbewegt, und wenn **a** sich fortbewegt und **b** stillsteht, so scheint es ihm wie vorhin, daß **a** stillsteht und **b** sich fortbewegt. Und wenn **a** eine Stunde lang stillstünde und **b** sich fortbewegte und darauf während der folgenden Stunde das Umgekehrte der Fall wäre, so könnte der Mann diesen Wechsel oder diese Veränderung nicht wahrnehmen, sondern er hätte immer den Eindruck, **b** bewegte sich; ...“

Ich sage deshalb, daß, wenn der obere der beiden erwähnten Weltteile heute – wie es geschieht – in täglicher Umlaufbewegung ist, und der untere nicht, und es morgen umgekehrt wäre, so daß der untere Teil sich bewegte und der obere, d. h. der Himmel stillstünde, daß wir dann diesen Wechsel nicht bemerken könnten, sondern alles ein und dasselbe zu sein schiene, heute und morgen. Und wir hätten immer den Eindruck, daß der Teil, auf dem wir uns befinden, ruhte, und der andere sich bewegte, so wie jemand in einem fahrenden Schiff glaubt, die Bäume bewegte sich.“<sup>19</sup>

Dieses Relativitätsargument spielt später eine bedeutende Rolle in den Schriften des Kopernikus und des Galilei. Oresme begnügt sich jedoch nicht damit. Seine Abhandlung hat die Zerstörung einer noch viel wichtigeren Ansicht des Aristoteles zum Ziel, nämlich des Schlusses auf die Unbeweglichkeit der Erde, weil ein senkrecht nach oben geworfenes Objekt stets zu der Stelle auf der Erdoberfläche zurückkehrt, von der es hochgeworfen wurde:

„Was das dritte Argument betrifft, welches komplizierter scheint und davon handelt, daß ein Pfeil oder Stein in die Luft geworfen wird, so könnte man sagen, daß der in die Höhe geschossene Pfeil sehr schnell

mit der Luft, die er durchdringt, nach Osten bewegt wird, mit der ganzen Masse des erwähnten untern Teils der Welt, die in täglicher Umlaufbewegung ist; deshalb fällt der Pfeil an seinen Ausgangspunkt zurück. Dies scheint so möglich zu sein; denn wenn sich jemand in einem schnell gegen Osten fahrenden Schiff befände, ohne daß er die Bewegung wahrnähme und er mit seiner Hand eine gerade Linie dem Schiffsmast entlang hinunterzöge, so schiene es ihm, seine Hand mache eine gerade Bewegung; und so scheint es uns auch mit dem Pfeil, der gerade hinauf- oder hinunterschießt.“<sup>10</sup>

Die berühmte Verteidigung des kopernikanischen Systems durch Galilei, der *Dialog über die zwei hauptsächlichen Weltsysteme* ist voll von Argumenten dieser Art, Galilei kann sehr wohl Hinweise ausgearbeitet haben, die von den scholastischen Vorläufern, Oresme eingeschlossen, stammen. Doch dies macht Oresme noch zu keinem Kopernikus. Er schließt nicht einmal auf die tägliche Drehung der Erde; er träumt von keiner Bahnbewegung um den Mittelpunkt des Universums, er hat keine Vorstellung von den Vorteilen, die die Astronomen aus der Vorstellung einer bewegten Erde gewinnen können. Daher teilt er auch nicht Kopernikus' Motiv, dies macht jedoch sein Werk um so erstaunlicher. Wenn Oresmes Argumente in den Schriften von Kopernikus und Galilei wiederkehren, haben sie eine andere, eine schöpferische Funktion. Diese Wissenschaftler wollten zeigen, daß sich die Erde *bewegen könnte*, um die Vorteile für die Astronomie auszunützen, wenn sie sich *tatsächlich bewegte*. Oresme wollte bloß zeigen, daß sich die Erde *bewegen könnte*. Er untersuchte nur den aristotelischen Beweis. Wie viele andere fruchtbare Beiträge der scholastischen Wissenschaft waren seine Argumente Ergebnisse der überragenden Rolle, die das spätmittelalterliche Denken Aristoteles zumaß. Die Menschen, die mit Aristoteles' Schlußfolgerungen übereinstimmten, untersuchten seine Beweise nur, weil sie vom Meister durchgeführt worden waren. Trotzdem halfen diese Untersuchungen oft bei dem schließlichen Fall des Meisters.

Allerdings wissen wir nicht sicher, ob Kopernikus oder Galilei Oresme gelesen haben. Die Tradition, die vom Wissenschaftler fordert, seine Quellen zu nennen, wurde erst spät nach der wissenschaftlichen Revolution des 16. und 17. Jahrhunderts eingeführt. Doch Aristoteles hatte viele Kritiker in der Scholastik; sie schrieben zahllose Manuskripte, die in den Jahren nach ihrem Tode immer wieder kopiert wurden. Fünfeinhalb Jahrhunderte nach der Abfassung des Kommentars von Oresme gab es noch immer sechs mittelalterliche handschriftliche Kopien, von denen einige auf das 15. Jahrhundert

datiert werden konnten. Zu Kopernikus' Lebzeiten müssen sie viel zahlreicher gewesen sein. Außerdem war die Weiterverbreitung scholastischer Kritik ein beständiger Prozeß. Wesentliche Konzepte, die in Paris im 14. Jahrhundert entstanden, können im selben Jahrhundert in Oxford nachgewiesen werden und in Padua im 15. und 16. Jahrhundert. Kopernikus studierte zu Padua, Galilei lehrte dort. Obwohl wir nicht wissen, ob Kopernikus Argumente seiner Schrift *De Revolutionibus* von Scholastikern entlehnt hat, so können wir nicht zweifeln, daß die Kritiker das Entstehen solcher Argumente erleichterten. Zumindestens ermöglichen sie es, daß Themen wie die Erdbewegung legitime Probleme akademischer Diskussionen wurden. Sehr wahrscheinlich waren einige von Kopernikus' Hauptargumenten von früheren und nicht erwähnten Quellen geborgt.

Diese Diskussion der Rolle von Oresme hat die typische Vorgangsweise scholastischer Kritik illustriert: Die Überprüfung aristotelischer Beweise und die Untersuchung möglicher alternativer Ansichten, die üblicherweise verworfen wurden, sobald ihre logische Möglichkeit bewiesen war. Doch nicht alle mittelalterliche Wissenschaft hatte diese beschränkte Kritikfähigkeit. Die Scholastiker führten auch einige neue Themen zur Untersuchung ein. Sie führten einige permanente Modifikationen in die aristotelische wissenschaftliche Tradition ein. Am wichtigsten waren sie auf dem Gebiet der Kinematik und Dynamik, der Lehre von der Bewegung schwerer Körper. Einige von Galileis wichtigsten Beiträgen, besonders sein Werk über fallende Körper, können durchaus als schöpferische Neuanordnung von früher verstreutem, von den mittelalterlichen Gelehrten unter Schwierigkeiten erarbeiteten physikalischen und mathematischen Einsichten betrachtet werden. Doch selbst vor dem 17. Jahrhundert, als Galilei sie zu einer neuen Dynamik verwob, hatte eine dieser Einsichten, die Impetustheorie der Bewegung, einen wesentlichen, wenn auch indirekten, Einfluß auf astronomische Gedanken.

Die Impetustheorie wurde auf den Trümmern einer der schwächsten Erklärungen in der Physik des Aristoteles errichtet, der Erklärung der Bewegung eines Geschosses. Aristoteles hatte geglaubt, daß ein Stein, wenn er nicht von einem äußeren Anstoß bewegt würde, entweder in Ruhe bleiben würde oder sich geradlinig zum Mittelpunkt der Erde bewegen würde. Für viele Erscheinungen war dies eine natürliche Erklärung, doch sie konnte nicht leicht dem beobachteten Verhalten eines Geschosses angepaßt werden. Ein Stein fällt nicht senkrecht zur Erde, wenn er aus der Hand oder mit einer Schleuder geworfen wird. Im Gegenteil, er setzt seine Bewegung in der ursprünglichen Richtung fort, selbst wenn sein Kontakt mit dem ursprünglichen

*Werfer, der Hand oder der Schleuder, unterbrochen ist.* Aristoteles wußte als guter Beobachter, wie sich ein Geschoß bewegt. Er versuchte seine Theorie durch die Vorstellung zu retten, daß die verdrängte Luft einen Schub verursachte, der die Bewegung des Projektils verlängerte. Er scheint mit dieser Lösung nicht besonders zufrieden gewesen zu sein, denn er hinterließ zumindest zwei widersprechende Versionen davon und benützte dazu stets auffallend viele Wörter. Doch für ihn war es niemals wichtig, seine wesentlichen Interessen lagen woanders: Er untersuchte das Projektil nur nebenbei, offensichtlich weil es seiner Theorie Schwierigkeiten bereiten könnte.

In der Tat schuf es fast augenblicklich Schwierigkeiten. Johann Philoponus, ein Kommentator aus dem sechsten Jahrhundert, von dem die früheste bekannte Ablehnung der aristotelischen Theorie stammt, führt seine eigene Impetustheorie auf den hellenistischen Astronomen Hipparch zurück. Die meisten anderen Kommentatoren hatten mit diesem Aspekt aristotelischen Denkens zumindest Schwierigkeiten. Vermutlich nahm niemand, der Autor eingeschlossen, diese Erklärung ernst. Doch erst im 14. Jahrhundert, als Schwierigkeiten mit dem aristotelischen Text eigenständige Probleme geworden waren, wurde das Problem des Geschosses vollständig erkannt und mittels einer beträchtlichen Modifikation der aristotelischen Theorie gelöst. Obwohl ihre Ursache ein irdisches Problem war, zeigte diese Modifikation beträchtliche Folgen für die Astronomie.

Das Problem und seine Lösung kann man in allen Einzelheiten aus *Fragen zu den acht Büchern des Aristoteles* (ein typischer Titel in der Scholastik), einem Werk des Lehrers von Oresme, Jean Buridan, rekonstruieren:

Man möchte wissen, ob ein Geschoß, nachdem es die Hand des Werfers verlassen hat, von der Luft bewegt wird, oder wovon sonst. ... Diese Frage halte ich für äußerst schwierig, weil Aristoteles sie meiner Meinung nach nicht gut gelöst hat. Denn er sagt, ... daß das Geschoß den Platz, an dem es war, schnell verläßt, und daß die Natur, die kein Vakuum zuläßt, rasch Luft hinterrein sendet, um das Vakuum aufzufüllen. Dabei stößt die Luft auf das Geschoß und treibt es vorwärts. Dies setzt sich eine gewisse Distanz beständig fort. ... Aber mir scheint, daß viele Erfahrungen diese Methode als wertlos zeigen. ...

Eine Lanze, die ein kegelförmiges Ende hat, so scharf wie ihre Spitze, wird sich nach dem Wurf genauso schnell bewegen, als ob sie kein scharfes Ende hätte. Doch sicherlich könnte die ihr folgende Luft nicht gegen das scharfe Ende so stoßen, da die Luft leicht durch die Schärfe des Endes geteilt würde. ...

So können und sollen wir sagen, daß dem Stein oder einem anderen Geschoß etwas mitgegeben wird, das die bewegende Kraft jenes Geschosses ist. Diese Erklärung ist offensichtlich besser als die Aussage, daß die Luft das Projektil bewegen sollte, denn die Luft scheint Widerstand zu leisten. ... Der Werfer gibt dem Körper einen gewissen Impetus oder eine bewegende Kraft mit, die in die Richtung wirken, in die der Werfer den Körper bewegte, entweder hinauf oder hinunter oder zur Seite oder im Kreis. Und um den Betrag, um den der Werfer den Körper schneller bewegt, erteilt er ihm einen größeren Impetus. Es ist genau jener Impetus, der den Stein fliegen läßt, nachdem der Werfer seine Aktion beendet hat. Aber der Impetus wird durch die Widerstand leistende Luft und durch die Schwere des Steines, die ihn in eine Richtung entgegen derjenigen lenkt, in die der Impetus ursprünglich gerichtet war, langsam verzehrt. Daher wird die Bewegung des Steines beständig langsamer, bis der Impetus so vermindert ist, daß die Schwere des Steines überwiegt und den Stein zu seinem natürlichen Platz hinunter bewegt. ...<sup>11</sup>

Dies ist nur ein Bruchteil von Buridans ausgefeilter Diskussion, und zahllose ähnliche Abhandlungen findet man in den Arbeiten seiner Nachfolger. Am Ende des 14. Jahrhunderts hatte die Impetuslehre in einer Form ähnlich der Buridans die aristotelische Dynamik im Werk der meisten mittelalterlichen Wissenschaftler ersetzt. Man lehrte sie in Padua zur Studienzeit des Kopernikus; Galilei lernte sie von seinem Lehrer Bonamico zu Pisa. Beide benützten sie – explizit oder implizit, wie es ihre Vorgänger und ihre Zeitgenossen machten. Die Impetustheorie spielte in vielfältiger Weise eine wesentliche Rolle bei der kopernikanischen Revolution.

Eine dieser Rollen haben wir bereits gesehen, ohne sie jedoch zu erkennen. Oresmes Widerlegung von Aristoteles' Hauptargument für die Unbeweglichkeit der Erde legt die Impetustheorie oder etwas ähnliches zugrunde. In der aristotelischen Bewegungslehre muß sich ein senkrecht geworfener Stein auf einem im Raum festen Radius bewegen. Wenn die Erde sich bewegt, während der Stein in der Luft ist, kann er sie nicht begleiten und wird daher nicht zu seinem Abwurfpunkt zurückkehren. Wenn jedoch die ostwärts gerichtete Bewegung der Erde dem Stein einen ostwärtsgerichteten Impetus mitgibt, während der Stein noch mit dem Werfer in Kontakt ist, wird dieser Impetus andauern und den Stein der Erde folgen lassen, auch wenn kein Kontakt zum Werfer besteht. Die Stoßtheorie erlaubt es der Erde, den irdischen Körpern einen inneren Antrieb mitzuteilen, und dieser Antrieb

gestattet es ihnen, der Erde zu folgen. Wie sein Lehrer Buridan glaubte Oresme an die Impetustheorie. Obwohl seine Widerlegung des Aristoteles die Theorie nicht explizit erwähnt, macht die Widerlegung ohne sie keinen Sinn. In den meisten Argumenten, die die Möglichkeit der Erdbewegung zulassen, ohne daß die irdischen Körper zurückbleiben, ist die irdische Impetustheorie in irgend einer Form impliziert.

Einige Anhänger der Impetustheorie erweiterten sie gleich von der Erde auf den Himmel. Dabei unternahmen sie einen zweiten großen Schritt zur kopernikanischen Auffassung, die noch bevorstand. Buridan sagte selbst in einem Abschnitt, der dem vorangegangenen Ausschnitt aus seinen *Fragen* fast unmittelbar folgt:

Da die Bibel nicht behauptet, daß intelligente Wesen die Himmelskörper bewegen, könnte man auch sagen, daß es nicht notwendig erscheint, die Existenz solcher Wesen anzunehmen. Man könnte genauso gut antworten, daß Gott, als er die Welt erschuf, jeden Himmelskörper nach seinem Plan in Bewegung versetzte und ihm dabei einen Impetus mitgab, so daß er sich auch weiterhin bewegte, ohne daß Gott sie nochmals bewegen mußte; daher ruhte er am siebenten Tag von seinem Werk aus und übertrug das Handeln und Leiden anderen. Die von Gott an den Himmelskörpern hervorgerufenen Bewegungen schwanden später nicht, da für die Himmelskörper keine Tendenz zu anderen Bewegungen besteht. Noch gab es Widerstand, der den Impetus verringern könnte.<sup>12</sup>

In Buridans Schriften wurden, vielleicht zum ersten Mal, Himmel und Erde zumindest versuchsweise einem einzigen Gesetz unterworfen. Derselbe Ansatz wurde von Buridans Schüler Oresme weitergeführt. Er nahm an, daß Gott die Himmelskörper bei der Schöpfung mit einem bestimmten Betrag an bewegender Kraft versehen hat, gerade so wie er den irdischen Dingen Gewicht gegeben hat. „Es ist genauso, wie wenn ein Mann eine Uhr baut und sie dann sich selbst überläßt. So richtete es Gott ein, daß sich der Himmel nach seinem Befehl beständig bewegen sollte.“<sup>13</sup> Doch den Himmel als irdischen Mechanismus, als ein Uhrwerk vorzustellen, das bedeutete einen Bruch der absoluten Unterscheidung zwischen superlunarer und sublunarer Region. Obwohl die Impetustheoretiker diese Anregung im Laufe des Mittelalters nicht weiter verfolgten, so war es doch genau diese Unterscheidung, die sowohl von Aristoteles als auch aus der Theologie stammte, die zerstört werden mußte, wenn die Erde zu einem Planeten werden sollte.

Die Möglichkeit der Erdbewegung und die teilweise Vereinheitlichung von irdischem und himmlischem Gesetz waren die zwei direktesten Beiträge der Impetustheorie zur kopernikanischen Revolution. Ihr wichtigster Beitrag jedoch war ein indirekter, auf den wir kurz im letzten Kapitel zurückkommen werden. Aufgrund ihrer Rolle in der Entwicklung der Newtonschen Dynamik verhalf die Impetustheorie der kopernikanischen Revolution mehr als ein Jahrhundert nach Kopernikus' Tod zu einem erfolgreichen Abschluß. Kopernikus gab im 16. Jahrhundert nur eine neue mathematische Beschreibung der Planetenbewegungen; er konnte aber nicht erklären, warum sich die Planeten gerade so bewegten. Daher machte seine mathematische Theorie ursprünglich keinen physikalischen Sinn, sondern stellte seine Nachfolger vor neue Probleme. Diese Probleme wurden erst von Newton gelöst, dessen Dynamik den fehlenden Schlußstein zum kopernikanischen mathematischen System gab, doch Newtons Dynamik hing noch mehr als die kopernikanische Astronomie von den früheren scholastischen Analysen der Bewegung ab.

Die Impetustheorie ist nicht gleichbedeutend mit der Newtonschen Dynamik, doch indem sie auf neue Probleme, neue Variable und neue Abstraktionen hinwies, bereitete sie den Weg für Newtons Werk. Vor der Impetustheorie hatten Aristoteles und auch das Experiment gezeigt, daß nur der Zustand der Ruhe von Dauer ist. Buridan und einige andere Impetustheoretiker erklärten, daß auch die Bewegung auf ewig andauern würde, würde sie keinen Widerstand erfahren. Sie unternahmen dabei einen großen Schritt in Richtung auf Newtons erstes Bewegungsgesetz. In einer Passage, die wir aus dem obigen Zitat weggelassen haben, setzte Buridan die Menge an Impetus in einem bewegten Körper dem Produkt aus der Geschwindigkeit des Körpers und seiner Materiemenge gleich. Das Konzept des Impetus wurde dem modernen Begriff des Impulses sehr ähnlich, wenn auch nicht identisch. In Galileis Werk werden die Worte „Impetus“ und „Impuls“ oft in vertauschbarer Weise benutzt. An anderer Stelle – um ein letztes Beispiel zu geben – kam Buridans Diskussion sehr nahe an die Aussage, daß das Gewicht eines frei fallenden Körpers in gleichen Zeitabschnitten gleiche Impetuszuwächse (und daher Geschwindigkeitszuwächse) hervorruft. Galilei war nicht der erste Nachfolger Buridans, der genau dies sagte und daraus mittels anderer analytischer Hilfsmittel der Scholastiker die Beziehung zwischen der Falldauer und der Fallhöhe ableitete. Solche Beiträge gaben der scholastischen Wissenschaft eine wichtige Rolle in der Entwicklung der Newtonschen Dynamik. Diese wiederum war die Krönung im Aufbau des neuen Universums, das von Kopernikus und seinen Nachfolgern geschaffen worden war.

Im 17. Jahrhundert, als sich ihre volle Tauglichkeit zum erstenmal zeigte, wurde die scholastische Naturwissenschaft von Menschen erbittert angegriffen, die ein völlig neues Weltbild schaffen wollten. Es erwies sich als leicht, die Scholastiker lächerlich zu machen. Dies ist bis heute an ihnen hängen geblieben. Die mittelalterlichen Wissenschaftler fanden ihre Probleme öfter in Büchern als in der Natur. Viele ihrer Probleme erscheinen heute nicht mehr als solche. Nach heutigem Standard betrachtet arbeiteten die Wissenschaftler des Mittelalters unglaublich ineffizient. Doch wie sonst hätte die Wissenschaft im Westen wiedergeboren werden können? Die Jahrhunderte der Scholastik waren jene Jahrhunderte, in denen gleichzeitig die Tradition der antiken Wissenschaft und der Philosophie wiederhergestellt, aufgenommen und auf ihre Tauglichkeit geprüft wurden. Sobald schwache Stellen entdeckt wurden, standen sie sogleich im Brennpunkt der ersten wirkungsvollen Forschung der modernen Welt. Die großen neuen wissenschaftlichen Theorien des 16. und 17. Jahrhunderts entstanden alle aus Anleihen, die scholastische Kritiker vom aristotelischen Gedankengebäude genommen haben. Die meisten dieser Theorien enthalten auch noch wichtige Vorstellungen, die die scholastische Wissenschaft hervorgebracht hat. Doch viel wichtiger als all dies ist die Haltung, die die modernen Naturwissenschaftler von ihren mittelalterlichen Vorgängern geerbt haben: Ein unbeschränkter Glaube an die Fähigkeit der menschlichen Vernunft, die Naturprobleme zu lösen. Wie Professor Whitehead einmal bemerkte: „Der Glaube an die Fähigkeit der Wissenschaft, der vor der Entwicklung der modernen Wissenschaftstheorie entstand, ist ein unbewußter Abkömmling der mittelalterlichen Theologie“.<sup>14</sup>

### *Astronomie zur Zeit des Kopernikus*

Bei der Diskussion der spätmittelalterlichen Modifikationen der aristotelisch-ptolemaischen Überlieferung haben wir fast nichts über die Planetenastronomie gesagt. Tatsächlich gab es sie in Europa zu dieser Zeit fast überhaupt nicht, teils wegen der Schwierigkeiten der mathematischen Texte, teils weil das Problem der Planeten so esoterisch erschien. Aristoteles' *Über die Himmel* beschrieb das gesamte Universum in relativ einfachen Ausdrücken; der *Almagest* des Ptolemäus handelte zum Großteil von den Berechnungen der Planetenpositionen. Obwohl die Werke von Aristoteles und Ptolemäus zum Ende des 12. Jahrhunderts bereits übersetzt waren, wurden die Logik, die Philosophie und die Kosmologie des Aristoteles viel rascher aufgenommen

als die weiterentwickelte ptolemäische Astronomie. Die Metaphysik des 13. Jahrhunderts wetteiferte mit der des Aristoteles. Physik und Kosmologie des 14. Jahrhunderts übertrafen die aristotelische Physik an Tiefe und logischer Geschlossenheit. Doch bis zur Mitte des 15. Jahrhunderts schufen die Europäer keine eigenen astronomischen Leistungen. Die erste weitbekannte astronomische Abhandlung Europas, geschrieben um etwa 1233 von John of Holywood, kopierte sklavisch eine elementare arabische Abhandlung und widmete nur ein Kapitel den Planeten, während Ptolemäus ihnen neun widmete. Die nächsten zwei Jahrhunderte brachten nur Kommentare zu Holywoods Buch und einige erfolglose Rivalen hervor. Bis zwei Jahrzehnte vor Kopernikus' Geburt gab es wenig Anzeichen einer höher entwickelten Planetenastronomie. Sie zeigten sich in Werken wie denen des Deutschen Georg Peuerbach (1423–1461) und seines Schülers Johannes Müller (1436–1476).

Für die Europäer zur Zeit des Kopernikus bildete die Planetenastronomie daher nahezu ein neues Gebiet. Sie wurde in einem intellektuellen und sozialen Klima ausgeübt, das von allen, in denen Astronomie bisher ausgeübt worden war, völlig verschieden war. Zum Teil entstand dieser Unterschied aus den theologischen Zusätzen zur astronomischen Lehre, die wir in den Werken von Thomas und Dante kennengelernt haben. Noch wesentlichere Änderungen kamen durch die logische und kosmologische Kritik von Leuten wie Buridan und Oresme zustande. Dies waren mittelalterliche Beiträge, Kopernikus jedoch lebte nicht im Mittelalter. Seine Lebensspanne (1473–1543) erstreckte sich über die wesentlichen Jahrzehnte der Renaissance und der Reformation, und die Ansichten dieses Zeitalters waren wesentlich für den Beginn und die Durchführung seiner Arbeit.

Da alte Lehrmeinungen am leichtesten in Perioden allgemeiner Gärung aufgegeben werden, erleichterten die unruhigen Zeiten der Renaissance und der Reformation die astronomischen Neuerungen des Kopernikus. Ein Wandel in einem Gebiet schwächt die Vorurteile in einem anderen. Radikale Umwälzungen haben sich oft in der Wissenschaft in Zeiten nationaler oder internationaler Verwicklungen zugetragen, Kopernikus lebte in solch einer Zeit. Die Mohammedaner drohten wiederum, große Gebiete Europas in ihre Gewalt zu bringen, eines Europas, das von dynastischen Streitigkeiten am Übergang von den Feudalmonarchien zu den Nationalstaaten gelähmt war. Eine neue Handelsaristokratie begann sich in einer Zeit rascher wirtschaftlicher und technischer Änderungen neben den älteren Aristokratien des Klerus und des Adels zu entfalten. Luther und Calvin führten die ersten erfolgreichen Angriffe gegen die religiöse Vorherrschaft des Katholizismus. In einer Zeit

voll offensichtlicher Umstürze im politischen, sozialen und religiösen Leben könnte eine Neuerung auf dem Gebiet der Astronomie zunächst den Anschein erweckt haben, überhaupt keine Neuerung zu sein.

Andere, diese Epoche prägende Umstände hatten auf die Astronomie einen großen Einfluß. Bekanntlich war die Renaissance ein Zeitalter der Weltreisen und Entdeckungen. 50 Jahre vor Kopernikus' Geburt hatten die portugiesischen Reisen an der afrikanischen Küste begonnen, die Vorstellungskraft und die Habgier der Europäer zu wecken. Kolumbus' erste Landung in Amerika, als Kopernikus 19 Jahre alt war, krönte diese frühere Reihe von Entdeckungsreisen und schuf die Grundlage für die folgenden. Erfolgreiche Seefahrten erforderten verbesserte Seekarten und Navigationsmethoden, diese wiederum hingen von verbesserten astronomischen Kenntnissen ab. Prinz Heinrich der Seefahrer, der die frühen portugiesischen Reisen veranlaßte, ließ eines der ersten europäischen Observatorien errichten. Die Forschungsreisen hatten einen zweifachen Einfluß auf die Astronomie: Einerseits führten sie zu einem großen Bedarf an hervorragenden Astronomen, andererseits änderten sie deren Haltung gegenüber ihrem Forschungsgegenstand. Jede neue Reise enthüllte neue Länder, neue Güter, neue Völker. Man lernte rasch, wie falsch antike Beschreibungen der Erde sein konnten. Besonders lernte man, wie sehr Ptolemäus irren konnte, denn Ptolemäus war bis dahin als der größte Geograph, der größte Astronom und Astrologe angesehen worden. Das Bewußtsein – das wir auch bei Kopernikus entdecken werden –, daß der Renaissancemensch die ptolemäische Geographie korrigieren konnte, bereitete die Astronomen für die Veränderungen auf ihrem eigenen Gebiete vor.

Die Notwendigkeit einer Kalenderreform hatte einen noch direkteren und dramatischeren Einfluß auf die praktische Astronomie der Renaissance, denn das Studium von Kalendern zeigte den Astronomen die Unzulänglichkeit der bestehenden Rechentechniken. Die zunehmenden Fehler des Julianischen Kalenders waren längst bekannt, Vorschläge zur Kalenderreform datieren aus dem 13. Jahrhundert und früher. Doch diese Vorschläge blieben bis zum 16. Jahrhundert wirkungslos, als die zunehmende Größe politischer, wirtschaftlicher und administrativer Einheiten eine verbesserte Form des Kalenders erforderten. Die Reform wurde daher zu einem offiziellen kirchlichen Projekt. Die Folgen für die Astronomie findet man in der Biographie von Kopernikus selbst. Zu Beginn des 16. Jahrhunderts wurde Kopernikus gebeten, den Papst bei der Kalenderreform zu beraten. Er lehnte dies ab und drängte darauf, die Reform zu verschieben, denn er fühlte, daß die vorhandenen astronomischen Beobachtungen und Theorien die Konstruktion eines

verbesserten Kalenders noch nicht zuließen. Als Kopernikus die Probleme der Astronomie seiner Zeit zusammenfaßte, die ihn zu seiner neuen Theorie geführt hatten, begann er: „Denn erstens sind sie [die Mathematiker] über die Bewegung der Sonne und des Mondes so im Ungewissen, daß sie die ewige Größe des Jahres nicht abzuleiten ... vermögen.“ (Siehe Seite 137). Seiner Meinung nach erforderte die Reform des Kalenders eine Reform der Astronomie. Das Vorwort zu seinem Werk *De Revolutionibus* schloß mit dem Hinweis, daß seine neue Theorie einen neuen Kalender ermöglichen könnte. Der 1582 eingeführte Gregorianische Kalender fußte tatsächlich auf Berechnungen, die Kopernikus' Werk benützten.

Die Erkenntnis, daß die vorhandenen Rechentechniken in der Astronomie mangelhaft wären, wurde durch einen weiteren Umstand verstärkt. Während des 15. Jahrhunderts erlebte Europa eine zweite große intellektuelle Erneuerung, die mit einer zweiten Wiederentdeckung klassischer Vorbilder einherging. Im Gegensatz zu ihrem Vorläufer im 12. Jahrhundert war die Renaissance nicht primär eine wissenschaftliche Wiederbelebung. Ein Großteil der wiederentdeckten Dokumente bestand in antiker Literatur, Kunst und Architektur, Gegenständen, deren große Tradition zu dieser Zeit im Westen wenig bekannt war, weil die islamische Kultur ihnen uninteressiert gegenübergestanden war. Die im 15. Jahrhundert entdeckten Manuskripte schlossen jedoch einige wichtige Werke hellenistischer Mathematiker und – was noch wichtiger war – zahlreiche authentische griechische Versionen von wissenschaftlichen Klassikern ein, die vorher nur in Arabisch bekannt waren. Als eine Folge davon konnte das bekannte Unvermögen des ptolemäischen Systems, die Himmelsbewegungen korrekt vorherzusagen, nicht länger auf Fehler geschoben werden, die sich bei der Weitergabe und der Übersetzung angehäuft hätten. Die Astronomen konnten nicht länger glauben, daß die Astronomie seit Ptolemäus einen Niedergang erlitten hätte.

Peuerbach, um ein Beispiel zu nennen, begann seine astronomische Laufbahn, indem er den *Almagest* aus Übersetzungen zweiter Hand kennengelernte, die über den Islam nach Europa gekommen waren. Aus ihnen konnte er das ptolemäische System besser und vollständiger als bisher rekonstruieren. Doch überzeugte ihn seine Arbeit bloß davon, daß eine wirklich entsprechende Astronomie nicht aus arabischen Quellen abgeleitet werden konnte. Er fühlte, daß die Astronomen anhand griechischer Originale arbeiten müßten, und er stand vor dem Aufbruch zu einer Italienreise, um die vorhandenen Manuskripte zu studieren, als er 1461 starb. Seine Nachfolger, besonders Johannes Müller, arbeiteten anhand der griechischen Versionen und entdeckten dabei, daß selbst die ursprüngliche ptolemäische Formulierung

mangelhaft war. Indem die Gelehrten des 15. Jahrhunderts die unverstümmelten Schriften antiker Autoren zur Verfügung stellten, halfen sie den unmittelbaren Vorgängern des Kopernikus zu erkennen, daß die Zeit für eine Änderung reif war.

Entwicklungen wie die diskutierte geben einen Hinweis, warum die kopernikanische Revolution gerade zu jenem Zeitpunkt erfolgte. Sie sind wesentliche Teile des Klimas, in dem eine Wende in der Astronomie möglich war. Daneben gibt es andere, mehr intellektuelle Aspekte der Renaissance, die jedoch eine etwas verschiedene Rolle bei der Wende spielten. Sie hängen mit dem Humanismus zusammen, der dominierenden Gelehrtenbewegung jenes Zeitalters, und sie wirkten sich weniger auf den Zeitpunkt als auf den Ablauf der kopernikanischen Revolution aus. Der Humanismus war nicht nur eine wissenschaftliche Bewegung. Die Humanisten selbst standen oft in Widerspruch zu Aristoteles, zu den Scholastikern und zu der gesamten Tradition der universitären Bildung. Ihre Quellen waren die neu wiederentdeckten Klassiker, und – wie Literaten in anderen Zeitaltern – lehnten viele von ihnen die Wissenschaft insgesamt ab. Der frühe humanistische Poet Petrarch stimmt eine typische Weise an, die in sonderbarer Weise an die frühere Geringsschätzung der Wissenschaft durch Augustinus erinnert. „Selbst wenn alle diese Dinge wahr wären, würden sie uns keineswegs zu einem glücklicheren Leben verhelfen, denn welchen Nutzen hätten wir, die Natur von Tieren, Vögeln, Fischen und Reptilien zu kennen, wo wir über die Natur des Menschengeschlechtes nichts wissen und nicht wissen, woher wir kommen und wohin wir gehen.“<sup>15</sup> Wenn der Humanismus die einzige intellektuelle Bewegung der Renaissance gewesen wäre, hätte die kopernikanische Revolution sicher noch länger auf sich warten lassen. Die Werke von Kopernikus und seinen astronomischen Zeitgenossen gehörten genau zu der universitären Tradition, die die Humanisten lächerlich machen wollten.

Die Humanisten konnten jedoch die Naturwissenschaft nicht aufhalten. Während der Renaissance existierte eine starke humanistische Tradition außerhalb der Universitäten neben einer kontinuierlichen wissenschaftlichen Tradition innerhalb der Universitätsmauern. Die strenge antiaristotelische Haltung der Humanisten erleichterte es anderen, mit den Grundbegriffen der aristotelischen Wissenschaft zu brechen. Ein weiterer, noch wichtigerer Effekt war die überraschende Befruchtung der Wissenschaft durch das neuartige humanistische Denken. Dieser Aspekt des Humanismus, auf den das obige Zitat aus Petrach hinweist, scheint einige Wissenschaftler der Renaissance wie Kopernikus, Galilei und Kepler, auf zwei ganz und gar unaristotelische Gedanken geführt zu haben. Es sind dies ein neuer Glaube an die

Möglichkeit und die Bedeutung einfacher arithmetischer und geometrischer Regelmäßigkeiten in der Natur und eine neue Anschauung von der Sonne als der Quelle allen Lebens und aller Kräfte im Universum.

Die neue Denkweise des Humanismus leitete sich aus einer wohlbekannten philosophischen Überlieferung ab, die bereits Augustinus und andere frühe Kirchenväter wesentlich beeinflußt hatte, die jedoch durch die Wiederentdeckung der aristotelischen Schriften im 12. Jahrhundert vorübergehend in Vergessenheit geraten war. Diese Tradition sah im Gegensatz zur aristotelischen die Realität in einer veränderungslosen Welt des Geistes statt in den vergänglichen Angelegenheiten des täglichen Lebens. Plato, der die ursprüngliche Quelle dafür ist, scheint oft die Objekte dieser Welt als bloße Schatten einer ewigen Welt idealer Objekte oder „Formen“ aufgefaßt zu haben, die außerhalb von Raum und Zeit existieren. Seine Nachfolger, die sogenannten Neuplatoniker betonten diesen Zug im Denken ihres Meisters bis zur Ausschließlichkeit. Ihre mystische Philosophie, die sich zahlreiche Humanisten zum Vorbild nahmen, anerkannte bloß eine transzendentale Realität. Doch neben seinem Mystizismus enthielt der Neuplatonismus Elemente, die der Wissenschaft eine neue Richtung gaben.

Der Neuplatoniker wandte sich von der wandelbaren und vergänglichen Welt des alltäglichen Lebens zur ewigen Welt des reinen Geistes, und die Mathematik zeigte ihm den Weg dazu. Für ihn stellte die Mathematik das Ewige und Reale innerhalb der unvollständigen und fluktuiierenden Erscheinungen der irdischen Welt dar. Die Dreiecke und Kreise der Geometrie waren die Urtypen der platonischen Formen. Sie existierten nirgends – keine Linie, die auf einem Papier gezeichnet wird, erfüllt Euklids Postulate –, doch besaßen sie gewisse unvergängliche Eigenschaften, die nur die Vernunft entdecken konnte, und die nach ihrer Entdeckung schwach widergespiegelt in den Objekten der realen Welt beobachtet werden konnten. Die Pythagoräer, die in gleicher Weise die reale Welt als Schatten der ewigen Welt der Mathematik gedacht hatten, gaben ein Beispiel mit ihrer Entdeckung, daß gleichartige Saiten, deren Längen in den einfachen Zahlenverhältnissen von  $1 : 3/4 : 2/3 : 1/2$  stehen, harmonische Töne geben. Die mathematische Art neuplatonischen Denkens wird oft Pythagoras zugeschrieben.

Plato selbst betonte die Notwendigkeit der Mathematik als Verstandestraining zum Auffinden der Formen, über das Tor seiner Akademie soll er geschrieben haben: „Niemand ohne Kenntnisse der Geometrie soll diese Pforte durchschreiten“.<sup>16</sup> Die Neuplatoniker gingen weiter. Sie sahen in der Mathematik den Schlüssel zum Wesen Gottes, der Seele und der Weltseele, nämlich dem Universum. Eine typische Passage aus dem Neuplatoniker Proclus (5. Jahrhundert) zeigt einen Teil dieser mystischen Ansicht der Mathematik:

„Die Seele der Welt kann daher keinesfalls mit einer leeren Tafel verglichen werden, bar aller Vernunft; sondern sie ist eine auf immer beschriebene Tafel, die sich selbst die Zeichen einschreibt, aus denen sie eine ewige Fülle des Geistes ableitet ... Alle mathematischen Arten haben daher eine primäre Vorlage in der Seele, so daß etwa, bevor die Zahlen erkennbar werden, sie in ihrem Innersten gefunden werden können; ebenso Figuren, bevor sie sichtbar werden; auch ideale harmonische Verhältnisse, bevor die entsprechenden Töne erklingen; und unsichtbare Kreise, bevor sich die Körper noch in Kreisbahnen drehen. Wir müssen uns all das als auf ewig existierend vorstellen, als die Vorbilder der Zahlen, Figuren, Gedanken und Bewegungen. Und hier müssen wir der Lehre des Timaios folgen, der den Ursprung der Seele ableitet und ihre Beschaffenheit auf mathematische Formen zurückführt und in ihrem Wesen den Grund für alles existierende sieht“.<sup>17</sup>

Proclus und die Humanisten, die seine Argumentation übernahmen, haben wenig mit den Naturwissenschaften zu tun. Doch gelegentlich beeinflußten sie ihre mehr wissenschaftlich interessierten Zeitgenossen. Die Folge war eine neue Suche nach einfachen geometrischen und arithmetischen Gesetzmäßigkeiten in der Natur durch viele Wissenschaftler der späten Renaissance. Kopernikus' Freund und Lehrer zu Bologna, Domenico Maria De Novara, hatte gute Kontakte zu den Neuplatonikern in Florenz, die Proclus und andere Autoren seiner Schule übersetzten. Novara selbst gehörte zu den ersten, die die ptolemäische Planetentheorie mit neuplatonischen Argumenten kritisierten, da er glaubte, daß kein derart kompliziertes und umständliches System die wahre mathematische Ordnung der Natur darstellen könnte. Als Novaras Schüler Kopernikus feststellte, daß die ptolemäischen Astronomen, „das erste Prinzip der Gleichförmigkeit der Bewegung zu verletzen scheinen“ und daß sie unfähig gewesen wären, „die Hauptsache abzuleiten – nämlich die Gestalt des Universums und die unveränderliche Symmetrie seiner Teile“ (siehe S. 139), stand er in derselben neuplatonischen Tradition. Dieselbe Denkweise zeigt sich noch stärker in seinem großen Nachfolger Kepler. Wie wir sehen werden, zieht sich die Suche nach einfachen Zahlenbeziehungen durch die meisten von Keplers Werken und motiviert sie.

Der Ursprung der Verbindung zwischen Neuplatonismus und Sonnenverehrung liegt tiefer im Dunkeln, doch einen Hinweis kann man im vorangegangenen Zitat aus Proclus finden. Das neuplatonische Denken konnte niemals völlig auf die reale Welt verzichten. Die „ursprünglichen Figuren“ und „unsichtbaren Kreise“, die Proclus in der Weltseele annahm, mochten

die primären philosophischen Größen sein, die einzigen mit vollständiger Realität und Existenz. Doch der Neuplatoniker mußte den unvollkommenen Körpern, die seine Sinne wahrnahmen, eine gewisse Art von Existenz zubilligen. Er betrachtete sie als zweitklassige Kopien, die von den „ursprünglichen Figuren“ selbst erzeugt worden waren. Nach Proclus bestimmten die mathematischen Formen die Natur der Weltseele und waren gleichzeitig die Ursachen alles Existierenden. Sie erzeugten zahllose schlechte und materielle Kopien ihrer eigenen rein geistigen Substanz. Der Gott der Neuplatoniker war ein sich selbst vervielfachendes Prinzip, dessen ungeheure Potenz durch die Vielfalt der Formen bewiesen wurde, die von ihm ausgingen. Im materiellen Universum wurde diese fruchtbare Gottheit in passender Weise von der Sonne dargestellt, deren sichtbare und unsichtbare Ausstrahlungen Licht, Wärme und Fruchtbarkeit dem Universum gaben.

Diese symbolische Gleichsetzung von Sonne und Gott findet man häufig in der Literatur und Kunst der Renaissance. Marsilio Ficino, eine Hauptgestalt unter den Humanisten des 15. Jahrhunderts in Florenz, gab diesem Umstand eine typische Formulierung in seinem Werk *Über die Sonne*:

„Nichts zeigt die Natur des Guten [nämlich Gottes] vollständiger als das Licht [der Sonne]. Erstens ist das Licht das Strahlendste und Klarste aller wahrnehmbaren Objekte. Zweitens gibt es nichts, das sich so leicht so weit und so schnell ausbreitet wie Licht. Drittens durchdringt es alle Dinge ohne Schaden und äußerst sanft, wie eine Liebkosung. Viertens nährt die Wärme, die damit einhergeht, alle Dinge und ist damit der universelle Erzeuger und Beweger ... In ähnlicher Weise ist das Gute selbst überall ausgebreitet, und es versöhnt alle Dinge. Es wirkt nicht durch Zwang, sondern durch die Liebe, die es begleitet wie die Wärme (die das Licht begleitet). Diese Liebe durchdringt alle Objekte, so daß sie aus freien Stücken das Gute aufnehmen. ... Vielleicht ist das Licht der Gesichtssinn des Himmlischen Geistes, oder sein Sehakt, der aus der Ferne wirkt, der alle Dinge mit dem Himmel verknüpft, doch niemals den Himmel verläßt, noch sich mit äußeren Dingen vermischt. ... Ich bitte euch, Bürger des himmlischen Vaterlandes, blickt zum Himmel. ... Die Sonne kann euch Gott selbst verkünden, wer sollte wagen zu sagen, die Sonne sei falsch.“<sup>18</sup>

Ficino, aber auch Proclus, haben nichts mit Naturwissenschaft zu tun. Ficino scheint nichts von Astronomie zu verstehen. Obwohl die Sonne in seinem Universum eine neue Bedeutung hat, behält sie ihren alten Ort. Doch

war ihr dieser Ort nicht mehr angemessen. Ficino schrieb, daß die Sonne zuerst und im Mittelpunkt der Himmel geschaffen wurde. Sicherlich konnte keine geringere Position in Raum und Zeit mit der Würde und der schöpferischen Funktion der Sonne verträglich sein. Doch stand diese Position im Widerspruch zur ptolemäischen Astronomie. Die daraus entstehenden Schwierigkeiten der Neuplatoniker mögen Kopernikus geholfen haben, ein neues System zu entwerfen, das um eine zentrale Sonne aufgebaut war. Jedenfalls gaben sie ihm ein Argument zugunsten des neuen Systems. Sobald er die neue Position der Sonne diskutiert hatte, wies Kopernikus auf den Vorteil seiner neuen Kosmologie (s. S. 184) hin. Seine Vorbilder sind neuplatonisch:

In der Mitte aber von allen steht die Sonne. Denn wer wollte diese Leuchte in diesem wunderschönen Tempel an einen anderen oder besseren Ort setzen als dorthin, von wo aus sie das Ganze zugleich beleuchten kann? Zumal einige sie nicht unpassend das Licht, andere die Seele, noch andere den Lenker der Welt nennen. Trismegistos bezeichnet sie als den sichtbaren Gott, die Elektra des Sophokles als den Allessehenden. So lenkt in der Tat die Sonne, auf dem königlichen Thron sitzend, die sie umkreisende Familie der Gestirne.

Neuplatonismus äußert sich in der Haltung des Kopernikus sowohl gegenüber der Sonne, als auch gegenüber mathematischer Einfachheit. Er ist ein wesentliches Element im intellektuellen Klima, in dem seine Schau des Universums entstehen konnte. Doch ist es oft schwierig zu sagen, ob eine bestimmte neuplatonische Haltung vor oder nach der Erfindung seiner neuen Astronomie in Kopernikus' Gedanken auftrat. Ähnliche Probleme gibt es bei den späteren Anhängern des Kopernikus nicht. Kepler zum Beispiel, der Mann, der das Kopernikanische System vervollständigte, äußerte sich deutlich über seine Gründe, den Vorschlag von Kopernikus anzunehmen; einige dieser Gründe folgen:

„[Die Sonne] ist eine Quelle von Licht, reich an fruchtbarer Wärme, am schönsten und reinsten anzusehen, die Quelle des Sehens, der Maler aller Farben, obwohl selbst ohne Farben, als Ursache der Bewegung König der Planeten genannt, wegen seiner Kraft das Herz der Welt, wegen seiner Schönheit das Auge, und sie allein würden wir des höchsten Gottes für würdig erachten, sollte er an einem materiellen Wohnsitz Gefallen finden und einen Platz suchen, an dem er mit den geheiligen Engeln wohnt.... Denn wenn die Deutschen denjenigen als Kaiser

erwählen, der im ganzen Reich die meiste Macht hat, wer würde zögern, die Stimmen der himmlischen Bewegungen demjenigen zu geben, der bereits alle anderen Bewegungen und Änderungen durch die Wohltat des Lichtes, das gänzlich sein Besitz ist, lenkt? ... Daher kehren wir mit dem höchsten Recht zur Sonne zurück, die allein aufgrund ihrer Würde und Kraft für diese Bewegungsaufgabe geeignet ist, und wert ist, die Heimstätte von Gott selbst zu werden. ..." <sup>19</sup>

Bis nach Kopernikus' Tod bildeten die mathematische Magie und die Sonnenverehrung, die in Keplers Forschung so ausgeprägt sind, die Hauptberührungspunkte zwischen dem Neuplatonismus der Renaissance und der neuen Astronomie. Im späten 16. Jahrhundert vereinigte sich jedoch ein dritter Aspekt des Neuplatonismus mit der kopernikanischen Lehre und half, die Struktur des kopernikanischen Universums neu zu gestalten. Im Gegensatz zur Gottheit der Neuplatoniker, deren Vollkommenheit sich durch ihre ungeheure Fruchtbarkeit ausdrückte, stellten sich sowohl Thomas von Aquin als auch Aristoteles Gott als einen Architekten vor, der seine Vollkommenheit in der Ordnung und Schönheit seiner Schöpfung zeigte. Der Gott des Thomas von Aquin paßte gut zum endlichen Kosmos des Aristoteles, doch der Gott der Neuplatoniker ließ sich nicht so leicht begrenzen. Wenn Gottes Vollkommenheit durch das Ausmaß und die Vielfalt seiner Schöpfung gemessen wird, muß ein größeres und mehr besiedeltes Universum einem perfekteren Gott entsprechen. Für viele Neuplatoniker stand daher die Endlichkeit des aristotelischen Universums im Widerspruch mit Gottes Vollkommenheit. Sie fühlten, seine unendliche Güte würde nur durch einen unendlichen Schöpfungsakt befriedigt werden. Bereits vor Kopernikus war die entsprechende Vorstellung eines vielfach belebten, unendlich ausgedehnten Universums die Quelle wichtiger Abweichungen von der aristotelischen Lehre gewesen. Während der Renaissance mag die erneute Betonung von Gottes unendlicher Schöpfungskraft ein wesentliches Element im Geistesklima gewesen sein, das die Neuerung des Kopernikus hervorbrachte. Sicherlich war sie, wie wir später sehen werden, ein wichtiger Faktor beim Übergang vom endlichen kopernikanischen Universum zum unendlichen Raum von Newtons Weltmaschine in der Nachrenaissance.

Mit dem Neuplatonismus haben wir den Begriffsrahmen für die kopernikanische Revolution abgesteckt, zumindest soweit wir sie hier studieren wollen. Für eine Wende in der Astronomie war dieser Rahmen überraschend, er hatte nämlich nur wenige astronomische Eigenschaften, doch gerade dies machte ihn wichtig. Neuerungen in einer Wissenschaft brauchen nicht Ant-

worten auf neue Entdeckungen innerhalb dieser Wissenschaft zu sein. Keine fundamentale astronomische Entdeckung, keine neue Art astronomischer Beobachtung überzeugten Kopernikus von den Mängeln der antiken Astronomie und der Notwendigkeit eines Wandels. Etwa ein halbes Jahrhundert lang nach Kopernikus' Tod gab es keine wesentlichen Änderungen in den astronomischen Daten. Ein mögliches Verständnis für den Zeitpunkt der koperikanischen Wende und für die Faktoren, die sie auslösten, kann man nicht in der Astronomie, sondern nur außerhalb finden, nämlich in dem weiteren intellektuellen Milieu, innerhalb dessen die Astronomen arbeiteten. Wie wir zu Beginn des Kapitels festgestellt haben, begann Kopernikus seine kosmologischen und astronomischen Forschungen nahezu dort, wo Aristoteles und Ptolemäus aufgehört hatten. In diesem Sinne ist er der unmittelbare Nachfolger in der antiken wissenschaftlichen Tradition. Doch dauerte es nahezu 2000 Jahre, bis er seine Erbschaft anzutreten hatte. In der Zwischenzeit änderten sowohl der Prozeß des Wiederentdeckens, als auch die mittelalterliche Verschmelzung von Theologie und Naturwissenschaft, auch die Jahrhunderte scholastischer Kritik, schließlich auch die neuen Strömungen im Leben und Denken der Renaissance, die Haltung des Menschen gegenüber dem wissenschaftlichen Erbe, von dem sie in der Schule lernten. Wie groß und doch auch seltsam klein dieser koperikanische Beitrag sein konnte, werden wir im nächsten Kapitel besprechen.

## 5 Kopernikus' Neuerung

### *Kopernikus und seine Revolution*

Die Veröffentlichung der kopernikanischen Schrift *De Revolutionibus Orbium Caelestium* aus dem Jahre 1543 markiert den Umsturz im astronomischen und kosmologischen Denken, den wir die kopernikanische Revolution nennen. Bisher haben wir uns nur mit ihrem Hintergrund beschäftigt, wir haben den Rahmen beschrieben, in dem sie stattfand. Nun wenden wir uns dem Beitrag des Kopernikus selbst zu. Soweit wie möglich werden wir diesen Beitrag in seinen eigenen Worten kennenlernen, die wir aus *De Revolutionibus* entnommen haben, dem Buch, das die neue Astronomie der Welt präsentierte. Sehr bald werden wir die Schwierigkeiten und Unstimmigkeiten kennenlernen, auf deren Auflösung unser Verständnis der kopernikanischen Revolution beruht. Da diese Revolution aber in vieler Hinsicht typisch ist, werden wir damit auch jeden anderen größeren Umsturz der Begriffe in den Wissenschaften verstehen.

Das Werk *De Revolutionibus* ist für uns ein problematischer Text. Einige Probleme ergeben sich einfach aus den Schwierigkeiten des Gegenstandes. Außer dem einleitenden ersten Buch sind alle anderen Teile sehr mathematisch, so daß sie nur von einem technisch hoch ausgebildeten Astronomen gelesen werden können. Wir müssen seine im wesentlichen für den Fachmann bestimmten Beiträge in einer nicht mathematischen Umschreibung behandeln, ähnlich wie wir den *Almagest* behandelt haben. Wir werden dabei einige wesentliche Probleme vermeiden, vor die *De Revolutionibus* seine Leser des 16. Jahrhunderts gestellt hat. Hätte Kopernikus seine Theorie in der vereinfachten Form verkündet, in der wir sie häufig darstellen, so wäre ihre Aufnahme vermutlich ganz anders verlaufen. Widerstand kann sich bei einer leichter verständlichen Theorie schneller einstellen. Unser erstes Problem ist daher die Schranke, die der Mangel an technischem Wissen zwischen uns und den zentralen Teilen des Werkes errichtet.

Doch die Unklarheit von *De Revolutionibus* in technischer Hinsicht ist weder das schwierigste noch das wichtigste Problem im kopernikanischen Werk. Die Hauptschwierigkeiten, denen wir nicht ausweichen können, er-

geben sich aus dem offensichtlichen Zwiespalt zwischen diesem Buch und seiner Rolle in der Entwicklung der Astronomie. In seinen Konsequenzen ist *De Revolutionibus* zweifellos ein revolutionäres Werk. Von ihm leitet sich ein grundlegend neuer Zugang zur Planetenastronomie ab, die erste genaue und einfache Lösung des Planetenproblems und schließlich – mit einigen Zusätzen – eine neue Kosmologie. Doch jedem Leser, dem dieses Resultat bewußt ist, muß dieses Buch ein dauerndes Rätsel und Paradoxon sein, denn gemessen an seinen Konsequenzen, ist es ein relativ gesetztes, sachliches und unrevolutionäres Werk. Die wesentlichen Elemente, die wir uns von der kopernikanischen Revolution meist merken, leichte und genaue Berechnung der Planetenpositionen, die Aufgabe der Epizykeln und Exzenter, die Auflösung der Sphären, die Sonne als Stern, die unendliche Ausdehnung des Universums, diese und viele andere kann man nirgends in diesem Buch finden. Bis auf die Erdbewegung scheint *De Revolutionibus* den Schriften antiker und mittelalterlicher Astronomen und Kosmologen ähnlicher, als den Schriften der folgenden Generationen, die ihre Arbeit auf Kopernikus gründeten und die die radikalen Konsequenzen zogen, die Kopernikus noch nicht gesehen hatte.

Die Bedeutung von *De Revolutionibus* liegt also weniger darin, was dort gesagt wird, als in dem, wozu es Anlaß gab. Das Buch gab zu einer Revolution Anlaß, die sich in ihm kaum ankündigte. Es ist ein Buch, das einen Umsturz hervorruft, es ist aber kein revolutionäres Buch. Solche Bücher sind relativ häufige und bemerkenswerte Phänomene in der Entwicklung wissenschaftlichen Denkens. Man kann sie als Texte beschreiben, die die Richtung wissenschaftlichen Denkens verschieben. Eine solche Schrift steht auf dem Höhepunkt einer vergangenen Tradition, und bildet auch die Quelle einer zukünftigen Tradition. Im ganzen gesehen steht *De Revolutionibus* fast völlig in der antiken astronomischen und kosmologischen Tradition; doch innerhalb seines im allgemeinen klassischen Rahmens findet man einige neue Züge, die die Richtung wissenschaftlichen Denkens in die Wege geleitet haben, die von ihrem Verfasser nicht vorhergesehen waren, und die zu einem raschen und vollständigen Bruch mit der antiken Tradition führten. Im historischen Zusammenhang hat *De Revolutionibus* eine zweifache Natur: Es ist sowohl antik als auch modern, konservativ und radikal. Daher kann seine Bedeutung nur gefunden werden, indem man gleichzeitig in die Vergangenheit und in die Zukunft blickt, auf die Tradition, aus der das Werk entstanden ist, und auf die Tradition, die aus ihm entsteht.

Dieser doppelte Charakter eines einzigen Werkes ist das Hauptproblem dieses Kapitels. Was ist die Beziehung von Kopernikus zur antiken astrono-

ischen Tradition, innerhalb der er ausgebildet worden war? Oder genauer, welche Züge jener Tradition führten ihn zum Glauben, daß eine astronomische Erneuerung notwendig war, daß gewisse Aspekte antiker Kosmologie und Astronomie verworfen werden mußten? Und nach dem Entschluß, mit einer alten Tradition zu brechen, wie weit war er notwendigerweise mit ihr verbunden als der einzigen Quelle intellektueller und experimenteller Hilfsmittel zur Ausübung der Astronomie? Was ist die Beziehung von Kopernikus zur modernen Planetenastronomie und Kosmologie? Welche schöpferischen Neuheiten konnte sein Werk angesichts der durch die klassische Astronomie gegebenen Schranken enthalten? Konnten diese neuen Entdeckungen, die schließlich eine völlig neue Astronomie und Kosmologie zur Folge hatten, an ihrem Anfang in einen vorwiegend klassischen Rahmen eingebettet werden? Und wie konnten jene Neuerungen von seinen Nachfolgern erkannt und übernommen werden? Diese Probleme und die Folgerungen daraus kennzeichnen die wahren Schwierigkeiten von *De Revolutionibus* und anderen wissenschaftlichen Werken, die innerhalb einer Tradition wissenschaftlichen Denkens entstanden und zur Quelle einer neuen Tradition wurden, die schließlich ihre Vorgängerin zerstörte.

### *Kopernikus' Motive – das Vorwort*

Kopernikus gehört zur kleinen Gruppe von Europäern, die die hellenistische Tradition der quantitativen mathematischen Astronomie wiederbelebten, die in der Antike im Werk des Ptolemäus ihren Höhepunkt gefunden hatte. Das Buch *De Revolutionibus* war nach dem Vorbild des *Almagest* verfaßt, es wandte sich nahezu ausschließlich an jene wenigen zeitgenössischen Astronomen, die imstande waren, die ptolemäische Abhandlung zu lesen. Mit Kopernikus kehren wir erstmalig zu jenen quantitativen astronomischen Problemen zurück, die wir zuletzt in Kapitel 3 behandelt haben, als wir das ausgereifte ptolemäische System studierten. Das Buch *De Revolutionibus* wurde geschrieben, um das Problem der Planeten zu lösen, das nach Kopernikus' Meinung von Ptolemäus und seinen Nachfolgern ungelöst gelassen worden war. In Kopernikus' Werk ist die revolutionäre Vorstellung der Erdbewegung ursprünglich ein Nebenprodukt des Versuches eines Astronomen, die Rechentechniken zu verbessern. Das Mißverhältnis zwischen dem Ziel, das die Neuerung des Kopernikus motivierte, und der Neuerung selbst, ist die erste auffallende Überraschung von *De Revolutionibus*. Man findet sie fast am Beginn des in Briefform geschriebenen Vorworts, das

Kopernikus an die Spitze von *De Revolutionibus* stellte, um seinen Beweggrund, seine Quellen und das Ergebnis seiner wissenschaftlichen Untersuchung zu beschreiben.<sup>1</sup>

Vorrede von Nicolaus Copernicus zu den Büchern der Kreisbewegungen an den Pontifex Maximus Papst III.

Heiligster Vater, ich kann mir zur Genüge denken, daß gewisse Leute, sobald sie erfahren, daß ich in diesen meinen Büchern, die ich über die Kreisbewegungen der Sphären des Weltalls geschrieben habe, der Erdkugel gewisse Bewegungen beilege, sogleich erklären möchten, ich sei mit solcher Meinung zu verwerfen. Ich bin mit meinen Arbeiten nicht in dem Maße zufrieden, daß ich nicht wohl erwägen sollte, wie andere über sie urteilen werden. Und obgleich ich weiß, daß die Einsicht des Philosophen dem Urteil der Menge entzogen ist, weil sein Bestreben darin liegt, die Wahrheit in allen Dingen, soweit dies der menschlichen Vernunft von Gott erlaubt ist, zu erforschen, so halte ich doch dafür, daß man Meinungen vermeiden müsse, die weit davon entfernt sind, richtig zu sein. Als ich daher mit mir selbst zurate ging, für welch „mißtönenden Ohrenschmaus“ diejenigen, die die Meinung von der Unbeweglichkeit der Erde auf Grund des Urteils vieler Jahrhunderte für bestätigt annehmen, es halten werden, wenn ich dagegen behaupte, die Erde bewege sich, so war ich lange unschlüssig, ob ich meine Kommentare, die ich zum Beweis ihrer Bewegung geschrieben habe, herausgeben solle, oder ob es besser wäre, dem Beispiel der Pythagoreer und einiger anderer zu folgen, welche die Geheimnisse der Philosophie nur ihren Verwandten und Freunden, nicht schriftlich, sondern mündlich zu überliefern pflegten, wie dies der Brief des Lysis an Hipparch beweist. [Dieser Brief, den Kopernikus einmal sogar in *De Revolutionibus* aufnehmen wollte, beschreibt das Verbot der Pythagoreer und Neuplatoniker, Geheimnisse der Natur jenen zu enthüllen, die noch nicht in den mystischen Kult eingeführt worden waren. Diese Stelle weist auf Kopernikus' Anteilnahme an der Wiederbelebung des Neuplatonismus, die wir im letzten Kapitel beschrieben haben.] Sie scheinen mir dies nämlich nicht, wie einige glauben, um der Deutlichkeit der zu vermittelnden Lehren willen getan zu haben, sondern damit die schönsten und durch eifriges Studium bedeutender Männer erforschten Dinge nicht von denen verachtet würden, die es entweder verdrießt, anderen als einträglichen Wissenschaften große Mühe zu widmen, oder die, wenn sie durch Ermahnungen und durch das Beispiel anderer zu dem

freien Studium der Philosophie getrieben werden, dennoch wegen der Beschränktheit ihres Geistes sich unter den Philosophen ausnehmen wie die Drohnen unter den Bienen. Als ich mir das also reiflich überlegte, hätte mich die Verachtung, die ich wegen der Neuheit und scheinbaren Widersinnigkeit meiner Meinung zu befürchten hatte, fast bewogen, das fertige Werk ganz beiseite zu legen.

Aber meine Freunde brachten mich, der ich lange zauderte und sogar mich widersetzte, davon wieder ab. Unter ihnen war es vor allem der auf allen Wissensgebieten berühmte Kardinal von Capua, Nicolaus Schonberg; nächst ihm mein sehr geliebter Tidemann Giese, Bischof von Kulm, der sich mit gleich hohem Eifer der Theologie und allen guten Wissenschaften widmet. Dieser nun hat mich oft ermahnt und zuweilen unter Vorwürfen dringend verlangt, dieses Buch endlich herauszugeben, das bei mir nicht nur neun Jahre, sondern bereits in das vierte Jahrneunt hinein verborgen lag. Dasselbe verlangten von mir nicht wenige andere ausgezeichnete und sehr gelehrte Männer, indem sie mich ermahnten, mich nicht länger wegen der gehegten Besorgnis zu weigern, mein Werk dem allgemeinen Nutzen der Mathematiker zugänglich zu machen. Je widersinniger jetzt meine Lehre von der Bewegung der Erde den meisten erscheine, meinten sie, desto mehr Bewunderung und Dank werde sie ernten, wenn jene durch die Herausgabe meiner Kommentare den Nebel des Widersinnigen durch die klarsten Beweise beseitigt sehn würden. Solche Ermahnungen also und diese Hoffnung bewogen mich, meinen Freunden endlich zu erlauben, die Herausgabe des Werkes, die sie so lange schon von mir gewünscht hatten, zu besorgen.

Aber Deine Heiligkeit wird vielleicht nicht so sehr darüber verwundert sein, daß ich es gewagt habe, diese meine Nacharbeiten zutage zu fördern, nachdem ich mir bei der Ausarbeitung derselben soviel Mühe gegeben habe, daß ich ohne Scheu meine Gedanken über die Bewegung der Erde den Wissenschaften anvertrauen kann\*), sondern sie erwartet vielmehr von mir zu hören, wie es mir in den Sinn gekommen ist zu wagen, gegen die angenommene Meinung der Mathematiker, ja beinahe gegen den gemeinen Menschenverstand, mir irgendeine Bewegung der

---

\* ) Einige Jahre vor der Veröffentlichung von *De Revolutionibus* hatte Kopernikus unter seinen Freunden ein kurzes Manuskript, den *Commentariolus*, zirkulieren lassen, in dem er eine frühe Version der heliozentrischen Astronomie beschreibt. Ein zweiter Vorbericht zu Kopernikus' Hauptwerk, die *Narratio prima* von Rheticus, einem Schüler des Kopernikus, war 1540 und 1541 erschienen.

Erde vorzustellen. Deshalb will ich Deiner Heiligkeit nicht verhehlen, daß mich zum Nachdenken über eine andere Art, die Bewegungen der Sphären des Weltalls zu berechnen, nichts anderes bewogen hat als die Einsicht, daß sich selbst die Mathematiker bei ihren Untersuchungen hierüber nicht einig sind.

Denn erstens sind sie über die Bewegung der Sonne und des Mondes so im ungewissen, daß sie die ewige Größe des vollen Jahres nicht abzuleiten und zu beobachten vermögen. Zweitens wenden sie bei Feststellung der Bewegungen sowohl jener als auch der übrigen fünf Planeten weder dieselben Grund- und Folgesätze noch dieselben Beweise für die zu beobachtenden Umlaufbahnen und Bewegungen an. Die einen bedienen sich nämlich nur der konzentrischen [das System, das Aristoteles aus dem Werk von Eudoxus und Kallipp abgeleitet hatte, und das in Europa kurz vor Kopernikus' Tod von den italienischen Astronomen Fracastoro und Amici wieder verwendet wurde], die anderen der exzentrischen und epizyklischen Kreise, durch die sie jedoch das Erstrebte nicht völlig erreichen. Denn diejenigen, die sich zu den konzentrischen Kreisen bekennen, obgleich sie beweisen, daß einige ungleichmäßige Bewegungen aus ihnen zusammengesetzt werden können, haben dennoch daraus nichts Bestimmtes festzustellen vermocht, was unzweifelhaft den Beobachtungen entspräche. Diejenigen aber, welche die exzentrischen Kreise ersannen, haben, obgleich sie durch dieselben die zu beobachtenden Bewegungen zum großen Teil mit zutreffenden Zahlen gelöst zu haben scheinen, dennoch sehr vieles herbeigebracht [wie die Verwendung der Äquanten], was den ersten Grundsätzen über die Gleichförmigkeit der Bewegung zu widersprechen scheint. Auch konnten sie die Hauptsache, nämlich die Gestalt der Welt und die tatsächliche Symmetrie ihrer Teile, weder finden noch aus jenen berechnen, sondern es erging ihnen so, als wenn jemand von verschiedenen Orten her Hände, Füße, Kopf und andere Körperteile, zwar sehr schön, aber nicht in der Proportion eines bestimmten Körpers gezeichnet, nähme und, ohne daß sie sich irgendwie entsprächen, mehr ein Monstrum als einen Menschen daraus zusammensetze. Daher zeigt es sich, daß sie in der Beweisführung, die man Methode nennt, entweder etwas Notwendiges übergangen oder etwas Fremdartiges und zur Sache nicht Gehörendes hinzugesetzt haben, was ihnen gewiß nicht widerfahren wäre, wenn sie sichere Prinzipien befolgt hätten. Wenn aber ihre angewandten Hypothesen nicht trügerisch wären, so hätte sich alles, was daraus folgt, unzweifelhaft bewährt. Es mag, was ich hier sage, dunkel sein, es wird aber gegebenenorts klar werden.

Eine korrekte Einschätzung der zeitgenössischen Astronomie, sagt Kopernikus, zeigt, daß der geozentrische Zugang zu dem Planetenproblem hoffnungslos ist. Die traditionellen Methoden der ptolemäischen Astronomie haben jenes Problem nicht gelöst und werden es auch nicht lösen; statt dessen haben sie ein Ungeheuer hervorgebracht. Er schließt, es müsse ein fundamentaler Fehler in den grundlegenden Konzepten der traditionellen Astronomie liegen. Zum erstenmal hatte damit ein Astronom das altehrwürdige wissenschaftliche Gebäude aus Gründen abgelehnt, die in der Wissenschaft selbst lagen, und dieses Wissen um einen Methodenfehler stand am Beginn der kopernikanischen Wende. Eine deutliche Notwendigkeit war der Ursprung von Kopernikus' Neuerung. Doch das Gefühl der Notwendigkeit war neu. Zuvor war die traditionelle Astronomie nicht monströs erschienen. Zur Zeit des Kopernikus hatte sich ein Wandel ergeben, sein Vorwort beschreibt die Gründe dieser Umwandlung in brillianter Weise.

Kopernikus und seine Zeitgenossen erbten nicht nur den *Almagest*, sondern auch die Vorstellungen vieler islamischer und einiger europäischer Astronomen, die das ptolemäische System kritisiert und abgeändert hatten. Diese Leute bezeichneten Kopernikus als Mathematiker. Der eine hatte einige kleine Kreise hinzugefügt oder weggenommen, ein anderer hatte einen Epizykel verwendet, um eine Planetenunregelmäßigkeit zu beschreiben, wo Ptolemäus ursprünglich einen Exzenter verwendet hatte; noch ein anderer hatte ein Hilfsmittel ersonnen, das Ptolemäus unbekannt war, um kleine Abweichungen von der auf Grund von Epizykel und Deferenten vorhergesagten Bewegung zu beschreiben; andere hatten anhand neuer Messungen die Geschwindigkeiten geändert, mit denen die einzelnen Kreise des ptolemäischen Systems rotierten. Es gab kein einheitliches ptolemäisches System mehr, sondern ein gutes Dutzend, die Zahl vergrößerte sich rapid mit der Zunahme an gut ausgebildeten Astronomen. Alle diese Systeme waren nach dem System des *Almagest* ersonnen, alle waren daher „ptolemäisch“. Doch weil es so viele Varianten gab, hatte das Adjektiv „ptolemäisch“ viel von seiner Bedeutung verloren. Die astronomische Tradition war aufgespalten worden, sie beschrieb nicht mehr eindeutig die Techniken, die ein Astronom bei der Berechnung der Planetenposition verwenden konnte, und sie konnte daher die Resultate nicht spezifizieren, die aus seinen Rechnungen folgen sollten. Mehrdeutigkeiten wie diese nahmen der traditionellen Astronomie ihre innere Geschlossenheit.

Das Monster des Kopernikus hatte viele Gesichter. Keines der ptolemäischen Systeme, das Kopernikus kannte, gab Resultate, die mit guten Beobachtungen mit freiem Auge übereinstimmten. Sie waren nicht schlechter,

aber auch nicht besser als die ptolemäischen Resultate. Nach 13 Jahrhunderten fruchtloser Forschung mußte sich ein aufmerksamer Astronom wohl fragen, ob weitere Versuche in der alten Richtung überhaupt erfolgreich sein könnten. Außerdem hatten die Jahrhunderte, die zwischen Ptolemäus und Kopernikus lagen, die Fehler des traditionellen Systems anwachsen lassen, so daß sie eine zusätzliche Quelle der Unzufriedenheit boten. Die Bewegungen eines Systems aus Epizykeln und Deferenten sind denen der Zeiger einer Uhr nicht unähnlich; die Fehlanzeige einer Uhr nimmt im Lauf der Zeit zu. Wenn eine Uhr etwa 1 Sekunde in 10 Jahren zurückbleibt, mag der Fehler am Ende eines Jahres oder am Ende von 10 Jahren nicht auffallen. Doch nach tausend Jahren kann man den Fehler kaum übersehen, wenn er bereits auf 2 Minuten angewachsen ist. In einer ähnlichen Lage waren Kopernikus und seine Zeitgenossen: Sie besaßen neben den antiken weitere astronomische Daten, die die Zeitspanne von 13 Jahrhunderten seit Ptolemäus überdeckten; daher stellten sie eine wesentlich empfindlichere Überprüfung ihrer Systeme dar. Sie konnten die Fehler nicht mehr übersehen, die im antiken System lagen.

Der lange zeitliche Zwischenraum stellte die Astronomen des 16. Jahrhunderts außerdem vor ein Scheinproblem, das ironischerweise noch wirkungsvoller als die tatsächliche Bewegung der Planeten das Erkennen von Fehlern der ptolemäischen Methode förderte. Ein Großteil der Daten, die Kopernikus und seine Kollegen kannten, waren schlechte Daten, die die Planeten und Gestirne an Orte versetzten, die sie niemals eingenommen hatten. Einige der fehlerhaften Aufzeichnungen stammten von schlechten Beobachtern; andere basierten zwar einst auf guten Beobachtungen, sie waren jedoch im Laufe der Überlieferung falsch kopiert worden. Kein einfaches Planetensystem – von Ptolemäus, Kopernikus, Kepler oder Newton – hätte die Daten ordnen können, die die Astronomen der Renaissance glaubten, erklären zu müssen. Kopernikus wurde selbst ein Opfer der Daten, die ihm ursprünglich bei der Verwerfung des ptolemäischen Systems geholfen hatten. Sein eigenes System hätte viel bessere Resultate gegeben, wenn er den Beobachtungen seiner Vorgänger genauso skeptisch gegenübergestanden wäre wie ihren mathematischen Systemen.

Verschwommenheit und fortgesetzte Ungenauigkeit – dies waren die zwei Hauptcharakteristika des Ungeheuers, das von Kopernikus beschrieben wurde. Soweit die kopernikanische Revolution von Veränderungen innerhalb der Astronomie selbst abhing, waren diese die wesentlichsten. Doch sie waren nicht die einzigen. Man könnte auch fragen, warum Kopernikus das Monster überhaupt erkennen konnte. Ein Teil der offenkundigen Veränderung der überlieferten Astronomie muß sich im Auge des Betrachters abgespielt haben,

denn die astronomische Theorie war zuvor weder eindeutig noch genau gewesen. Wir haben diese Frage bereits behandelt. Kopernikus' Erkenntnis hing vom gesamten philosophischen Klima ab, dessen Entstehung wir im letzten Kapitel beschrieben haben. Ein Mann ohne Kopernikus' neuplatonische Auffassung könnte aus dem Zustand der Astronomie seiner Zeit bloß geschlossen haben, daß das Problem der Planeten keine Lösung haben könnte, die gleichzeitig einfach und genau war. In ähnlicher Weise wäre wohl ein Astronom, der nicht in der Tradition der scholastischen Kritik gestanden wäre, unfähig gewesen, für sein eigenes Gebiet ähnliche Kritik zu entwickeln. Diese und andere neue Entwicklungen, die im letzten Kapitel dargelegt wurden, waren die Hauptströmungen zur Zeit des Kopernikus. Obwohl er ihrer nicht bewußt gewesen zu sein scheint, wurde Kopernikus von dieser philosophischen Strömung mitgerissen, so wie seine Zeitgenossen unbewußt von der Bewegung der Erde mitgetragen wurden. Sein Werk bleibt unverständlich, wenn man es nicht zum inneren Zustand der Astronomie, wie auch zum gesamten intellektuellen Klima seiner Zeit in Beziehung bringt. Beide zusammen führten auf das Monster.

Ablehnung des Monsters war jedoch nur der erste Schritt in Richtung zur kopernikanischen Revolution. Darauf folgte eine Suche, deren Anfang in den restlichen Teilen von Kopernikus' Vorwort beschrieben ist:

Als ich mir nun diese Unsicherheit der mathematischen Überlieferungen über die zu berechnenden Umläufe der Sphären lange überlegte, begann es mir schließlich widerlich zu werden, daß die Philosophen, die sonst alles, was sich auf jene Kreisbewegung bezieht, bis ins kleinste so sorgfältig erforschten, keinen sicheren Grund für die Bewegungen der Weltmaschine hätten, die doch unsertwegen von dem größten und nach genauesten Gesetzen zu Werke gehenden Meister geschaffen ist. [Man beachte, wie Kopernikus „genau“ mit „mathematisch genau“ gleichsetzt, ein Zug seines Neuplatonismus, von dem sich jeder gute Aristoteliker distanziert hätte.] Daher machte ich mir die Mühe, die Bücher aller Philosophen, derer ich habhaft werden konnte, von neuem zu lesen, um nachzusuchen, ob nicht irgendeiner einmal die Ansicht vertreten hätte, die Bewegungen der Sphären des Weltalls seien anders geartet, als diejenigen annehmen, die in den Schulen die mathematischen Wissenschaften gelehrt haben. Da fand ich denn zuerst bei Cicero, daß Nicetas [5. Jhrdt. v. Chr.] geglaubt habe, die Erde bewege sich. Sodann fand ich auch bei Plutarch, daß einige andere ebenfalls

dieser Meinung gewesen seien. Seine Worte will ich, um sie allen vorzulegen, hier anführen:

„Andere glauben, die Erde stehe still, der Pythagoreer Philolaos [5. Jhd. v. Chr.] aber behauptet, sie bewege sich um das [zentrale] Feuer in einem geneigten Kreis, ähnlich wie die Sonne und der Mond. Herakleides Pontikos und der Pythagoreer Ekphantos [4. Jhd. v. Chr.] lassen die Erde sich zwar nicht fortschreitend, aber doch nach Art eines Rades eingegrenzt zwischen Niedergang und Aufgang um ihren eigenen Mittelpunkt bewegen.“

Von hier also den Anlaß nehmend, fing auch ich an, über die Beweglichkeit der Erde nachzudenken. Und obgleich die Ansicht widersinnig schien, so tat ich es doch, weil ich wußte, daß schon anderen vor mir die Freiheit vergönnt gewesen war, beliebige Kreisbewegungen zur Erklärung der Erscheinungen der Gestirne anzunehmen. Ich war der Meinung, daß es auch mir wohl erlaubt wäre zu versuchen, ob unter Voraussetzung irgendeiner Bewegung der Erde zuverlässigere Deutungen für die Kreisbewegung der Weltkörper gefunden werden könnten als bisher.

Und so habe ich denn unter Annahme der Bewegungen, die ich im nachstehenden Werk der Erde zuschreibe, und durch viele und lange fortgesetzte Beobachtungen endlich gefunden, daß, wenn die Bewegungen der übrigen Planeten auf den Kreislauf der Erde bezogen und dieser dem Kreislauf jedes einzelnen Gestirnes zugrunde gelegt wird, nicht nur die Erscheinungen jener daraus folgen, sondern auch die Gesetze und Größen der Gestirne und all ihrer Bahnen und der Himmel selbst so zusammenhängen, daß in keinem seiner Teile ohne Verwirrung der übrigen Teile und des ganzen Universums irgend etwas verändert werden könnte. . . .

[Kopernikus verweist hier auf einen wichtigen Unterschied zwischen seinem System und dem ptolemäischen: im kopernikanischen System kann man die Bahnen der Planeten nicht mehr beliebig verkleinern oder vergrößern, und die Beobachtung kann erstmalig die Ordnung und die relativen Größen aller Planetenbahnen ohne Rückgriff auf die Hypothese der raumfüllenden Kugelschalen bestimmen. Wir werden diesen Punkt noch genauer besprechen, wenn wir das kopernikanische mit dem ptolemäischen System vergleichen.]

Ich zweifle nicht, daß geistreiche und gelehrte Mathematiker mir beipflichten werden, wenn sie, was die Philosophie vor allem verlangt, nicht oberflächlich, sondern gründlich durchdenken und erwägen

wollen, was zum Beweis dieser Gegenstände in dem vorliegenden Werk von mir beigebracht wird. Damit aber in gleicher Weise Gelehrte und Ungelehrte sehen, daß ich durchaus niemandes Urteil scheue, so wollte ich diese meine Nachtarbeiten lieber Deiner Heiligkeit als irgendeinem anderen widmen, weil Du auch in diesem sehr entlegenen Winkel der Erde, in dem ich wirke, an Würde des Ranges und an Liebe zu allen Wissenschaften und zur Mathematik für den Erhabensten gehalten wirst, so daß Du durch Dein Ansehen und Urteil die Bisse der Verleumder leicht unterdrücken kannst, obgleich das Sprichwort sagt, es gäbe kein Mittel gegen den Biß des Verleumders.

Wenn aber vielleicht Schwätzer kommen, die, obgleich in allen mathematischen Wissenschaften unwissend, sich dennoch ein Urteil darüber anmaßen und es wagen sollten, wegen einer Stelle der Schrift, die sie zugunsten ihrer These übel verdreht haben, dieses mein Werk zu tadeln oder anzugreifen, so mache ich mir nichts aus ihnen, und zwar in solchem Maße nicht, daß ich sogar ihr Urteil als ein dummdreistes verachte. Denn es ist nicht unbekannt, daß Lactantius, übrigens ein berühmter Schriftsteller, aber ein schwacher Mathematiker, sehr kindlich über die Form der Erde spricht, indem er diejenigen verspottet, die gesagt haben, die Erde habe die Gestalt einer Kugel. Es darf daher die Wißbegierigen nicht wundern, wenn dergleichen Leute auch uns verspotten.

Mathematische Dinge werden für Mathematiker geschrieben, die, wenn mich meine Meinung nicht täuscht, einsehen werden, daß diese unsere Arbeiten auch an dem kirchlichen Staate mitbauen, dessen höchste Stelle Deine Heiligkeit jetzt einnimmt. Denn als vor gar nicht langer Zeit unter Leo X. im lateranischen Konzil die Frage der Verbesserung des Kirchenkalenders erörtert wurde, blieb sie nur deshalb unerledigt, weil die Länge des Jahres und des Monats und die Bewegungen der Sonne und des Mondes für noch nicht hinreichend genau bestimmt erachtet wurden. Angeregt durch den berühmten Herrn Paulus, Bischof von Fossombrone, der damals jener Angelegenheit vorstand, befaßte ich mich seit jener Zeit damit, diese Gegenstände genauer zu beobachten. Was ich in dieser Sache geleistet habe, das stelle ich nun vor allem dem Urteil Deiner Heiligkeit und aller anderen gelehrt Mathematiker anheim, und damit ich bei Deiner Heiligkeit nicht den Anschein erwecke, über den Nutzen des Werkes mehr vorausgeschickt zu haben, als ich leisten könnte, so gehe ich jetzt zu dem Werk selbst über.

„Mathematik ist für die Mathematiker“, dies ist die erste überraschende Aussage aus *De Revolutionibus*. Obwohl wenige Aspekte des westlichen Denkens lange von den Konsequenzen des kopernikanischen Werkes unberührt blieben, war jenes Werk selbst rein technisch und für den Fachmann bestimmt. Es war die mathematische Beschreibung der Astronomie des Planetensystems, nicht der Kosmologie oder Philosophie, die Kopernikus monströs fand, und deren Reform alleine ihn dazu zwang, die Erde in Bewegung zu versetzen. Wenn seine Zeitgenossen ihm folgen sollten, müßten sie lernen, seine detaillierten mathematischen Argumente über die Planetenörter zu verstehen, und sie müßten diese sonderbaren Argumente ernster als ihre unmittelbaren Sinneseindrücke nehmen. Die kopernikanische Wende war nur zum geringsten Teil der Umsturz der mathematischen Methoden zur Berechnung der Planetenörter, aber sie begann damit. Kopernikus' wesentlicher Beitrag zur Revolution, die seinen Namen trägt, bestand darin, die Notwendigkeit dieser neuen Techniken erkannt und sie entwickelt zu haben.

Kopernikus war nicht der erste, der die Bewegung der Erde vorschlug, er behauptete nicht, die Idee allein wieder entdeckt zu haben. In seinem Vorwort zitiert er die meisten antiken Vorbilder, die die Erdbewegung in Betracht gezogen hatten. In einem früheren Manuscript verweist er sogar auf Aristarch, dessen heliozentrisches Universum seinem eigenen sehr nahe kommt. Obwohl er, wie es in der Renaissance üblich war, seine unmittelbareren Vorgänger nicht erwähnt, so muß er einiges von ihren Werken gekannt haben. Er mag vielleicht nicht von Oresme's Beiträgen gewußt haben, doch hatte er wahrscheinlich von der höchst einflußreichen Abhandlung gehört, in der der Kardinal Nikolaus von Cusa im 15. Jahrhundert die Bewegung der Erde aus der Vielzahl von Welten in einem unbegrenzten neuplatonischen Universum ableitete. Die Bewegung der Erde war niemals eine populäre Vorstellung gewesen, doch im 16. Jahrhundert war sie kaum neu. Was neu war, war das mathematische System, das Kopernikus auf der Erdbewegung aufbaute. Mit der möglichen Ausnahme von Aristarch war Kopernikus der erste, der sah, daß die Erdbewegung ein vorhandenes astronomisches Problem lösen konnte. Selbst unter Einschluß von Aristarch war er der erste, der detaillierte Folgerungen aus seiner Hypothese entwickelte. Seine Mathematik unterscheidet ihn von seinen Vorgängern, und es war zum Teil wegen der Mathematik, daß dieses Werk im Gegensatz zu früher eine Revolution einleitete.

## *Kopernikus' Physik und Kosmologie*

Für Kopernikus war die Bewegung der Erde ein Nebenprodukt des Planetenproblems. Beim Studium der Himmelsbewegungen kam er zur Erdbewegung, und weil die Himmelsbewegungen für ihn eine höhere Bedeutung hatten, kümmerte er sich wenig um die Schwierigkeiten, die seine Neueinführung den normalen Menschen bieten würde, deren Interessen hauptsächlich irdischer Art waren. Doch konnte er die Probleme nicht völlig ignorieren, die die Erdbewegung für jene mit sich brachte, deren Interessen nicht so ausschließlich auf die Astronomie gerichtet waren wie seine. Er mußte die Vorstellung der Erdbewegung seinen Zeitgenossen zumindest begreiflich machen, er mußte zeigen, daß die Konsequenzen dieser Bewegung nicht so verheerend waren, wie man allgemein annahm. Daher begann Kopernikus das Werk *De Revolutionibus* mit einer allgemein verständlichen Beschreibung des Universums, das er für die bewegte Erde konstruiert hatte. Sein einführendes Erstes Buch war an den Laien gerichtet, es umfaßte alle Argumente, von denen er glaubte, er könnte sie den Lesern ohne astronomische Ausbildung zugänglich machen.

Jene Argumente waren zutiefst unüberzeugend. Außer, wenn sie aus mathematischen Analysen folgten, die Kopernikus im ersten Buch jedoch nicht beschrieb, waren sie nicht neu und stimmten nicht mit den Details des astronomischen Systems zusammen, das Kopernikus in den späteren Teilen entwickeln sollte. Nur ein Mann, der wie Kopernikus andere Gründe für die Annahme der Erdbewegung hatte, konnte das Erste Buch von *De Revolutionibus* vollständig ernst nehmen.

Das Erste Buch ist jedoch nicht unwichtig. Seine Schwächen lassen den Unglauben und den Spott ahnen, mit dem das kopernikanische System von jenen begrüßt werden sollte, die den detaillierten mathematischen Erörterungen der folgenden Bücher nicht folgen konnten. Seine wiederholte Abhängigkeit von aristotelischen und scholastischen Vorstellungen und Gesetzen zeigt, wie wenig sich selbst Kopernikus – außer in seinem engen Fachgebiet – über seine Ausbildung und den Zeitgeist erheben konnte. Schließlich illustrieren die Unvollständigkeiten und Ungereimtheiten des Ersten Buches wiederum die Geschlossenheit der traditionellen Kosmologie und der traditionellen Astronomie. Kopernikus, der nur durch astronomische Beweggründe zur Revolution geführt wurde, und der deshalb versuchte, seine Neuerung auf die Astronomie zu beschränken, konnte die destruktiven kosmologischen Konsequenzen der Erdbewegung nicht völlig vermeiden.

## Kapitel I

Daß die Welt kugelförmig ist

Zuerst müssen wir bemerken, daß die Welt kugelförmig ist, teils weil diese Form als die vollendete nicht als aus anderen Formen zusammengesetzt betrachtet zu werden braucht und eine vollkommene Ganzheit darstellt, der man nichts zufügen oder wegnehmen kann, teils weil sie die geräumigste Form bildet, die am meisten dazu geeignet ist, alles zu enthalten und zu bewahren, teils auch, weil alle in sich abgeschlossenen Teile der Welt – ich meine die Sonne, den Mond und die Planeten – in dieser Form erscheinen, teils weil alles dahin strebt, sich in dieser Form zu begrenzen, was an den Wassertropfen und an den übrigen flüssigen Körpern zu beobachten ist, wenn sie sich aus sich selbst zu begrenzen streben. Daher wird niemand bezweifeln, daß diese Form den Himmelskörpern zukommt.

## Kapitel II

Daß die Erde gleichfalls kugelförmig ist

Daß die Erde gleichfalls kugelförmig ist, ist offenkundig, weil sie sich von allen Seiten auf ihren Mittelpunkt stützt. Obgleich sie bei der großen Erhebung der Berge und der Vertiefung der Täler nicht sogleich als vollkommener Kreis wahrgenommen wird, so spricht dies doch keineswegs gegen die allgemeine Rundung der Erde. Das wird auf folgende Weise klar: Für diejenigen, die von irgendwoher nach Norden gehen, erhebt sich der eine Pol der täglichen Kreisbewegung allmählich, während der andere um ebensoviel sinkt, und immer mehr Sterne scheinen im Norden nicht unterzugehen und im Süden nicht mehr aufzugehen. . .

Nun haben auch die Neigungen der Pole selbst zu den durchmessenen Räumen der Erde immer dasselbe Verhältnis, was bei keiner anderen als bei der Kugelgestalt zutrifft. Daher ist offenbar, daß auch die Erde zwischen Polen eingeschlossen und deswegen kugelförmig ist; nehmen wir noch hinzu, daß die Bewohner des Ostens die am Abend, und die Bewohner des Westens die am Morgen eintretenden Sonnen- und Mondfinsternisse nicht wahrnehmen; solche aber, die am Mittag eintreten, sehen jene später, diese dagegen früher. Daß auch das Wasser derselben Form unterworfen ist, wird auf den Schiffen wahrgenommen, da das Land, das man vom Schiff aus nicht sehen kann, von der Spitze des Mastbaumes erspäht wird, und wenn umgekehrt ein Licht an der

Spitze des Mastbaumes angebracht wird, so scheint dasselbe, wenn das Schiff sich vom Land entfernt, den an der Küste Zurückbleibenden allmählich hinabzusteigen, bis es zuletzt, gleichsam untergehend, verschwindet. Es ist klar, daß auch das Wasser seiner flüssigen Natur nach, ebenso wie die Erde, immer nach unten strebt und sich vom Ufer ab nicht höher erhebt, als dies seine Wölbung zuläßt. Daher stimmt man darüber überein, daß das Land um soviel höher ist, als es aus dem Ozean hervorragt.

### Kapitel III

#### Wie die Erde mit dem Wasser eine Kugel ausmacht

Indem der das Land umgebende Ozean seine Gewässer nach allen Seiten verbreitet, füllt er die Vertiefungen desselben aus. Daher mußte es weniger Wasser als Land geben, damit das Wasser nicht den ganzen Erdkreis verschlänge — indem beide vermöge ihrer Schwere nach demselben Mittelpunkt streben — sondern damit es einige Erdteile und so viele nach allen Seiten freiliegende Inseln zugunsten der Lebewesen übrig lasse. Denn was ist selbst das Festland und der Erdkreis anderes als eine Insel, größer als die übrigen? ...

[Kopernikus möchte in diesem Kapitel zeigen, daß die Erdkugel hauptsächlich aus Erde besteht, und daß Wasser und Erde zusammen erforderlich sind, um eine Kugel zu bilden. Vermutlich greift er vor: Erde zerbricht weniger leicht als Wasser, wenn sie bewegt wird. Die Bewegung eines festen Körpers erscheint glaubwürdiger als die eines flüssigen. Kopernikus wird schließlich behaupten, daß sich die Erde in natürlicher Weise in Kreisen bewegt, weil sie eine Kugel ist. (Siehe unten, Kapitel 8 seines Ersten Buches). Er muß daher zeigen, daß sowohl Erde als auch Wasser für die Zusammensetzung der Kugel wichtig sind, damit beide zusammen an der natürlichen Bewegung der Kugel teilnehmen. Die Passage ist von besonderem Interesse, weil sie seine Ansicht der Struktur der Erde dokumentiert und sein Wissen um die jüngst vergangenen Entdeckungsreisen und um die Korrekturen zeigt, die daraufhin an den geographischen Schriften des Ptolemäus angebracht werden mußten. Zum Beispiel sagt er:

Wenn der Erdball hauptsächlich aus Wasser wäre,] würde die Tiefe des Grundes von der Meeresküste an nicht aufhören, ständig größer zu werden, und deshalb würden diejenigen, die größere Seefahrten ausführten, weder auf eine Insel, noch auf eine Klippe, noch auf irgend

etwas Landartiges stoßen. Nun ist es aber bekannt, daß zwischen Mittelmeer und Rotem Meer fast in der Mitte der Ländermasse ein kaum fünfzehn Stadien breiter Landstreifen hervorragt. Dagegen dehnt sich nach Ptolemäus – in seiner „Cosmographia“ – die bewohnte Erde bis zum mittleren Längenkreis aus, wobei überdies das unbekannte Land außer acht gelassen ist, wo die Neueren China und ausgedehntere Gegenden bis zu sechzig Längengraden hinzugefügt haben, so daß die Erde schon in einer größeren Länge bewohnt ist als der übrige Teil des Ozeans ausmacht. Das wird noch klarer, wenn diejenigen Inseln hinzugenommen werden, die in unserer Zeit unter den Herrschern Spaniens entdeckt wurden, und besonders Amerika, das nach seinem Entdecker, einem Schiffskapitän, benannt ist und das man bei seiner noch nicht feststehenden Größe für einen zweiten Kontinent hält, abgesehen von den vielen, früher unbekannten Inseln, so daß wir uns nicht wundern dürfen, daß es Antipoden oder Antichthonen gibt. Denn nach geometrischer Berechnung muß man Amerika seiner Lage nach dem Indien des Ganges diametral entgegengesetzt annehmen. . . .

#### Kapitel IV

Daß die Bewegung der Himmelskörper gleichförmig, kreisförmig, stetig oder aus kreisförmigen zusammengesetzt ist

Hiernach wollen wir zeigen, daß die Bewegung der Himmelskörper kreisförmig ist. Die Beweglichkeit einer Kugel besteht nämlich darin, sich im Kreise zu bewegen, indem sie durch diese Tätigkeit ihre Form als diejenige des einfachsten Körpers ausdrückt. . . . Wegen der Vielzahl der Kreise gibt es aber mehrere Bewegungen. Die bekannteste von allen ist der tägliche Umschwung, welchen die Griechen Nychthemeron nennen, d. i. der Zeitraum von Tag und Nacht. Durch ihn, so meint man, bewege sich die ganze Welt, mit Ausnahme der Erde, von Osten nach Westen. Er wird als gemeinschaftliches Maß für alle Bewegungen erkannt, da die Zeit hauptsächlich nach der Anzahl der Tage gemessen wird.

Ferner sehen wir andere, gleichsam rückläufige Kreisbewegungen, d. h. von Westen nach Osten, vor sich gehen, nämlich die der Sonne, des Mondes und der fünf Planeten. . . .

Sie unterscheiden sich jedoch in mehrfacher Weise: erstens darin, daß sie sich nicht um dieselben Pole drehen, um die jene erste Bewegung vor sich geht, indem sie durch die Schiefe der Ekliptik laufen; zweitens

darin, daß sie sich in ihrem eigenen Umlauf nicht gleichförmig zu bewegen scheinen, denn man beobachtet, daß der Lauf von Sonne und Mond bald langsamer, bald schneller ist. Die übrigen fünf Planeten sehen wir aber auch zuweilen rückläufig und beim Übergang stillstehen. ....

Es kommt noch hinzu, daß sie zuweilen der Erde näher kommen, wo sie erdnah, dann wieder sich mehr von ihr entfernen, wo sie erdffern genannt werden. Nichtsdestoweniger muß zugegeben werden, daß die Bewegungen kreisförmig oder aus mehreren Kreisen zusammengesetzt sind, wodurch derartige Ungleichheiten sich nach einem zuverlässigen Gesetz und einer feststehenden Periode richten, was nicht der Fall wäre, wenn sie nicht kreisförmig wären. Denn der Kreis allein kann seinen Weg wiederholen, wie denn die Sonne uns sozusagen durch ihre aus Kreisen zusammengesetzte Bewegung die Ungleichheit der Tage und Nächte und die vier Jahreszeiten wiederholt, woran mehrere Bewegungen erkannt werden; denn es kann nicht sein, daß ein einfacher Himmelskörper sich in einem einzigen Kreis ungleichmäßig bewegt. Denn das müßte entweder von einer Unbeständigkeit in der Natur des Bewegenden, sei sie nun durch eine äußere Ursache, oder durch sein inneres Wesen herbeigeführt, oder von einer Veränderung des bewegten Körpers herrühren. Da aber der Verstand sich gegen beides sträubt, und es unwürdig ist, derartiges bei dem anzunehmen, was nach der besten Ordnung eingerichtet ist, so muß man zugeben, daß die gleichförmigen Bewegungen jener Körper uns ungleichförmig erscheinen entweder wegen der Verschiedenheit der Pole jener Kreise, oder weil die Erde sich nicht im Mittelpunkt der Kreise befindet, in denen sich jene Körper bewegen, und weil sie uns, die wir die Bewegungen der Gestirne von der Erde aus beobachten, wegen der ungleichen Entfernungen in größerer Nähe zufällig größer erscheinen als wenn sie weiter entfernt sind, wie in der „Optik“ bewiesen wird. Auf diese Weise erscheinen uns die Bewegungen, die in gleichen Zeiten gleiche Kreisbögen durchlaufen, wegen der verschiedenen Entfernungen ungleich. Deshalb halte ich es vor allen Dingen für notwendig, daß wir sorgfältig untersuchen, welche Stellung die Erde zum Himmel einnimmt, damit wir, während wir das Erhabenste erforschen wollen, nicht das Nächstliegende außer acht lassen und irrtümlich, was der Erde zukommt, den Himmelskörpern zuschreiben.

Kopernikus beschreibt hier in vollständiger Weise das traditionelle Argument, warum die Bewegungen der Himmelskörper Kreise sind. Nur eine gleichmäßige Kreisbewegung oder eine Kombination solcher Bewegungen kann seiner Meinung nach die regelmäßige Wiederkehr aller Himmelserscheinungen in festen Intervallen erklären. Soweit ist jedes einzelne seiner Argumente aristotelisch oder scholastisch, sein Universum ist von dem der traditionellen Kosmologie ununterscheidbar. In mancher Hinsicht ist er noch mehr Aristoteliker als viele seiner Vorgänger und Zeitgenossen. Er wird zum Beispiel der Verletzung der gleichförmigen Bewegung einer Sphäre durch die Verwendung eines Äquanten nicht zustimmen.

Der radikale Kopernikus hat sich bisher als erzkonservativ erwiesen. Doch er kann die Einführung der Erdbewegung nicht länger hinausschieben. Er muß nun diesen Bruch mit der Tradition begründen, und seltsam genug, gerade in diesem Bruch zeigt sich seine Abhängigkeit von der Tradition besonders deutlich. Auch im Widerspruch bleibt er solange wie möglich ein Aristoteliker. Beginnend im 5. Kapitel und kulminierend in der allgemeinen Diskussion der Bewegung in den Kapiteln 8 und 9 schlägt Kopernikus vor, daß auch die Erde als Kugel wie die anderen Himmelskörper an den zusammengesetzten Kreisbewegungen teilnehmen müsse, die seiner Meinung nach für eine Kugel natürlich sind.

## Kapitel V

### Ob der Erde eine kreisförmige Bewegung zukommt und über ihren Ort

Es ist bereits nachgewiesen, daß die Erde die Gestalt einer Kugel hat. Ich bin der Ansicht, daß nunmehr untersucht werden muß, ob aus ihrer Form auch ihre Bewegung folgt und welchen Ort sie im Weltall einnimmt; denn sonst ist keine sichere Berechnung der Himmelserscheinungen zu finden. Der größte Teil der Gelehrten stimmt freilich darin überein, daß die Erde in der Mitte der Welt ruhe, so daß sie es für unbegreiflich und sogar lächerlich halten, das Gegenteil zu behaupten; wenn man jedoch die Sache sorgfältiger erwägt, so wird man einsehen, daß diese Frage noch nicht gelöst und deshalb keineswegs geringzuschätzen ist. Jede Ortsveränderung, die wahrgenommen wird, röhrt nämlich von einer Bewegung entweder des beobachteten Gegenstandes oder des Beobachters oder von, natürlich verschiedenen, Bewegungen beider her. Denn wenn der beobachtete Gegenstand und der Beobachter sich in gleicher Weise und in gleicher Richtung bewegen, so wird keine Bewegung wahrgenommen. Nun ist es aber die Erde, von der aus der

Umlauf des Himmels beobachtet und unseren Augen vorgeführt wird. Wenn daher der Erde irgendeine Bewegung zukäme, so würde diese an allem, was sich außerhalb derselben befindet, in Erscheinung treten, jedoch in entgegengesetzter Richtung, gleichsam als ob alles an der Erde vorüberzöge, welcher Art denn auch vornehmlich die tägliche Kreisbewegung ist. Denn diese scheint die ganze Welt zu ergreifen, und zwar alles, was außerhalb der Erde ist, mit Ausnahme der Erde selbst. Wenn man aber zugestehe, daß dem Himmel nichts von dieser Bewegung eigen sei, sondern daß die Erde sich von Westen nach Osten drehe, und wenn man dies ernstlich in bezug auf den scheinbaren Auf- und Untergang der Sonne, des Mondes und der Sterne in Betracht zöge, so fände man, daß es sich so verhält. Da der Himmel, der alles enthält und alles umhüllt, der gemeinschaftliche Raum aller Dinge ist, so läßt sich nicht sogleich ersehen, warum nicht eher dem Enthaltenen als dem Enthaltenen, dem Gesetzten als dem Setzenden eine Bewegung zugeschrieben wird. Dieser Meinung waren wirklich die Pythagoreer Herakleides und Ekphantos und der Syrakusaner Nicetas bei Cicero, indem sie die Erde sich in der Mitte der Welt drehen ließen. Sie waren nämlich der Ansicht, daß die Gestirne durch das Dazwischenetreten der Erde unter- und durch das Zurückweichen derselben aufgingen.

Aus dieser Annahme folgt der andere, nicht geringere Zweifel über den Ort der Erde, obgleich schon von fast allen angenommen und geglaubt worden ist, daß die Erde die Mitte der Welt einnehme. Wenn daher jemand behaupten möchte, die Erde befnde sich nicht im Mittelpunkt der Welt, der Abstand sei jedoch nicht so groß, daß er an der Fixsternsphäre gemessen werden könnte, wohl aber werde er an den Bahnen der Sonne und der Planeten deutlich und erkennbar, und wenn er ferner der Ansicht wäre, daß die Bewegung der letzteren aus diesem Grunde ungleichförmig erscheine, gleichsam als seien diese auf einen anderen Mittelpunkt als denjenigen der Erde bezogen, dann wird er vielleicht den wahren Grund der ungleichförmig erscheinenden Bewegung angeben können. Denn da die Planeten der Erde bald näher, bald entfernt zu sein scheinen, so ergibt sich daraus zwangsläufig, daß der Mittelpunkt der Erde nicht der Mittelpunkt ihrer Kreisbahnen ist. Daher steht auch nicht fest, ob die Erde ihre Entfernung von jenen verringert oder vergrößert oder jene ihre Entfernung von der Erde. Und es wäre daher nicht verwunderlich, wenn jemand der Erde außer der täglichen Umdrehung noch eine andere Bewegung zuschriebe. Die Ansicht aber, daß die Erde sich drehe, sich mit mehreren Bewegungen

im Raume fortbewege und eines von den Gestirnen sei, soll der Pythagoreer Philolaos, ein nicht alltäglicher Mathematiker, vertreten haben, weshalb Plato nicht zögerte, nach Italien zu reisen, um ihn aufzusuchen, wie diejenigen berichten, die Platos Leben beschrieben haben.

Kopernikus weist hier auf den unmittelbarsten Vorteil der Vorstellung einer bewegten Erde für den Astronomen hin. Wenn sich die Erde auf einer Kreisbahn um einen Mittelpunkt bewegt und um ihre Achse rotiert, dann können zumindest qualitativ die rückläufigen Bewegungen und die verschiedenen Zeiten, die ein Planet für aufeinanderfolgende Umläufe um die Ekliptik braucht, ohne die Benützung von Epizykeln erklärt werden. Im System des Kopernikus sind die hauptsächlichen Unregelmäßigkeiten der Planetenbewegung nur scheinbar. Ein Planet, der sich tatsächlich gleichmäßig bewegt, würde von der bewegten Erde aus eine unregelmäßige Bewegung zeigen. Kopernikus meint, wir sollten aus diesem Grund an eine Bahnbewegung der Erde glauben. Doch sonderbar genug, in den Teilen seines Werkes, die dem Laien zugänglich sind, demonstriert Kopernikus diesen Punkt nicht klarer, als er es bereits getan hat. Auch zeigt er die anderen astronomischen Vorteile nicht, die er an anderer Stelle erwähnt. Er fordert den nichtmathematischen Leser auf, sie für gültig zu erachten, obwohl es nicht schwierig gewesen wäre, sie qualitativ zu demonstrieren. Nur in den späteren Teilen von *De Revolutionibus* lässt er die wahren Vorteile seines Systems deutlich werden, und da er dort nicht von rückläufigen Bewegungen im allgemeinen, sondern von den schwerverständlichen quantitativen Einzelheiten der Rückwärtsbewegungen jedes einzelnen Planeten spricht, konnten nur die Fachleute entdecken, worauf sich die früheren Hinweise auf die astronomischen Vorteile bezogen. Seine dunkle Ausdrucksweise mag Absicht gewesen sein, wies er doch zuvor auf die pythagoreische Tradition hin, die Geheimnisse der Natur jenen vorzuenthalten, die nicht zuvor durch das Studium der Mathematik (und durch andere mystische Riten) gereinigt worden waren. Auf jeden Fall erklärt dies zum Teil, wie sein Werk aufgenommen wurde.

In den nächsten zwei Abschnitten werden wir die astronomischen Konsequenzen der Erdbewegungen im Detail betrachten, doch zunächst müssen wir die allgemeine Beschreibung der Physik und Kosmologie des Kopernikus vervollständigen. Wir lassen für den Augenblick Kapitel 6 „Über die Unermeßlichkeit des Himmels im Vergleich zur Größe der Erde“ aus und wenden uns den zentralen Kapiteln zu, in denen Kopernikus zunächst den geneigten Leser zu glauben bittet, daß astronomische Argumente die Erdbewegungen um den Mittelpunkt notwendig machen und dann versucht, jene Bewegung physikalisch zu begründen.

## Kapitel VII

Warum die Alten glaubten, die Erde ruhe in der Mitte der Welt gleichsam als Mittelpunkt

Deshalb haben die alten Philosophen mit einigen anderen Gründen zu beweisen versucht, daß die Erde in der Mitte der Welt stehe. Als hauptsächlichste Ursache aber führen sie Schwere und Leichtigkeit an. Denn das Element der Erde ist das schwerste, und alles, was Gewicht hat, bewegt sich auf sie zu, indem es nach deren innerster Mitte strebt. Da nun die Erde, nach der sich die schweren Gegenstände von allen Seiten her rechtwinklig zur Oberfläche gemäß ihrer Natur hinbewegen, kugelförmig ist, so würden sie, wenn sie nicht eben auf der Oberfläche zurückgehalten würden, in ihrem Mittelpunkt zusammentreffen; ... Es scheint aber zu folgen, daß die Körper, die sich nach der Mitte hin bewegen, dort ruhen würden. Um so mehr wird also die ganze Erde in der Mitte unbeweglich sein und, was sie auch alles an fallenden Körpern in sich aufnimmt, durch ihr Gewicht unbeweglich bleiben.

Ebenso stützen sie sich auch bei ihren Beweisen auf den Grund der Bewegung und deren Natur. Aristoteles sagt nämlich, daß die Bewegung eines einfachen Körpers einfach sei. Von den einfachen Bewegungen sei aber die eine geradlinig, die andere kreisförmig; von den geradlinigen aber gehe die eine aufwärts, die andere abwärts. Deshalb gehe jede einfache Bewegung entweder nach der Mitte hin, wenn sie abwärts, oder von der Mitte weg, wenn sie aufwärts verläuft, oder um die Mitte herum, und dann sei sie selbst eine kreisförmige. [Nach der aristotelischen und scholastischen Physik werden natürliche Bewegungen, die einzigen Bewegungen, die ohne äußeren Anstoß erfolgen können, durch die Natur des bewegten Körpers verursacht. Die natürliche Bewegung eines jenes einfachen Körpers (der fünf Elemente – Erde, Wasser, Luft, Feuer und Äther) müssen selbst einfach sein, weil dies eine Folge ihrer einfachen und elementaren Natur ist. Und schließlich gibt es nur drei geometrisch einfache Bewegungen innerhalb des sphärischen Universums (hinauf, hinunter, auf einer Kreisbahn um dem Mittelpunkt.) Nur der Erde und dem Wasser, die für schwer gelten, kommt es zu, sich abwärts zu bewegen, d. h. nach der Mitte hinzustreben, der Luft aber und dem Feuer, die Leichtigkeit besitzen, sich aufwärts und von der Mitte weg zu bewegen. Es scheint folgerichtig, daß diesen vier Elementen die geradlinige Bewegung zugestanden werden muß, den Himmelskörpern aber, daß sie sich um die Mitte im Kreise drehen. So Aristoteles.

Wenn daher, sagt der Alexandriner Ptolemäus, die Erde sich drehe, wenigstens in einer täglichen Umdrehung, so müßte das Gegenteil von dem oben Gesagten eintreten. Es müßte nämlich die Bewegung die heftigste und deren Geschwindigkeit, die in vierundzwanzig Stunden den ganzen Umfang der Erde durchmesse, unübertreffbar sein. Was aber in jähre Drehung versetzt wird, scheint für eine Zusammenhäufung geradezu ungeeignet zu sein und eher insgesamt zerstreut zu werden, wenn nicht die zusammenhängenden Teile mit einiger Festigkeit zusammengehalten würden. Und schon längst, sagt er, hätte die losgelöste Erde den Himmel selbst verwüstet (was äußerst lächerlich ist), und noch weniger würden die Lebewesen und alle sonstigen losgelösten Massen irgendwie unerschüttert geblieben sein. Aber auch die geradlinig fallenden Körper würden nicht an den ihnen bestimmten Ort in der Senkrechten gelangen, da er inzwischen mit so großer Geschwindigkeit darunter weggezogen wäre. Auch sähen wir Wolken und was sonst in der Luft schwebte, sich immer nach Westen bewegen. [Man beachte, daß Kopernikus das ursprüngliche Argument des Ptolemäus beträchtlich erweitert. Es ist nicht klar, daß Ptolemäus so weit gegangen wäre.]

## Kapitel VIII

### Widerlegung der angeführten Gründe und ihre Unzulänglichkeit

Aus diesen und ähnlichen Gründen behauptet man, daß die Erde in der Mitte der Welt ruhe und daß es sich unzweifelhaft so verhalte. Wenn aber nun einer der Meinung ist, die Erde drehe sich, so wird er gewiß auch die Ansicht vertreten, daß diese Bewegung natürlich und nicht gewaltsam sei. Was aber der Natur gemäß ist, das bringt Wirkungen hervor, die dem entgegengesetzt sind, was durch Gewalt geschieht. Denin die Dinge, auf die Gewalt oder ein äußerer Anstoß ausgeübt wird, müssen zerstört werden und können nicht lange bestehen. Was aber von Natur geschieht, verhält sich richtig und bleibt in seinem besten Zusammenhang. Ohne Grund also fürchtet Ptolemäus, daß die Erde und alle irdischen Gegenstände bei einer durch die Tätigkeit der Natur entstandenen Umdrehung zerstreut würden, die eine weit andere ist als die der Kunst oder als das, was von Menschengeist hervorgebracht werden könnte.

Warum aber stellt er diese Vermutung nicht, und zwar in viel höherem Maße, über die Welt an, deren Bewegung um soviel schneller sein muß, um wieviel der Himmel größer ist als die Erde? Oder ist der Himmel

deswegen unermeßlich geworden, weil er durch die unaussprechliche Gewalt der Bewegung von der Mitte entfernt wird, während er sonst, wenn er stillstände, zusammenfiele? Gewiß ginge auch die Größe des Himmels ins Unendliche, wenn sich dieser Gedanke als wirklich erwiese. Denn je mehr er durch den äußeren Anstoß der Bewegung in die Höhe getrieben würde, um so schneller würde auch die Bewegung wegen des ständig wachsenden Kreises, den er in einem Zeitraum von vierundzwanzig Stunden durchlaufen müßte; und umgekehrt, wenn die Bewegung wüchse, wüchse auch die Unermeßlichkeit, des Himmels. So würde die Geschwindigkeit die Größe und die Größe die Geschwindigkeit ins Unendliche steigern. ...

Aber man sagt, daß außerhalb des Himmels kein Körper, kein Ort, kein leerer Raum und überhaupt nichts existiere, und daß es deshalb nichts gäbe, wohin der Himmel hinaustreten könne. Freilich wäre es dabei verwunderlich, daß etwas von nichts umschlossen werden könnte. Wenn jedoch der Himmel unendlich und nur an der inneren Höhlung begrenzt wäre, so bestätigt sich vielleicht noch mehr, daß außerhalb des Himmels nichts existiert, weil jedes Ding, welche Größe es auch haben mag, sich innerhalb desselben befindet; der Himmel aber wird unbeweglich bleiben. ...

Ob nun also die Welt endlich oder unendlich ist, wollen wir dem Streit der Naturphilosophen überlassen, da wir ja sicher wissen, daß die Erde, zwischen Polen eingeschlossen, von einer kugelförmigen Oberfläche begrenzt wird. Warum also zögern wir noch, lieber ihr eine Bewegung zuzugestehen, die von Natur mit ihrer Form übereinstimmt, als anzunehmen, daß die ganze Welt, deren Grenze man nicht kennt und nicht kennen kann, in Bewegung sei? Und warum wollen wir nicht bekennen, daß die tägliche Umdrehung zwar am Himmel erscheint, in Wahrheit aber bei der Erde stattfindet, und daß es sich hiermit ebenso verhält, wie wenn Vergils Äneas sagt: „Wir laufen aus dem Hafen aus, und Länder und Städte weichen zurück.“ Denn wenn ein Schiff ruhig dahinfährt, wird alles, was außerhalb ist, von den Schiffen so gesehen, als ob es sich entsprechend der Bewegung des Schiffes bewege, und umgekehrt sind die Schiffer der Meinung, daß sie mit allem, was sie bei sich haben, stillstehen. Ebenso kann es sich freilich bei der Bewegung der Erde verhalten, so daß man glaubt, die ganze Welt drehe sich. Was sollen wir nun über die Wolken und über das übrige, was irgendwie in der Luft schwebt oder fällt und wieder in die Höhe steigt, sagen?

Kann man etwas anderes sagen, als daß nicht nur die Erde sich mit dem ihr verbundenen, wäßrigen Element so bewege, sondern auch ein ziemlich großer Teil der Luft und alles, was sonst noch in derselben Weise mit der Erde Ähnlichkeit hat, sei es nun, daß die zunächstliegende Luft, mit erdiger oder wäßriger Materie gemischt, demselben Naturgesetz folgt wie die Erde, oder sei es, daß der Luft die Bewegung mitgeteilt worden ist, indem sie ihrer mittels der Berührung mit der Erde und vermöge des Widerstandes durch die fortwährende Umdrehung teilhaftig wird? ...

Wir müssen zugeben, daß die Bewegung der fallenden und steigenden Dinge gegenüber dem Weltall zwiefach und stets aus geradlinigen und kreisförmigen Bewegungen zusammengesetzt sei. [Diese Ansicht hat früher Oresme vertreten.] Da nun einmal das, was durch sein Gewicht nach unten strebt, in der Hauptsache erdiger Natur ist, gibt es keinen Zweifel, daß diese Teile dieselbe Natur bewahren wie ihr Ganzes. ...

[Daher wird sich ein Stein, von der Erde hochgehoben, weiterhin in einer Kreisbewegung mit der Erde bewegen und gleichzeitig geradlinig zur Erdoberfläche fallen. Seine Gesamtbewegung wird eine Art Spirale sein.]

Wenn man also behauptet, dem einfachen Körper käme eine einfache Bewegung zu, so erweist sich das besonders an der Kreisbewegung als richtig, solange der einfache Körper an seinem natürlichen Ort und in seiner Einheit verharrt. Am Ort ist nämlich die Bewegung keine andere als eine rotierende, die ganz in sich bleibt, als ob der Körper ruhe. Die geradlinige Bewegung ergreift die Körper, die von ihrem natürlichen Ort weggegangen oder -gestoßen oder auf irgendeine Weise von diesem abgekommen sind. Nichts aber widerstrebt der Ordnung und der Form der ganzen Welt so sehr wie das Außerhalb-seines-Ortes-Sein. Die geradlinige Bewegung tritt also nur auf bei Dingen, die sich nicht richtig verhalten und nicht völlig ihrer Natur gemäß sind, indem sie sich von ihrem Ganzen trennen und seine Einheit verlassen....

[Das Argument zeigt, wie schnell die traditionelle Unterscheidung zwischen irdischen und himmlischen Regionen verschwinden muß, wenn die Erde ein Planet wird, denn Kopernikus wendet hier ein traditionelles Argument über Himmelskörper auf die Erde an. Kreisförmige Bewegung, einfach oder zusammengesetzt, kommt der Ruhe am nächsten. Sie kann für die Erde natürlich sein, genauso wie sie stets für den Himmel natürlich war, weil sie die beobachtete Einheit und

Regelmäßigkeit des Universums nicht zerstören kann. Lineare Bewegung kann andererseits für kein Objekt natürlich sein, das an seinen Platz gelangt ist, denn lineare Bewegung ist zerstörend, und eine natürliche Bewegung, die das Universum zerstört, ist absurd.]

Es kommt auch noch hinzu, daß der Zustand der Unbeweglichkeit für edler und göttlicher gilt als der der Veränderung und Unbeständigkeit, der deshalb eher der Erde als der Welt zukomme. Ich füge noch hinzu, daß es reichlich widersinnig erscheint, dem Enthaltenen und Setzenden eine Bewegung zuzuschreiben und nicht vielmehr dem Enthaltenen und Gesetzten, welches die Erde ist. Da endlich offenbar ist, daß die Planeten der Erde bald näher, bald ferner zu stehen kommen, so wird auch dann die Bewegung ein und desselben Körpers um einen Mittelpunkt, der ihrer [= der Aristoteliker] Meinung nach die Erde sein soll, auch von der Mitte fort und nach ihr hin gerichtet sein. [Und dies verletzt gerade die Gesetze, aus denen die Aristoteliker die zentrale Position der Erde ableiten. Denn nach diesen Gesetzen sollten die Planeten nur eine einzige Bewegung haben.] Man muß also die Bewegung um die Mitte herum allgemeiner fassen, und es genügt, wenn jede einzelne Bewegung ihren eigenen Mittelpunkt hat.

Man sieht also, daß aus all diesem die Bewegung der Erde wahrscheinlicher ist als ihre Unbeweglichkeit, zumal hinsichtlich der täglichen Umdrehung, als einer der Erde besonders eigentümlichen. Und das, glaube ich, genügt für den ersten Teil des Problems.

## Kapitel IX

Ob der Erde mehrere Bewegungen beigelegt werden können und vom Mittelpunkt der Welt

Da also der Beweglichkeit der Erde nichts im Wege steht, so muß, glaube ich, nun untersucht werden, ob ihr auch mehrere Bewegungen zukommen, so daß sie für einen der Planeten gehalten werden kann. Daß sie nämlich nicht der Mittelpunkt aller Kreisbewegungen ist, beweisen die scheinbar ungleichförmigen Bewegungen der Planeten und ihre veränderlichen Abstände von der Erde, die durch konzentrische Kreise um die Erde nicht erklärt werden können. Da also mehrere Mittelpunkte existieren, so wird auch, was den Mittelpunkt der Welt betrifft, niemand ohne Grund im Zweifel sein, ob es der Schwerpunkt der Erde ist oder ein anderer. Ich wenigstens bin der Ansicht, daß die Schwere nichts anderes ist als ein gewisses natürliches Streben der

Teile, das ihnen von der göttlichen Vorsehung des Weltenmeisters eingepflanzt ist, damit sie sich in Form einer Kugel zu einer Einheit und Ganzheit zusammenschließen. Es ist anzunehmen, daß dieses Streben auch der Sonne, dem Mond und den übrigen Planeten innwohnt, so daß sie durch diese Wirkung in der runden Gestalt, in der sie erscheinen, verharren; sie vollenden nichtsdestoweniger in vielfacher Weise ihre Kreisläufe.

Wenn also auch die Erde andere Bewegungen als die um ihren Mittelpunkt ausführt, so werden es solche sein müssen, die nach außen hin in ähnlicher Weise an vielen Erscheinungen deutlich werden, aus denen wir den jährlichen Umlauf erkennen. Denn wenn derselbe von der Sonne auf die Erde übertragen wird, wobei man die Unbeweglichkeit der Sonne zugegeben hat, so werden der Aufgang und der Untergang der Sternbilder und der Fixsterne, wodurch sie Morgen- und Abendsterne werden, in der gleichen Weise zu sehen sein, und so wird es den Anschein erwecken, daß auch die Stillstände und die Recht- und Rückläufigkeit der Planeten nicht Bewegungen dieser, sondern der Erde sind, die dieselben für ihre scheinbare Bewegung entlehnern. Schließlich wird man sich überzeugen, daß die Sonne selbst im Mittelpunkt der Welt steht. Und das alles lehren uns das Gesetz der Reihenfolge, in der die Planeten angeordnet sind, und die Harmonie der ganzen Welt, wenn wir nur selbst die Sache, wie man sagt, mit beiden Augen betrachten.

In diesen letzten drei Kapiteln finden wir die kopernikanische Theorie der Bewegung, die ihm die Vertauschung von Erde und Sonne gestatten soll, ohne daß dabei ein im wesentlichen aristotelisches Universum in Brüche geht. Nach Kopernikus sammelt sich alle Materie, himmlische und irdische, von selbst in Kugeln an, die Kugeln drehen sich dann aufgrund ihrer Natur. Ein Stück Materie, das von seinem natürlichen Platz entfernt wurde, wird mit seiner Kugel weiterhin mitrotieren und gleichzeitig durch eine geradlinige Bewegung an seinen Platz zurückkehren. Es ist eine besonders widersprüchliche Theorie (wie Kapitel 6 noch genauer zeigen wird), sie ist außer in ihren widersprüchlichsten Teilen auch nicht besonders originell. Kopernikus mag sie unabhängig wiederentdeckt haben, doch die wesentlichsten Elemente seiner Theorie der Bewegung und seiner Kritik an Aristoteles kann man bei früheren scholastischen Autoren finden, besonders bei Oresme. Nur wenn sie auf das begrenztere Problem von Oresme angewendet werden, sind sie weniger unglaublich.

Der Verzicht auf eine entsprechende physikalische Grundlage der Erdbewegung spricht nicht gegen Kopernikus. Er hat die Bewegung der Erde nicht aus physikalischen Gründen ersonnen oder akzeptiert. Das physikalische und kosmologische Problem, das in dem Ersten Buch so halbherzig behandelt wird, ist nicht wirklich sein Problem, doch zeigen die Ungereimtheiten seiner Physik, wie die Folgerungen seiner astronomischen Neuerung über das ursprüngliche Problem hinausreichen, und wie wenig sich der Urheber der Neuerung selbst die aus seinem Werk entsprungene Revolution aneignen konnte. Die bewegte Erde ist in einem klassischen aristotelischen Universum eine Anomalie, – das Universum von *De Revolutionibus* ist in jeder Hinsicht klassisch. Wie er selbst sagt, wurde die Bewegung der Sonne bloß auf die Erde übertragen. Die Sonne ist noch kein Stern, sondern der einzigartige Zentralkörper, um den herum das Universum konstruiert ist; sie erhält die alten Funktionen der Erde und noch einige neue. Wie wir bald sehen werden, ist das kopernikanische Universum weiterhin endlich; weiterhin bewegt ein Mechanismus aus konzentrischen Kugeln alle Planeten, selbst wenn sie nicht mehr von der äußeren Sphäre angetrieben werden können, die jetzt in Ruhe ist. Alle Bewegungen müssen aus Kreisen zusammengesetzt sein; obwohl Kopernikus die Erde in Bewegung versetzt, kann nicht einmal er auf Epizykeln verzichten. Man findet die kopernikanische Revolution, wie wir sie kennen, kaum in *De Revolutionibus*, und dies ist die zweite wesentliche Überraschung des Werkes.

### *Kopernikanische Astronomie – die zwei Kugeln*

Wir sind noch nicht mit Kopernikus' Erstem Buch fertig, doch werden wir die Kapitel 10 und 11 später im Rahmen einer astronomischen Diskussion betrachten, die über die von Kopernikus für den Laien gedachten Argumente hinausgeht. Wir werden uns in einem späteren Abschnitt nochmals kurz seinem Buch zuwenden, zunächst aber wollen wir herausfinden, warum Astronomen von Kopernikus' Vorschlag möglicherweise mehr beeindruckt waren als Laien. Dies kann man kaum im Ersten Buch entdecken.

Kopernikus versah die Erde mit drei gleichzeitigen Zirkularbewegungen: einer täglichen Drehung um die Achse, einer jährlichen Bahnbewegung und einer jährlichen kegelförmigen Bewegung der Achse. Die ostwärts gerichtete tägliche Drehung erklärt die scheinbaren Tageskreise der Sterne, der Sonne, des Mondes und der Planeten. Wenn die Erde im Mittelpunkt der Sternensphäre liegt und sich täglich einmal in östlicher Richtung um eine Achse

durch ihren eigenen Nord- und Südpol dreht, dann werden alle Gegenstände, die bezüglich der Sternenkugel stationär oder nahezu stationär sind, in Kreisbögen über den Horizont nach Westen wandern, wie man es bei den Himmelskörpern beobachtet.

Sollten die Argumente von Kopernikus oder Oresme in diesem Punkt unklar sein, so wird ein Blick auf die Sternpfade in Bild 6 und 7 (Seite 18 und 20) helfen. Diese Spuren konnten entweder durch eine Kreisbewegung der Sterne vor einem festen Beobachter (ptolemäische Erklärung) oder durch eine Rotation des Beobachters vor den fixen Sternen (kopernikanische Erklärung) hervorgerufen werden. Oder man studiere das neue Zwei-Kugel-Universum in Bild 26, einer vereinfachten Form jener Zeichnung, die wir bei der Diskussion der Sternbewegungen im Zwei-Kugel-Universum (Bild 11) verwendet haben; jedoch werden nun die Erdpole gezeigt und die Drehrichtung umgekehrt. Als wir das erste Mal ein ähnliches Diagramm verwendeten, hielten wir die Erde, den Beobachter und die Horizontebene fest und drehten die Sternenkugel westwärts. Nun müssen wir die äußere Kugel festhalten und die Erde, den Beobachter und die Horizontebene zusammen ostwärts drehen. Ein Beobachter, der im Mittelpunkt der Horizontebene sitzt und sich mit ihr bewegt, wird zumindest aus dem, was er am Himmel sehen kann, keinen Unterschied zwischen den zwei Fällen feststellen. In beiden Fällen wird er die Sterne und Planeten am östlichen Rand des Horizonts aufgehen sehen und zum westlichen Horizont in denselben Kreisbahnen wandern sehen.

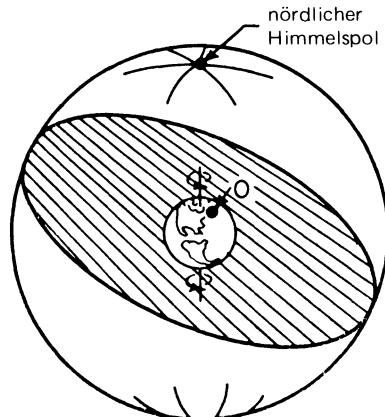


Bild 26

Die rotierende Erde im Mittelpunkt einer festen Sternenkugel. Beim Vergleich mit Bild 11 beachte man, daß hier die Horizontebene mit der Erde mitgedreht werden muß, so daß ihre geometrische Beziehung zum Beobachter O erhalten bleibt.

Bisher haben wir die rotierende Erde im Mittelpunkt der stationären Sternenkugel belassen; das heißt, wir haben das Modell betrachtet, das von Heraklid entworfen und von Oresme ausgearbeitet worden war. Dies ist nur der erste Schritt zu einem kopernikanischen Universum, der nächste ist wesentlich radikaler und schwieriger. Wie Kopernikus in dem Ausschnitt von Kapitel 5, den wir bereits zitierten, aufzeigt, müssen wir darauf vorbereitet sein, nicht nur eine Bewegung im Mittelpunkt, sondern auch vom Mittelpunkt weg in Betracht zu ziehen, wenn wir die Möglichkeit der Erdbewegung überhaupt in Betracht ziehen wollen. Tatsächlich, so sagt Kopernikus, braucht eine bewegte Erde nicht im Mittelpunkt zu sein. Sie muß sich nur relativ nahe am Mittelpunkt befinden; solange sie dem Zentrum nahe genug bleibt, kann sie sich ohne Einfluß auf die scheinbaren Sternbewegungen beliebig bewegen. Dies war für seine Astronomiekollegen ein schwer zu akzeptierender Schluß, weil die Vorstellung, daß die Erde in der Mitte sei, im Gegensatz zur Vorstellung von der Unbeweglichkeit der Erde, die sich nur vom gesunden Menschenverstand und der irdischen Physik ableitet, direkt aus astronomischen Beobachtungen abgeleitet werden kann. Die kopernikanische Vorstellung einer nicht im Mittelpunkt ruhenden Erde schien daher zunächst den direkten Konsequenzen astronomischer Beobachtungen zu widersprechen, und um diesen Konflikt oder einen ähnlichen, den wir am Ende des nächsten Abschnittes betrachten werden, zu vermeiden, mußte Kopernikus die Größe der Sternenkugel beträchtlich anwachsen lassen und damit einen ersten Schritt zum unendlichen Universum unternehmen, der von seinen Nachfolgern vollendet wurde. Die kopernikanische Diskussion der Position der Erde erscheint im Kapitel 6 seines Ersten Buches. Hier brauchen wir eine klarere und umfassendere Darstellung.

Die zentrale Position der Erde innerhalb der Sternenkugel kann offensichtlich aus der Beobachtung abgeleitet werden, daß der Horizont eines jeden irdischen Beobachters die Sternenkugel halbiert. Zum Beispiel sind Frühlings- und Herbst-Tag- und Nachtgleiche zwei diametral entgegengesetzte Punkte auf der Sternenkugel, denn sie sind als Schnittpunkte zweier Großkreise auf der Kugel definiert, des Äquators und der Ekliptik. Die Beobachtung zeigt, daß immer dann, wenn einer dieser Punkte gerade über dem Horizont im Osten aufgeht, der andere im Westen untergeht. Dasselbe gilt für jedes andere Paar von diametral entgegengesetzten Punkten auf der Kugel. Offensichtlich können diese Beobachtungen nur erklärt werden, wenn die Horizontebene (Bild 26 oder das frühere Bild 11) durch den Mittelpunkt der Sternenkugel gezogen wird, so daß auch sie die Kugel in einem Großkreis schneidet. Nur wenn die Horizontebene die Sternenkugel in einem

Großkreis schneidet, werden diametral entgegengesetzte Punkte auf der Kugel stets im gleichen Augenblick auf- und untergehen.

Alle Horizontebenen müssen jedoch tangential zur kugelförmigen Erde gezeichnet werden. (Wir haben die Konstruktion in den Bildern 26 und 11 vermieden, weil wir dort die Erde in übersteigerter Größe gezeichnet haben.) Daher muß der Beobachter selbst nahe beim Mittelpunkt der Sternenkugel sein. Die gesamte Oberfläche der irdischen Kugel muß im oder sehr nahe dem Zentrum sein. Die Erde muß sehr klein sein, fast ein Punkt. Wenn wie in Bild 27 die Erde (dargestellt durch den inneren konzentrischen Kreis) relativ groß im Vergleich zur Sternenkugel wäre, oder wenn die Erde (nun als schwarzer Punkt dargestellt) zwar klein wäre, jedoch vom Zentrum weit entfernt, dann würde die Horizontebene die Sternenkugel nicht halbieren und diametral entgegengesetzte Punkte auf der Kugel würden nicht gleichzeitig auf- und untergehen.

In dieser Form zeigt das Argument jene Schwäche, die Kopernikus ausgenützt hat. Die Beobachtung zeigt nicht, daß die Erde ein Punkt sein muß, weil man niemals sagen kann, daß etwa das Frühlingsäquinoktium exakt zum Zeitpunkt des Untergangs des Herbstäquinoktiums aufgeht. Grobe Beobachtungen mit bloßem Auge werden zeigen, daß zum Zeitpunkt des Untergangs des Herbstäquinoktiums das Frühjahrsäquinoktium sich innerhalb eines Grades über dem Horizont befindet. Verbesserte Beobachtungen mit freiem Auge mit den notwendigen Korrekturen für die Beugung in der Atmosphäre und für die Unregelmäßigkeiten des tatsächlichen Horizonts könnten diese Zahlen auf ein Zehntel Grad vermindern. Doch keine Beobachtung

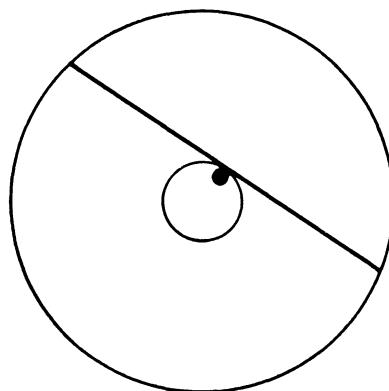


Bild 27

Wäre der Erddurchmesser zum Durchmesser der Sternkugel vergleichbar oder würde sich die Erde weit vom Mittelpunkt befinden, würde sie die Sternkugel nicht in zwei gleiche Hälften teilen.

mit bloßem Auge wird noch besser sein können. Man kann bloß zeigen, daß der Horizont die Kugel mit sehr großer Genauigkeit halbiert und daß alle irdischen Beobachter daher dem Mittelpunkt des Universums sehr nahe sein müssen. Doch, wie genau der Horizont die Kugel halbiert und wie nahe zum Mittelpunkt die irdischen Beobachter sein müssen, hängt von der Genauigkeit der Beobachtung ab.

Wenn wir zum Beispiel aus der Beobachtung wüßten, daß immer dann, wenn ein Äquinoktialpunkt am Horizont liegt, der *andere nicht mehr* als ein Zehntel Grad vom Horizont entfernt ist, dann kann kein irdischer Beobachter vom Mittelpunkt der Sternenkugel mehr als ein Tausendstel des Radius jener Kugel entfernt sein. Oder wenn es uns gelingen sollte, die Genauigkeit auf ein Hundertstel Grad zu verbessern, dann darf die innere Kugel von Bild 27 keinen Radius größer als ein Zehntausendstel des Radius der äußeren Kugel haben, und die ganze Erde muß wiederum innerhalb des inneren Kreises liegen. Wenn sich die Erde außerhalb des inneren Kreises bewegte, dann würde die Horizontebene die Sternenkugel mit einem größeren Fehler als ein Hundertstel Grad halbieren und unsere hypothetischen Beobachtungen würden die Diskrepanz aufdecken; solange jedoch die Erde innerhalb des inneren Kreises ist, wird die Horizontebene die Sternenkugel innerhalb der Genauigkeitsgrenzen der Beobachtung halbieren.

Dies ist Kopernikus' Argument. Die Beobachtung zwingt uns nur, die Erde innerhalb einer kleinen Kugel zu belassen, die mit der Sternenkugel konzentrisch ist. Innerhalb dieser inneren Kugel darf sich die Erde frei bewegen, ohne die Himmelserscheinungen zu stören. Im besonderen kann die Erde eine Bahnbewegung um den Mittelpunkt oder um die zentrale Sonne haben, wenn nur die Bahn sie niemals zu weit vom Mittelpunkt wegführt. „Zu weit“ bedeutet nur „zu weit im Vergleich zum Radius der äußeren Kugel“. Wenn der Radius der äußeren Kugel bekannt ist, dann begrenzen die Beobachtungen mit ihrer bekannten Genauigkeit den *Maximalradius* der Erdbahn. Wenn die Größe der Erdbahn bekannt ist (und sie kann nach einer Methode von Aristarch zur Messung des Abstandes Erde-Sonne bestimmt werden), dann setzen Beobachtungen von bekannter Genauigkeit Schranken für die *Minimalgröße* der Sternenkugel. Wenn etwa die Distanz zwischen Sonne und Erde nach Aristarch (siehe den technischen Anhang) 764 Erd-durchmesser beträgt, und wenn die Beobachtungen auf ein Zehntel Grad genau sind, dann muß der Radius der Sternenkugel mindestens tausendmal größer als der Radius der Erdbahn sein, das heißt mindestens 1 528 000 Erd-radien.

Wenn auch Kopernikus' Beobachtungen nicht so genau waren, ist unser Beispiel doch lehrreich, weil die Beobachtungen seines unmittelbaren Nachfolgers Brahe geringfügig genauer als ein Zehntel Grad waren. Unsere Abschätzung der minimalen Größe der Sternenkugel ist typisch für das 16. Jahrhundert. Im Prinzip ist das Resultat nicht unsinnig, denn im 16. und 17. Jahrhundert gab es keine direkte Möglichkeit, die Entfernung zur Sternenkugel zu bestimmen. Ihr Radius mag mehr als 1 500 000 Erdradien betragen haben. Doch wenn er so groß wäre – und Kopernikus forderte, daß er so groß sei –, dann mußte man einen echten Bruch mit der traditionellen Kosmologie in Kauf nehmen. Zum Beispiel hatte Al Fangani den Radius des Universums zu 20 110 Erdradien abgeschätzt, mehr als 75mal kleiner als die kopernikanische Schätzung. Das kopernikanische Universum mußte viel größer sein als das der traditionellen Kosmologie. Sein Volumen mußte *mindestens* 400 000mal so groß sein. Zwischen der Kugel des Saturn und der Sternenkugel breitet sich ungeheurer Raum. Die funktionelle Abhängigkeit der konzentrischen Kugeln des traditionellen Universums gibt es nicht mehr, obwohl Kopernikus diesen Bruch nicht mehr erkannt zu haben scheint.

### *Kopernikanische Astronomie – die Sonne*

Nach Kopernikus kann die Erde eine Bahnbewegung in einem beträchtlich vergrößerten Universum haben, doch bleibt das Problem so lange akademisch, bis man zeigen kann, daß die Bahnbewegung mit den beobachteten Bewegungen der Sonne und der anderen Planeten im Einklang steht. In den Kapiteln 10 und 11 seines Ersten Buches beschäftigt sich Kopernikus mit jenen Bewegungen. Wir fangen mit einer ausführlichen Beschreibung des Inhalts von Kapitel 11 an, in dem Kopernikus die Bahnbewegung der Erde und ihren Einfluß auf den scheinbaren Ort der Sonne beschreibt. Nehmen wir für den Augenblick an, daß die Mittelpunkte des Universums, der Sonne und der Erdbahn wie in Bild 28 zusammenfallen. In der Zeichnung blickt man auf die Ebene der Ekliptik von einer Stelle in der Nähe des Himmelsnordpols. Die Sternenkugel ist stationär. Die Erde wandert gleichmäßig in ihrer Umlaufbahn einmal im Jahr herum. Gleichzeitig dreht sie sich einmal in 23 Stunden 56 Minuten um ihre eigene Achse. Wenn die Erdbahn viel kleiner als die Sternenkugel ist, wird die Rotation der Erde genau die Tageskreise von Sonne, Mond, Planeten und Sternen wiedergeben, weil von jeder Stelle der Erdbahn aus alle diese Körper gegen die Sternenkugel beobachtet werden und sich mit ihr zu bewegen scheinen, während sich die Erde dreht.

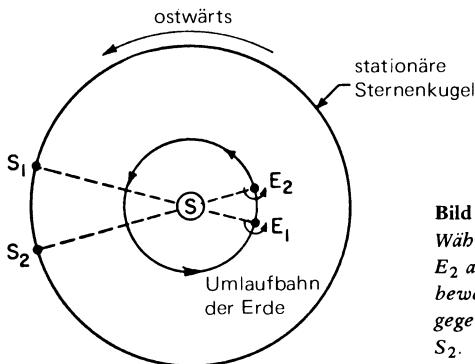
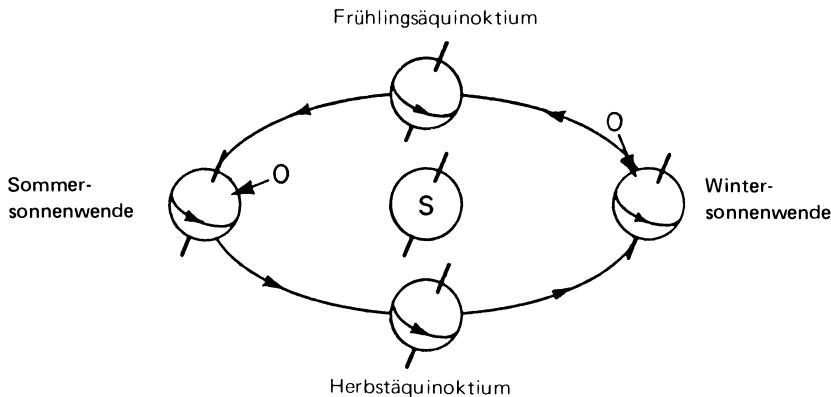


Bild 28

Während sich die Erde von E<sub>1</sub> nach E<sub>2</sub> auf ihrer kopernikanischen Bahn bewegt, verschiebt sich die Sonne S gegenüber den Sternen von S<sub>1</sub> nach S<sub>2</sub>.



**Bild 29** Die jährliche Bewegung der Erde auf ihrer kopernikanischen Bahn. Die Erdachse bleibt stets zu sich oder zu einer festen Linie durch die Sonne parallel. Daher steht für einen Beobachter O in mittleren nördlichen Breiten die Sonne im Sommer viel höher über dem Horizont als im Winter.

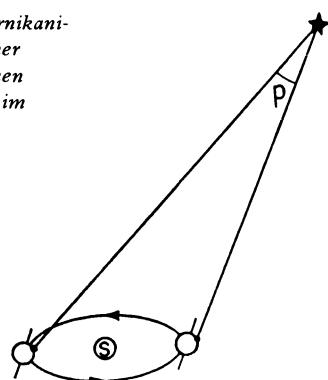


Bild 30

Jährliche Parallaxe eines Sterns. Da bei der Bewegung der Erde auf ihrer Bahn die Linie vom Beobachter zum Stern nicht zu sich parallel bleibt, sollte sich die scheinbare Position des Sterns innerhalb eines halben Jahres um den Winkel p verschieben.

In der Zeichnung sieht man die Erde an zwei Positionen, die sie in einem Abstand von 30 Tagen inne hat. An jeder Stelle wird die Sonne gegen die Sternenkugel gesehen, beide scheinbaren Örter der Sonne müssen auf der Ekliptik liegen, die als die Linie definiert ist, in der die Bahnebene der Erde die Kugel schneidet. Doch wenn sich die Erde von  $E_1$  nach  $E_2$  nach Osten bewegt hat, wird sich die Sonne scheinbar in östlicher Richtung von  $S_1$  nach  $S_2$  die Ekliptik entlang bewegt haben. Die kopernikanische Theorie sagt daher gerade dieselbe ostwärts gerichtete jährliche Bewegung der Sonne voraus wie die ptolemäische. Wie wir gleich sehen werden, sagt sie dieselben jahreszeitlichen Schwankungen der Höhe der Sonne am Himmel voraus.

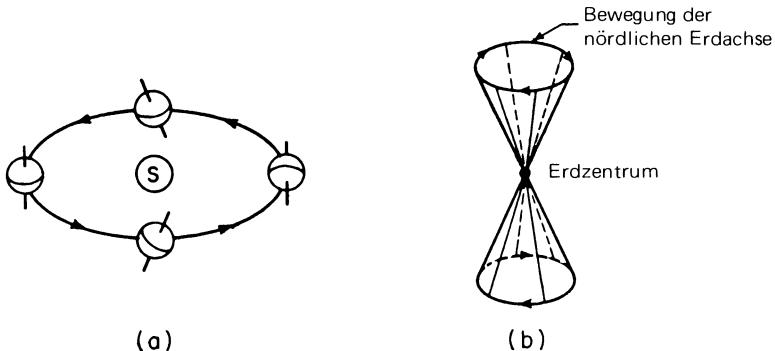
Bild 29 zeigt die Erdbahn, wie sie von einem Punkt auf der Himmelskugel, geringfügig nördlich vom Herbstäquinoktium, gesehen wird. Die Erde ist an den vier Stellen gezeichnet, die sie nacheinander zum Frühlingsäquinoktium, zur Sommersonnenwende, zum Herbstäquinoktium und zur Wintersonnenwende einnimmt. An diesen vier Stellen wie auch auf ihrer gesamten Bahn bleibt die Erdachse zu einer gedachten Linie parallel, die durch die Sonne verläuft und um  $23\frac{1}{2}^\circ$  gegen die Normale auf die Ebene der Ekliptik geneigt ist. Zwei kleine Pfeile zeigen die Position eines irdischen Beobachters in mittlerer nördlicher Breite um 12 Uhr Ortszeit am 22. Juni und 22. Dezember, den beiden Sonnenwenden. Linien von der Sonne zur Erde, die in der Zeichnung allerdings nicht gezogen wurden, geben die Richtung der Strahlen der Mittagssonne, die während der Sommersonnenwende deutlich höher steht als während der Wintersonnenwende. Eine ähnliche Konstruktion läßt sich für beliebige andere Zeiten durchführen.

Bild 29 zeigt zwei weitere interessante Züge des kopernikanischen Systems. Da die Erddrehung die Tageskreise der Sterne hervorruft, muß die Erdachse zum Mittelpunkt dieser Kreise auf der Sternenkugel zeigen. Nach der kopernikanischen Theorie beschreibt die Verlängerung der Erdachse im Lauf eines Jahres zwei kleine Kreise auf der Sternensphäre, einen um den nördlichen Himmelpol, den anderen um den südlichen. Für einen irdischen Beobachter sollten sich daher die Mittelpunkte der Tageskreise der Sterne einmal im Jahr scheinbar auf einem kleinen Kreis um den Himmelpol bewegen. Oder um es in einer, der Beobachtung näherstehenden Weise zu sagen, jeder Stern sollte seine Position auf der Sternenkugel geringfügig im Laufe eines Jahres zu ändern scheinen.

Diese scheinbare Bewegung, die man mit bloßem Auge nicht sehen kann und die erst 1838 entdeckt wurde, wird parallaktische Bewegung genannt. Weil zwei Linien zu einem Stern von entgegengesetzten Punkten auf der Erdbahn nicht völlig parallel sind (Bild 30), sollte der scheinbare Sternenort

zu verschiedenen Zeiten verschieden sein. Wenn jedoch die Distanz zum Stern sehr viel größer als der Erdbahndurchmesser ist, dann wird der Parallaxenwinkel  $p$  in Bild 30 äußerst klein und die Änderung des scheinbaren Sternenortes kaum beobachtbar sein. Die parallaktische Bewegung ist nur deshalb nicht sichtbar, weil die Sterne im Vergleich zur Größe der Erdbahn so weit entfernt sind. Die Situation entspricht genau der, die wir früher diskutiert haben, als wir überlegten, warum die Erdbewegung den Schnitt der Horizontebene und der Sternenkugel nicht veränderte. In der Tat handelt es sich um das gleiche Problem. In der Nähe des Horizonts ist es sehr schwer, genaue Messungen der Sternörter durchzuführen, doch die Suche nach parallaktischen Bewegungen ist nicht auf den Horizont beschränkt. Daher bietet die Beobachtung der Parallaxe eine wesentlich empfindlichere Überprüfung der Minimalgröße der Sternenkugel im Vergleich zur Erdbahn, als die Bestimmung der Sternörter in Horizontnähe je geben könnte; die kopernikanische Abschätzung der Größe der Kugel hätte also eher aus einer Diskussion der Parallaxe gewonnen werden sollen.

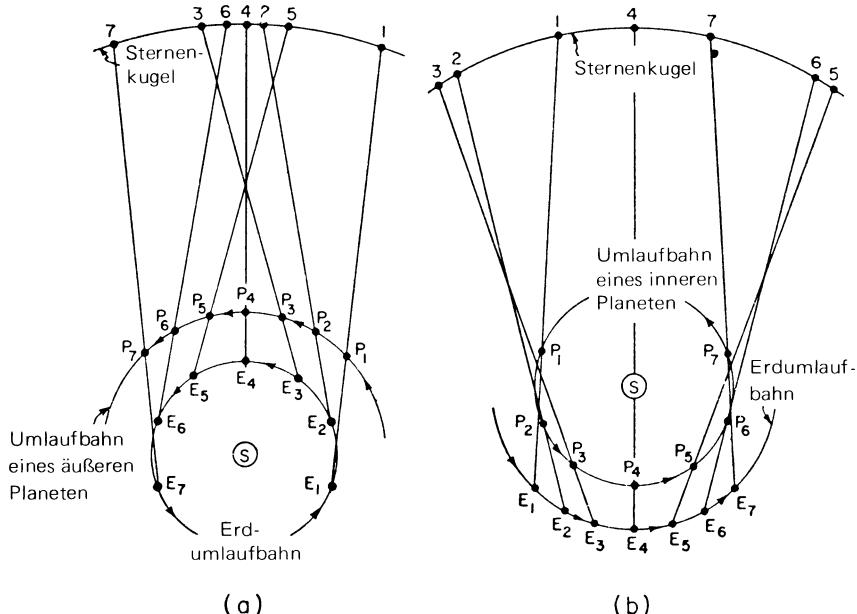
Der zweite Punkt, der in Bild 29 auffällt, betrifft nicht den Himmel, sondern Kopernikus selbst. Wir beschrieben die Bahnbewegung als eine einzige Bewegung, in der der Erdmittelpunkt auf einem Kreis um die Sonne geführt wird, während die Erdachse stets parallel zu einer festen Linie durch die Sonne bleibt. Kopernikus beschreibt diese physikalische Bewegung mittels zweier gleichzeitiger mathematischer Bewegungen. Daher gibt er der Erde insgesamt drei Drehbewegungen. Die Gründe für seine Beschreibung geben einen weiteren Hinweis, wie weit seine Gedanken dem traditionellen aristotelischen Denken verhaftet waren. Für ihn ist die Erde ein Planet, der von einer Kugel um die zentrale Sonne geführt wird, gerade so wie früher die Sonne um die Erde geführt wurde. Wenn die Erde an einer Kugel fest fixiert wäre, würde ihre Achse nicht immer parallel zur selben Linie durch die Sonne bleiben; sie würde mit der Rotation der Kugel mitgeführt und würde nacheinander die Stellungen wie in Bild 31a einnehmen. Wenn sich die Erde um 180 Grad um die Sonne bewegt hätte, wäre die Erdachse immer noch um  $23\frac{1}{2}^\circ$  zur Senkrechten geneigt, doch entgegengesetzt zu jener Richtung, in der sie begonnen hatte. Um diese Richtungsänderung der Achse, die durch die Rotation der Kugel verursacht wird, die die Erde trägt, auszugleichen, fordert Kopernikus eine dritte Drehbewegung, diesmal für die Erdachse allein (siehe Bild 31b). Es ist eine kegelförmige Bewegung, die das Nordende der Achse einmal im Jahr in westlicher Richtung durchführt und die auf diese Weise den Einfluß der Bahnbewegung auf die Erdachse kompensiert.



**Bild 31** Kopernikus' „zweite“ und „dritte“ Bewegungen.  
 (a) zeigt die zweite Bewegung, bei der ein Planet fest mit einer heliozentrischen Kugel verbunden rotiert. Diese Bewegung lässt die Erdachse nicht parallel zu sich, so daß eine konische Bewegung (b) zusätzlich gebraucht wird, damit die Erdachse unverändert bleibt.

### Kopernikanische Astronomie – die Planeten

Bisher ist das kopernikanische Lehrgebäude genauso wirkungsvoll wie das ptolemäische, sicher ist es nicht besser und es scheint beträchtlich schwieriger zu sein. Erst wenn man die Planeten dem kopernikanischen Universum hinzufügt, wird die wahre Bedeutung seiner Neuerung sichtbar. Betrachten wir zum Beispiel die Erklärung der rückläufigen Bewegung, auf die Kopernikus ohne Diskussion am Ende des 5. Kapitels in seinem einführenden Ersten Buch anspielte. Im ptolemäischen System wird diese Bewegung dadurch beschrieben, daß die Planeten auf einen Epizykel gesetzt werden, dessen Mittelpunkt wiederum vom Deferenten des Planeten um die Erde bewegt wird. Die kombinierte Bewegung dieser beiden Kreise führt auf das charakteristische Schleifenbild, das in Kapitel 3 diskutiert wurde. Im kopernikanischen System werden dafür keine Epizykeln gebraucht. Die rückwärts (westwärts) gerichtete Bewegung eines Planeten gegenüber den Sternen ist nur scheinbar, sie wird wie die scheinbare Bewegung der Sonne um die Ekliptik von der Bahnbewegung der Erde verursacht. Nach Kopernikus war die Bewegung, die Ptolemäus mit Epizykeln erklärt hatte, tatsächlich die Erdbewegung, die jedoch von einem irdischen Beobachter, der sich selbst für stationär hielt, den Planeten zugeschrieben wurde.

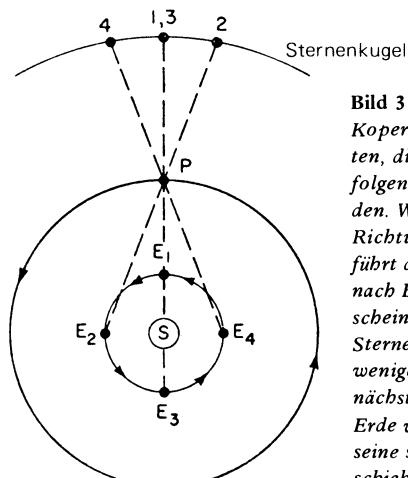


**Bild 32 Kopernikus' Erklärung für die rückläufige Bewegung (a) eines äußeren Planeten, (b) eines inneren Planeten. Die Erde bewegt sich jeweils gleichmäßig von  $E_1$  nach  $E_7$ , der Planet bewegt sich von  $P_1$  nach  $P_7$ . Gleichzeitig verschiebt sich die Position des Planeten gegenüber den Sternen von 1 nach 7, doch ergibt sich bei der Begegnung der beiden Planeten ein kurzer Rücklauf von 3 nach 5 in westlicher Richtung.**

Die Grundlage der kopernikanischen Behauptung ist in den Bildern 32a und 32b dargestellt. Aufeinanderfolgende scheinbare Örter eines bewegten äußeren Planeten, der von einer bewegten Erde aus gegen den festen Hintergrund der Sternenkugel beobachtet wird, sieht man im ersten Diagramm; das zweite zeigt aufeinanderfolgende scheinbare Örter eines inneren Planeten. Nur die Bahnbewegungen sind angedeutet, die tägliche Rotation der Erde ist weggelassen. In beiden Diagrammen sind aufeinanderfolgende Örter der Erde auf ihrer Kreisbahn um die Sonne durch die Punkte  $E_1$ ,  $E_2 \dots E_7$  dargestellt. Die entsprechenden aufeinanderfolgenden Örter des Planeten sind mit  $P_1 \dots P_7$  markiert. Die entsprechenden scheinbaren Positionen des Planeten, die man findet, indem man Linien von der Erde durch den Planeten zieht, bis sie die Sternenkugel schneiden, sind mit 1, 2, ..., 7

bezeichnet. Stets bewegt sich der jeweils innere Planet schneller auf seiner Bahn; eine genaue Betrachtung der Zeichnung zeigt uns, daß die scheinbare Bewegung des Planeten gegenüber den Sternen von 1 über 2 bis 3 normal (ostwärts gerichtet) erscheint. Dann scheint der Planet von 3 über 4 nach 5 rückwärts (nach Westen) zu laufen; schließlich kehrt er seine Bewegung wieder um und bewegt sich in normaler Weise von 5 über 6 nach 7. Während die Erde ihre Umlaufbahn vollendet, setzt der Planet seine normale Bewegung fort; er bewegt sich besonders schnell nach Osten, wenn er diametral zur Erde hinter der Sonne steht. Daher scheinen sich im kopernikanischen System die Planeten, von der Erde aus betrachtet, den Großteil der Zeit in östlicher Richtung zu bewegen. Sie sind nur dann rückläufig, wenn sie die Erde im Falle von äußeren Planeten überholt, oder im Falle von inneren Planeten von ihnen überholt wird. Rückwärtsbewegung kann nur eintreten, wenn die Erde dem betrachteten Planeten am nächsten ist, dies ist in Übereinstimmung mit den Beobachtungen. Zumindest äußere Planeten sind besonders strahlend, wenn sie sich westwärts bewegen. Die erste hauptsächliche Unregelmäßigkeit der Planetenbewegung wurde also qualitativ ohne Benützung von Epizykeln erklärt.

Bild 33 zeigt, wie die kopernikanische Idee einer zweiten wesentlichen Unregelmäßigkeit der Planetenbewegungen Rechnung trägt, der Diskrepanz zwischen den Umlaufzeiten eines Planeten um die Ekliptik, die für aufeinanderfolgende Umläufe gebraucht werden. In der Zeichnung wird ange-



**Bild 33**

*Kopernikus' Erklärung der verschiedenen Zeiten, die ein Planet braucht, um aufeinander folgende Umläufe um die Ekliptik zu vollenden. Während der Planet einmal in östlicher Richtung seine Bahn von P nach P durchläuft, führt die Erde 5/4 Umläufe von E<sub>1</sub> über E<sub>1</sub> nach E<sub>2</sub> durch. In dieser Zeit bewegt sich der scheinbare Ort des Planeten gegenüber den Sternen von 1 nach 2 nach Osten, um etwas weniger als einen vollen Umlauf. Während des nächsten Umlaufs des Planeten bewegt sich die Erde von E<sub>2</sub> über E<sub>2</sub> nach E<sub>3</sub>, so daß sich seine scheinbare Position von 2 nach 1 verschiebt, um etwas mehr als einen vollen Umlauf.*

nommen, daß die Erde  $5/4$  Umläufe vollendet, während der Planet, in diesem Fall ein äußerer, einmal seine Bahn durchläuft. Nehmen wir an, daß zu Beginn der Beobachtungen die Erde in  $E_1$  und der Planet in  $P$  ist. Der Planet befindet sich dann in der Mitte einer rückläufigen Bewegung und erscheint gegen den stationären Sternenhintergrund an der Stelle 1. Wenn der Planet einen Umlauf auf seiner Bahn vollendet hat und nach  $P$  zurückkehrt, hat die Erde  $5/4$  Umläufe hinter sich und  $E_2$  erreicht. Der Planet wird daher in 2 gesehen, westlich von der Stelle 1, an der er gestartet ist. Er hat noch keinen vollen Umlauf um die Ekliptik vollendet, sein erster vollständiger Umlauf wird daher mehr Zeit brauchen als ein Bahnumlauf.

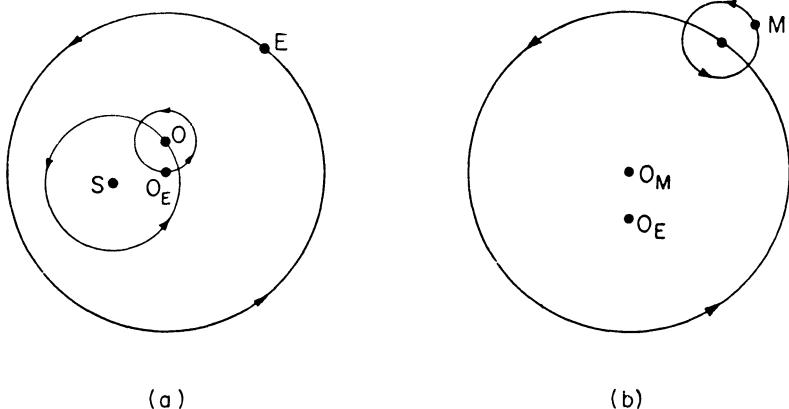
Während der Planet seinen zweiten Bahnumlauf macht, vollendet die Erde wieder mehr als einen Bahnumlauf und erreicht  $E_3$ , wenn der Planet wieder nach  $P$  zurückkehrt. Dieses Mal sieht man den Planeten in 3, östlich von 2. Er hat mehr als einen Umlauf um die Ekliptik vollendet, während er nur einmal seine Bahn durchlaufen hat. Seine zweite Reise um die Ekliptik war deshalb besonders schnell. Nach einem dritten Umlauf ist der Planet wiederum in  $P$ , doch er erscheint an der Stelle 4 (östlich von 3), seine Reise um die Ekliptik war wieder besonders schnell. Nach einem vierten Bahnumlauf erscheint der Planet wieder in 1, sein letzter Umlauf auf der Ekliptik war deshalb langsamer. Der Planet hat also gleichzeitig vier Bahnumläufe und vier Umläufe um die Ekliptik vollendet. Die mittlere Zeit für einen äußeren Planeten, um die Ekliptik zu durchlaufen, ist daher mit der planetaren Bahnperiode identisch, doch mag die Dauer eines einzelnen Umlaufs beträchtlich größer oder auch kleiner als der Durchschnitt sein. Ein ähnliches Argument gilt für die entsprechenden Unregelmäßigkeiten eines inneren Planeten.

Rückwärtsbewegung und die Schwankungen der Umlaufszeiten um die Ekliptik waren die beiden wesentlichen Unregelmäßigkeiten der Planeten, die in der Antike die Astronomen zur Verwendung von Epizykeln und Deferenten geführt hatten. Das kopernikanische System erklärt dieselben Unregelmäßigkeiten, ohne auf Epizykeln (zumindest auf Hauptepizykeln) zurückzugreifen. Um auch nur eine angenäherte Beschreibung der Planetenbewegungen zu geben, hatten Hipparch und Ptolemäus 12 Kreise gebraucht, je einen für die Sonne und den Mond und je zwei für die restlichen fünf Planeten. Kopernikus erreichte dieselbe qualitative Beschreibung der scheinbaren Planetenbewegungen mit nur 7 Kreisen. Er brauchte nur einen heliozentrischen Kreis für jeden der 6 bekannten Planeten – Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter und Saturn – und einen zusätzlichen Kreis mit der Erde im Mittelpunkt für den Mond. Einem Astronomen, der nur an einer qualitativen

Beschreibung der Planetenbewegung interessiert war, mußte das kopernikanische System als das ökonomischere erscheinen.

Doch diese scheinbare Ökonomie des kopernikanischen Systems ist zum Großteil eine Illusion, wenn auch die Vorkämpfer der neuen Astronomie diesen Propagandasieg unermüdlich unterstrichen. Wir haben noch nicht begonnen, uns mit der vollen Kompliziertheit der kopernikanischen Planeten-astronomie zu beschäftigen. Das 7-Kreise-System, das im Ersten Buch von *De Revolutionibus* und in zahlreichen modernen elementaren Beschreibungen des kopernikanischen Systems wiedergegeben wird, ist ein wunderbar ökonomisches System, doch es funktioniert nicht. Es wird die Position von Planeten mit einer geringeren Genauigkeit als das ptolemäische System vorhersagen, seine Genauigkeit ist der eines vereinfachten 12-Kreis-Systems des Ptolemäus vergleichbar: Kopernikus kann nur eine ökonomischere *qualitative* Beschreibung der Planetenbewegungen als Ptolemäus geben. Doch um eine gute *quantitative* Beschreibung der Schwankungen der Planetenbewegungen zu geben, war Ptolemäus gezwungen gewesen, das fundamentale 12-Kreise-System mit kleineren Epizykeln, Exzentern und Äquanten zu komplizieren, und auch Kopernikus mußte, um ähnliche Resultate zu bekommen, zusätzlich kleinere Epizykeln und Exzenter einführen. Sein vollständiges System war kaum weniger umständlich, als das des Ptolemäus. Beide verwendeten über 30 Kreise; vom Standpunkt der Ökonomie war kaum ein Unterschied zwischen den Systemen. Auch konnten die zwei Systeme an Hand ihrer Genauigkeit nicht unterschieden werden: als Kopernikus aufgehört hatte, Kreise hinzuzufügen, gab sein umständliches sonnenzentriertes System Resultate, die genauso gut waren, wie die des Ptolemäus, jedoch nicht besser. Kopernikus löste also das Problem der Planeten nicht.

Das vollständige kopernikanische System wird in den späteren Büchern von *De Revolutionibus* beschrieben. Glücklicherweise brauchen wir die Komplikationen nur beschreiben, die dort entwickelt werden. Das kopernikanische System war zum Beispiel in Wirklichkeit kein sonnenzentriertes System. Um der höheren Geschwindigkeit Rechnung zu tragen, mit der die Sonne im Winter durch die Tierkreiszeichen wandert, machte Kopernikus die Kreisbahn der Erde exzentrisch, er verschob ihren Mittelpunkt von der Sonne. Um andere Unregelmäßigkeiten zu beschreiben, die durch antike und zeitgenössische Beobachtungen der Sonnenbewegung angedeutet wurden, versetzte er dieses verschobene Zentrum in Bewegung. Der Mittelpunkt des Exzentrers der Erde wurde auf einen zweiten Kreis gesetzt, dessen Bewegung das Ausmaß und die Richtung der Exzentrizität der Erde kontinuierlich veränderte. Das



**Bild 34** Kopernikus' Beschreibung der Bewegung (a) der Erde, (b) des Mars. In (a) steht die Sonne in  $S$ , die Erde  $E$  befindet sich auf einem Kreis, dessen Mittelpunkt  $O_E$  sich langsam um einen Punkt  $O$  dreht, der wiederum auf einem um die Sonne rotierenden Kreis befestigt ist. In (b) befindet sich Mars auf einem Epizykel, der sich auf einem Deferenten mit dem Mittelpunkt  $O_M$  dreht.  $O_M$  steht in einer festen geometrischen Beziehung zum bewegten Mittelpunkt  $O_E$  der Erdbahn.

endgültige System zur Berechnung der Erdbewegung ist schematisch in Bild 34a dargestellt. In der Zeichnung ist  $S$  die Sonne, die im Raum fest ist; der Punkt  $O$ , der sich selbst langsam um die Sonne bewegt, ist der Mittelpunkt eines langsam rotierenden Kreises, der das bewegte Zentrum  $O_E$  des Exzentrers der Erde mit sich führt.  $E$  ist die Erde selbst.

Ähnliche Komplikationen wurden durch die beobachteten Bewegungen der anderen Planeten notwendig. Für den Mond benützte Kopernikus insgesamt drei Kreise, einen ersten mit dem Mittelpunkt in der bewegten Erde, den zweiten mit dem Mittelpunkt auf dem bewegten Umfang des ersten und den dritten auf dem Umfang des zweiten. Für Mars und die meisten anderen Planeten verwendete er ein System, das dem in Bild 34b dargestellten entspricht. Der Mittelpunkt der Marsbahn  $O_M$  ist vom Mittelpunkt der Erdbahn  $O_E$  verschoben und wird mit ihr mitbewegt. Der Planet selbst sitzt in  $M$  nicht auf einem Exzenter, sondern auf einem Epizykel, der in derselben Richtung und mit derselben Periode wie der Exzenter in östlicher Richtung rotiert. Doch sind dies noch nicht alle Komplikationen. Weitere Hilfsmittel, die denen des Ptolemäus vollständig entsprechen, werden gebraucht, um die Nord- und Südabweichungen von der Ekliptik zu beschreiben.

Selbst diese kurze Beschreibung des komplexen Systems verschachtelter Kreise, das Kopernikus zur Berechnung der Planetenörter verwendete, zeigt die dritte große Überraschung von *De Revolutionibus* und die ungeheure Ironie, die in Kopernikus' Lebenswerk enthalten ist. Das Vorwort zu *De Revolutionibus* beginnt mit einer kraftvollen Verurteilung der ptolemäischen Astronomie wegen ihrer Ungenauigkeit, Kompliziertheit und Inkonsistenz, doch noch bevor die Schrift des Kopernikus endet, hat sie sich selbst denselben Mängeln schuldig gemacht. Das kopernikanische System ist weder einfacher noch genauer als das ptolemäische. Die Methoden, die Kopernikus dabei verwendete, scheinen genauso wenig eine einzige konsistente Lösung des Planetenproblems liefern zu können wie die ptolemäischen Methoden. *De Revolutionibus* selbst stimmt nicht mit der einzigen überlieferten frühen Version des Systems überein, die Kopernikus in dem früheren Manuscript *Commentariolus* beschrieben hat. Selbst Kopernikus konnte nicht aus seiner Hypothese ein eindeutiges System von Kreisbahnen ableiten, auch seinen Nachfolgern gelang dies nicht. Jene Züge der antiken Tradition, die Kopernikus zu einer radikalen Neuerung geführt hatten, waren dadurch nicht eliminiert worden. Kopernikus hatte die ptolemäische Tradition wegen seiner Entdeckung verworfen, daß die „Mathematiker bei diesen astronomischen Untersuchungen nicht einig sind“ und „wären ihre Hypothesen nicht irreführend, so hätten sich alle darauf basierenden Schlüsse sicherlich bewährt.“ Ein neuer Kopernikus hätte gegen ihn die identischen Argumente vorbringen können.

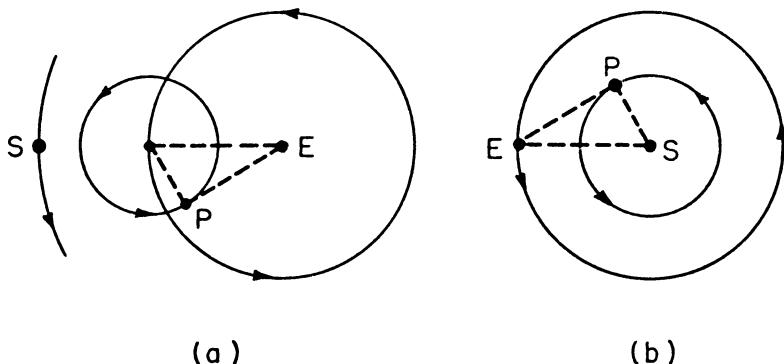
### *Die Harmonie des kopernikanischen Systems*

In praktischer Hinsicht war Kopernikus' neues Planetensystem ein Fehlschlag. Es war weder genauer noch einfacher als seine ptolemäischen Vorgänger. Doch historisch war es ein großer Erfolg: *De Revolutionibus* überzeugte einige von Kopernikus' Nachfolgern, daß die heliozentrische Astronomie den Schlüssel zum Planetenproblem enthielt; diese Männer fanden schließlich die einfache und genaue Lösung, die Kopernikus gesucht hatte. Wir werden ihr Werk im nächsten Kapitel studieren, doch zunächst wollen wir herausfinden, warum sie Kopernikaner wurden, wo doch weder die Genauigkeit, noch die Ökonomie dafür sprachen – welche Gründe gab es also, Erde und Sonne zu vertauschen? Die Antwort auf diese Frage läßt sich nicht leicht aus den technischen Einzelheiten herausschälen, die das Werk füllen, weil, wie Kopernikus selbst erkannte, für eine heliozentrische

Astronomie nur ästhetische und nicht pragmatische Gründe vorlagen. Für die Astronomen konnte die ursprüngliche Entscheidung zwischen den beiden Systemen nur eine Geschmacksfrage sein, und über Geschmack lässt sich schwer diskutieren. Doch wie die kopernikanische Revolution selbst andeutet, sind Geschmacksfragen nicht zu vernachlässigen. Das Auge, das geometrische Schönheit erkennen konnte, konnte in Kopernikus' heliozentrischem System eine neue Schönheit und Geschlossenheit entdecken; wären diese nicht erkannt worden, hätte es wohl keine kopernikanische Wende gegeben.

Wir haben bereits einen ästhetischen Vorteil des kopernikanischen Systems kennengelernt. Es erklärt die hauptsächlichen *qualitativen* Züge der Planetenbewegung ohne Verwendung von Epizykeln. Rückläufige Bewegung wird zu einer natürlichen und unmittelbaren Folge der Geometrie sonnenzentrierter Bahnen, doch nur Astronomen, die qualitative Einfachheit höher als quantitative Genauigkeit schätzten (und es gab nur wenige, Galilei gehörte zu ihnen), konnten dies angesichts des komplizierten Systems von Epizykeln und Exzentern, das in *De Revolutionibus* ausgearbeitet wurde, für ein überzeugendes Argument halten. Glücklicherweise gab es andere, überzeugendere Argumente für das neue System. Zum Beispiel gibt es eine einfachere und natürlichere Beschreibung der Bewegung der inneren Planeten. Merkur und Venus entfernen sich niemals weit von der Sonne, die ptolemäische Astronomie trägt dem Rechnung, indem sie die Diferenten von Merkur, Venus und Sonne koppelt, so daß der Mittelpunkt des Epizyklus jedes inneren Planeten stets auf einer geraden Linie zwischen der Erde und der Sonne liegt. (Bild 35a). Diese Ausrichtung der Mittelpunkte der Epizykeln ist ein zusätzliches Hilfsmittel, eine *ad hoc* Hinzufügung zur Geometrie der erdzentrierten Astronomie; man braucht diese Annahme im kopernikanischen System nicht. Wenn die Bahn eines Planeten wie in Bild 35b vollständig innerhalb der Erdbahn liegt, kann sich der Planet nicht weit von der Sonne entfernen. Die maximale Elongation wird eintreten, wenn die Linie von der Erde zum Planeten eine Tangente an die Planetenbahn ist und der Winkel *SPE* ein rechter ist. Daher ist der Elongationswinkel *SEP* der größte Winkel, um den sich der innere Planet von der Sonne entfernen kann. Die Geometrie des Systems erklärt also vollständig, wie Merkur und Venus an die Sonne gebunden sind.

Die kopernikanische Geometrie verdeutlicht einen weiteren, noch wichtigeren Aspekt im Verhalten der inneren Planeten, nämlich die Ordnung ihrer Bahnen. Im Ptolemäischen System waren die Planeten auf erdzentrierten Umlaufbahnen so angeordnet, daß die mittlere Distanz eines Planeten von der Erde mit der Zeit anwuchs, die der Planet zum Umlauf durch die Ekliptik



**Bild 35** Erklärung der beschränkten Elongation innerer Planeten im (a) ptolemäischen, (b) kopernikanischen System. Im ptolemäischen System muß der Winkel zwischen der Sonne S und dem Planeten P dadurch beschränkt bleiben, daß der Mittelpunkt des Epizykels auf der Verbindungslinie Erde – Sonne befestigt wird. Im kopernikanischen System ist keine Beschränkung dieser Art notwendig, da die Planetenbahn vollständig innerhalb der Erdbahn liegt.

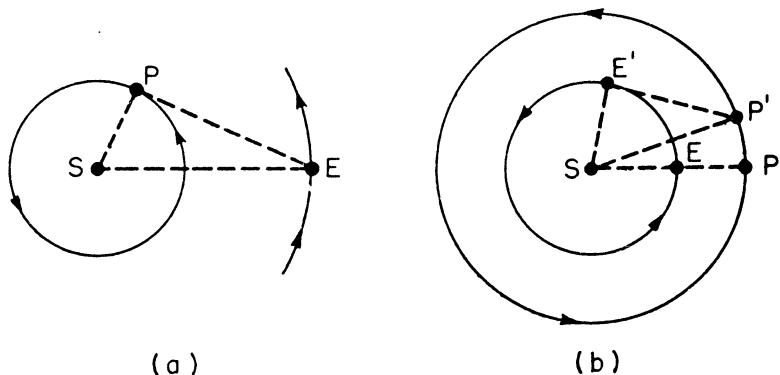
benötigte. Diese Vorschrift funktionierte gut für die äußeren Planeten und den Mond, doch Merkur, Venus und die Sonne brauchen je ein Jahr für eine mittlere Reise um die Ekliptik, die Anordnung ihrer Bahnen war daher stets ein Streitpunkt gewesen. Im kopernikanischen System ist kein Platz für einen ähnlichen Streit: Keine zwei Planeten haben dieselbe Bahnperiode. Der Mond spielt dabei keine Rolle mehr, denn er bewegt sich um die Erde, nicht um die Sonne. Die äußeren Planeten, Mars, Jupiter und Saturn, behalten auch bei dem neuen Zentrum ihre alte Reihenfolge, weil ihre Bahnperioden mit der mittleren Umlaufsdauer auf der Ekliptik übereinstimmen. Die Erdbahn liegt innerhalb der Marsbahn, da die Erdumlaufperiode, ein Jahr, kürzer ist als die des Mars (687 Tage). Man muß also nur noch Merkur und Venus in das System einordnen, erstmals ist dann ihre Reihenfolge eindeutig bestimmt.

Dies kann man in folgender Weise sehen: Die Venus schreitet alle 584 Tage zurück und da Rückwärtsbewegung nur beobachtet werden kann, wenn die Venus die Erde überholt, sind also 584 Tage genau die Zeit, die die Venus braucht, um die Erde einmal auf ihrem Umlauf um die Sonne zu überrunden. Nun hat die Erde in 584 Tagen ihre Bahn  $\frac{584}{365}$  ( $= 1 \frac{219}{365}$ ) mal durchlaufen. Da Venus die Erde in dieser Zeit einmal überholt hat, muß sie

ihre Bahn  $2 \frac{219}{365}$  mal in genau 584 Tagen durchlaufen haben. Aber ein Planet, der dies tut, braucht für einen Umlauf auf seiner Bahn  $584 \times \frac{365}{949} = 225$  Tage. Da also die Periode der Venus mit 225 Tagen kürzer als die der Erde ist, muß die Venusbahn innerhalb der Erdbahn sein und es gibt kein Problem. Eine ähnliche Rechnung setzt die Merkurbahn innerhalb der Venusbahn und der Sonne am nächsten. Da der Merkur die Erde alle 116 Tage überholt, muß er seine Bahn gerade  $1 \frac{116}{365}$  mal in 116 Tagen durchlaufen. Daher wird er einen Umlauf gerade in  $116 \times \frac{365}{481} = 88$  Tagen vollenden. Seine Bahnperiode von 88 Tagen ist die kürzeste und daher ist dieser Planet der Sonne am nächsten.

Soweit haben wir die heliozentrischen Planetenbahnen mit derselben Vorschrift geordnet, die von ptolemäischen Astronomen zur Ordnung der geozentrischen Bahnen verwendet wurden: Planeten, die vom Zentrum des Universums weiter entfernt sind, brauchen länger, um den Mittelpunkt zu umkreisen. Die Annahme, daß die Größe der Bahn mit der Bahnperiode zunimmt, kann im kopernikanischen System vollständiger angewendet werden als im ptolemäischen, doch ist sie in beiden Systemen eigentlich willkürlich. Es scheint natürlich, daß Planeten sich so verhalten – wie Vitruv's Ameisen auf der Töpferscheibe –, doch besteht keine Notwendigkeit dazu. Vielleicht ist die Annahme völlig unberechtigt, und die Planeten – außer Sonne und Mond, deren Entfernung direkt bestimmt werden können – haben eine andere Anordnung.

Die soeben beschriebene Antwort auf das Ordnungsproblem der Planeten zeigt einen sehr wichtigen Unterschied zwischen dem kopernikanischen und dem ptolemäischen System, den Kopernikus selbst besonders betont. Im ptolemäischen System können Deferent und Epizykel eines jeden Planeten beliebig vergrößert oder verkleinert werden, ohne die Größe der Bahnen der anderen Planeten oder den Ort, an dem der Planet von der Erde gegen die Sterne gesehen erscheint, zu verändern. Die Reihenfolge der Bahnen kann durch die Annahme einer Beziehung zwischen dem Bahndurchmesser und der Umlaufperiode bestimmt werden. Zusätzlich können die relativen Größen der Bahnen mit Hilfe der weiteren Annahme (s. Kapitel 3) berechnet werden, daß sich die Kugelschalen, in denen sich die Planeten bewegen, nicht durchdringen dürfen. Obwohl diese beiden Annahmen natürlich zu sein scheinen, sind sie nicht notwendig. Das ptolemäische System konnte die gleichen scheinbaren Positionen der Planeten ohne die Verwendung dieser Annahmen vorhersagen. Im ptolemäischen System sind die Himmelserscheinungen nicht von der Größe oder der Ordnung der Planetenbahnen abhängig.



**Bild 36 Bestimmung der relativen Bahndurchmesser im kopernikanischen System:**  
**(a) für einen inneren, (b) für einen äußeren Planeten**

Im kopernikanischen System gibt es keine ähnliche Freiheit. Wenn sich alle Planeten in ungefähr kreisförmigen Bahnen um die Sonne bewegen, dann können Ordnung und relative Größe der Planetenbahnen direkt aus der Beobachtung ohne weitere Annahmen abgeleitet werden. Jede Änderung in der Ordnung oder in der relativen Größe der Bahnen wird das ganze System in Unordnung bringen. Zum Beispiel zeigt Bild 36a einen inneren Planeten  $P$ , der von der Erde aus beobachtet wird, wenn er seine maximale Elongation von der Sonne erreicht. Die Bahn wird als kreisförmig angenommen, der Winkel  $SPE$  muß daher ein rechter sein, wenn der Winkelabstand  $SEP$  sein Maximum annimmt. Der Planet, die Sonne und die Erde bilden ein rechtwinkliges Dreieck, dessen spitzer Winkel  $SEP$  direkt gemessen werden kann. Doch die Kenntnis eines spitzen Winkels eines rechtwinkeligen Dreiecks erlaubt die Bestimmung des Längenverhältnisses der Seiten jenes Dreiecks. Daher kann das Verhältnis des Radius der Bahn des inneren Planeten  $SP$  zum Radius der Erdbahn  $SE$  aus dem gemessenen Wert des Winkels  $SEP$  berechnet werden. Die relativen Größen der Erdbahn und der Bahnen beider innerer Planeten können also aus der Beobachtung bestimmt werden.

Eine entsprechende Bestimmung kann auch für einen äußeren Planeten gemacht werden, obwohl die Techniken komplizierter sind. Eine Möglichkeit ist in Bild 36b gezeigt. Man nehme an, daß zu einem bestimmten Zeitpunkt Sonne, Erde und der Planet auf der geraden Linie  $SEP'$  liegen; dann steht der Planet auf der Ekliptik der Sonne diametral gegenüber und befindet sich in

der Mitte einer rückläufigen Bewegung. Da die Erde ihre Bahn schneller als jeder äußere Planet durchläuft, muß es einen späteren Zeitpunkt geben, an dem die Erde in  $E'$  und der Planet in  $P'$  ein rechtwinkeliges Dreieck  $SE'P'$  mit der Sonne bilden werden, und da  $SE'P'$  der Winkel zwischen der Sonne und dem äußeren Planeten ist, von der Erde aus gemessen, so kann er direkt bestimmt werden, ebenso die Zeit, die gebraucht wird, um ihn zu erreichen. Der Winkel  $ESE'$  kann nun bestimmt werden, denn er steht im selben Verhältnis zu  $360^\circ$  wie die Zeit, die die Erde braucht, um sich von  $E$  nach  $E'$  zu bewegen, sich zu 365 Tagen, also einem vollen Umlauf verhält. Der Winkel  $PSP'$  kann in der gleichen Weise bestimmt werden, da die Umlaufsdauer des Planeten bereits bekannt ist und die Zeit, die der Planet von  $P$  nach  $P'$  braucht, dieselbe ist, die die Erde von  $E$  nach  $E'$  braucht. Der Winkel  $P'SE'$  ergibt sich dann durch Subtraktion aus den Winkeln  $ESE'$  und  $PSP'$ . Wir haben dann wieder ein rechtwinkeliges Dreieck  $SE'P'$ , von dem der spitze Winkel  $P'SE'$  bekannt ist, und das Verhältnis der Radien der Planetenbahn zur Erdbahn kann daher wie bei einem inneren Planeten bestimmt werden.

Durch solche Methoden können die Abstände zu allen Planeten mit Hilfe des Abstandes Erde – Sonne bestimmt werden. Zum ersten Mal, wie Kopernikus in seinem Vorwort sagt, wurden die Ordnungen und Größen aller Sterne und ihrer Kugeln so miteinander verknüpft, daß kein Teil davon von seinem Platz verschoben werden kann, ohne daß unter den anderen Teilen und dem gesamten Universum Verwirrung entstünde. Weil die relativen Abmessungen der Planetenbahnen eine direkte Folge der geometrischen Voraussetzungen der heliozentrischen Astronomie sind, zeigt die neue Astronomie für Kopernikus eine Natürlichkeit und Geschlossenheit, die in der älteren geozentrischen Version fehlte. Der Aufbau der Himmel kann aus dem kopernikanischen System mit weniger Zusatzannahmen abgeleitet werden. Dies ist die neue und ästhetische Harmonie, die Kopernikus im zehnten Kapitel seines Ersten Buches so sehr betont. Diesem wenden wir uns nun zu, nachdem wir nun – im Gegensatz zu den Laien unter Kopernikus' Leserschaft – genug über das neue System gelernt haben, um zu verstehen, worüber er spricht.

## Kapitel X

### Über die Reihenfolge der Himmelskreise

Daß die Fixsternsphäre das Oberste von allem Sichtbaren ist, sehe ich niemanden bezweifeln. Die Reihenfolge der Planeten wollten die alten Philosophen nach der Dauer ihrer Umlaufszeit bestimmen, indem sie als Grund dafür anführten, daß von den Körpern, die gleiche Geschwindigkeit haben, sich diejenigen langsamer zu bewegen scheinen, die weiter entfernt sind, wie bei Euklid in der „Optik“ bewiesen wird. Deshalb glauben sie, daß der Mond seinen Umlauf in der kürzesten Zeit vollendet, weil er sich, da er der Erde am nächsten steht, im kleinsten Kreis bewegt. Der oberste aber sei der Saturn, da er die größte Bahn in der längsten Zeit durchläuft. Unter diesem steht der Jupiter, danach folge der Mars. Über Venus und Merkur aber finden sich verschiedene Meinungen, weil ihre Elongationen von der Sonne nicht alle möglichen Werte annehmen, wie dies bei den übrigen der Fall ist. Deshalb stellen sie sie teils über die Sonne, wie im Timaios bei Plato, teils unter sie, wie Ptolemäus und ein großer Teil der neueren Autoren. Alpetragius [moslemischer Astronom, 12. Jhd.] setzt die Venus über die Sonne und den Merkur unter sie.

Da nun diejenigen, die Plato folgen, meinen, daß alle Planeten, sonst dunkle Körper, nur durch das von der Sonne empfangene Licht leuchten, so müßten sie, wenn sie sich unter der Sonne befänden, wegen ihres geringen Abstandes von ihr nur halb oder wenigstens nicht völlig rund gesehen werden. Denn sie würden das empfangene Licht ungefähr nach oben, d.h. der Sonne zugewendet, zurückstrahlen, wie wir das bei Neumond oder bei abnehmendem Mond sehen. [Siehe die Diskussion der Venusphasen im nächsten Kapitel. Weder dieser Effekt, noch der folgende sind ohne Teleskop erkennbar.] Auch sagen sie, die Sonne müßte durch deren Dazwischentreten bisweilen verfinstert werden, oder ihre Leuchtkraft müßte im Verhältnis zu deren Größe abnehmen. Da das aber niemals in Erscheinung tritt, so sind sie der Meinung, daß diese keineswegs unter der Sonne zu stehen kommen. ... [Kopernikus beschreibt zahlreiche weitere Schwierigkeiten, die bei der herkömmlichen Bestimmung der Reihenfolge der Sonne und der inneren Planeten auftreten. Er setzt dann fort:]

Wie wenig überzeugend die Begründung des Ptolemäus ist, nach der die Sonne die Mitte zwischen den überallhin von ihr abschweifenden

und den nicht abschweifenden Planeten einnehmen soll, geht daraus hervor, daß der Mond, indem er selbst überallhin abschweift, sie widerlegt.

Welchen Grund aber wollen diejenigen, die unter die Sonne die Venus und dann den Merkur setzen oder sie in einer anderen Reihenfolge anordnen, dafür anführen, daß diese nicht ebenso selbständige und von der Sonne unabhängige Bahnen durchlaufen wie die übrigen Planeten [deren Deferenten nicht mit dem der Sonne gekoppelt sind], wenn das Verhältnis ihrer Umlaufgeschwindigkeiten ihre Reihenfolge nicht falsch darstellt?

Es wird also daraus notwendig zu schließen sein, daß entweder die Erde nicht der Mittelpunkt ist, auf den die Reihenfolge der Gestirne und Bahnen bezogen werden kann, oder daß es keinen sicheren Anhaltpunkt für ihre Reihenfolge gibt und daß es nicht ersichtlich ist, warum dem Saturn eher als dem Jupiter oder einem beliebigen anderen Planeten die höhere Stelle gebührt. Deshalb halte ich für durchaus beachtenswert, was Martianus Capella [5. Jhd., er berichtet eine Theorie der inneren Planeten, die Heraklid zugeschrieben wurde], der eine Enzyklopädie verfaßt hat, und einige andere lateinische Autoren sehr klug bemerkt haben. Sie glauben nämlich, daß Venus und Merkur die Sonne, die in der Mitte ihrer Bahnen steht, umkreisen und meinen, daß sie sich deswegen von ihr nicht weiter entfernen können, als es die Krümmung ihrer Kreisbahnen zuläßt. ... Was wollen sie anderes damit verdeutlichen, als daß der Mittelpunkt ihrer Kreisbahnen in der Nähe der Sonne liegt? So wird dann in der Tat die Bahn des Merkur innerhalb der Venusbahn liegen, die mehr als doppelt so groß ist und die der Merkurbahn infolge ihrer Größe genügend Raum gewährt.

Wenn nun jemand das zum Anlaß nimmt, auch Saturn, Jupiter und Mars auf denselben Mittelpunkt zu beziehen, so wird er keinem Irrtum verfallen, sofern er nur eine so große Ausdehnung ihrer Bahnen berücksichtigt, daß sie mit jenen auch die darin befindliche Erdbahn enthält und umschließt. ... Denn es steht fest, daß die anderen Planeten der Erde immer dann am nächsten stehen, wenn sie abends aufgehen, d.h. wenn sie in Opposition zur Sonne treten, wobei die Erde zwischen ihnen und der Sonne steht, daß sie aber von der Erde am weitesten entfernt sind, wenn sie abends untergehen, d.h. wenn sie von der Sonne verdeckt werden, indem wir nämlich dann zwischen ihnen und der Erde die Sonne haben. Dies beweist hinreichend, daß ihr Mittelpunkt vielmehr der Sonne zugehört und daß es derselbe ist, auf den sich auch die Bahnen von Venus und Merkur beziehen.

[Kopernikus' Bemerkungen „beweisen“ tatsächlich nichts. Das ptolemäische System erklärt diese Phänomene so gut wie das kopernikanische, aber die kopernikanische Erklärung ist natürlicher, denn sie hängt wie die beschränkte Elongation der inneren Planeten nur von der Geometrie eines heliozentrischen astronomischen Systems, aber nicht von den speziellen Umlaufszeiten der Planeten ab. Ein Blick auf Bild 32a wird dies verdeutlichen. Ein äußerer Planet läuft nur dann rückwärts, wenn ihn die Erde überholt, dabei muß er sowohl am erdnächsten sein, als auch der Sonne auf der Ekliptik diametral gegenüberstehen. Auch im ptolemäischen System müssen diese beiden Bedingungen erfüllt sein. Doch sie treten nur deshalb ein, weil die Umdrehungsgeschwindigkeiten des Deferenten und des Epizykels besondere Werte haben, die den Planeten gerade richtig in Opposition zur Sonne bringen, wenn der Epizykel den Planeten in größte Erdnähe bringt. Wenn im ptolemäischen System die Perioden von Epizykeln oder Deferenten geringfügig geändert würden, dann würde diese Regelmäßigkeit, die einen rückläufigen äußeren Planeten der Sonne am Himmel gegenüberstellt, nicht eintreffen. Im kopernikanischen System muß sie eintreten, unabhängig von den speziellen Umlaufgeschwindigkeiten der Planeten.] Da sich aber alle diese auf einen Mittelpunkt beziehen, so muß der kreis- oder kugelförmige Raum, der zwischen der konvexen Bahn der Venus und der konkaven des Mars übrigbleibt und mit jenen an beiden Oberflächen konzentrisch ist, abgesondert werden und die Erde mit dem sie begleitenden Mond und allem, was sich unter dem Mond befindet, aufnehmen. Denn wir können den Mond, der unstreitig der Erde am nächsten steht, in keiner Weise von ihr trennen, zumal wir in jenem Raum einen für ihn völlig ausreichenden Platz finden. Daher scheuen wir uns nicht zu behaupten, daß der ganze Raum, den die Mondbahn umgibt, mit dem Mittelpunkt der Erde auf jener großen Kreisbahn zwischen den anderen Planeten in einem Jahr um die Sonne läuft, und daß sich gerade bei der Sonne der Mittelpunkt der Welt befindet; daß ferner, da in ihm auch die Sonne unbeweglich bleibt, jede Bewegung, die als eine Bewegung der Sonne erscheint, in Wahrheit auf einer Bewegung der Erde beruht; weiterhin aber behaupten wir, daß der Umfang der Welt so groß ist, daß die Entfernung der Erde von der Sonne, während sie im Verhältnis zu der Bahngroße beliebig anderer Planeten eine merkliche Ausdehnung hat, im Vergleich mit der Fixsternsphäre verschwindend klein ist. Ich halte das für leichter begreiflich, als wenn der Geist durch eine fast unendliche Menge von Kreisen

zersplittet wird, was die zu tun gezwungen waren, die die Erde in der Mitte der Welt festgehalten haben. Man muß vielmehr dem Scharfsinn der Natur folgen, die vielmehr oft einen Gegenstand mit vielen Wirkungen ausgestattet hat, wobei sie sich sehr in acht nahm, etwas Überflüssiges oder Unnützes hervorzubringen.

Wenn das alles auch schwierig und fast unbegreiflich ist, ja auch gegen die Meinung vieler verstößt, so werden wir es dennoch, wenn Gott uns gnädig ist, im weiteren Verlauf mehr als sonnenklar machen, wenigstens denen, die in der Mathematik nicht unwissend sind. Wenn also das Kriterium Gültigkeit behält, das zu Beginn des Kapitels angeführt wurde — niemand wird nämlich ein zutreffenderes beibringen als das, daß die Größe der Bahnen an der Dauer der Umlaufzeit gemessen wird —, ordnet sich die Aufeinanderfolge der Sphären, angefangen mit der obersten, in folgender Weise:

Die erste und oberste von allen Sphären ist die der Fixsterne, die sich selbst und alles andere enthält und daher unbeweglich ist, denn sie ist gewiß der Ort des Universums, auf den die Bewegung und Stellung aller übrigen Gestirne zu beziehen ist. ... Es folgt als erster Planet der Saturn, der in dreißig Jahren seinen Umlauf vollendet. Hierauf Jupiter mit seinem zwöljfährigen Umlauf. Dann Mars, der in zwei Jahren seine Bahn durchläuft. Den vierten Platz in der Reihe nimmt der jährliche Kreislauf ein, in dem, wie wir gesagt haben, die Erde mit der Mondbahn als Epizykel enthalten ist. An fünfter Stelle kreist Venus in neun Monaten. Die sechste Stelle schließlich nimmt Merkur ein, der in einem Zeitraum von achtzig Tagen seinen Umlauf vollendet.

In der Mitte aber von allen steht die Sonne. Denn wer wollte diese Leuchte in diesem wunderschönen Tempel an einen anderen oder besseren Ort setzen als dorthin, von wo aus sie das Ganze zugleich beleuchten kann? Zumal einige sie nicht unpassend das Licht, andere die Seele, noch andere den Lenker der Welt nennen. Trismegistos bezeichnet sie als den sichtbaren Gott, die Elektra des Sophokles als den Allessehenden. So lenkt in der Tat die Sonne, auf dem königlichen Thron sitzend, die sie umkreisende Familie der Gestirne. Auch wird die Erde in keiner Weise um den Dienst des Mondes gebracht, sondern der Mond steht, wie Aristoteles in seinem Werk „De animalibus“ sagt, mit der Erde im engsten Verwandtschaftsverhältnis. Indessen empfängt die Erde von der Sonne und wird schwanger mit jährlicher Geburt.

Wir finden also in dieser Anordnung eine bewunderungswürdige Symmetrie der Welt und einen festen, harmonischen Zusammenhang zwischen der Bewegung und der Größe der Bahnen, wie man ihn auf andere Weise nicht finden kann. Denn hier kann der aufmerksame Beobachter feststellen, warum Recht- und Rückläufigkeit beim Jupiter größer erscheinen als beim Saturn und kleiner als beim Mars, bei der Venus wiederum größer als beim Merkur, und er kann feststellen, warum eine solche Recht- und Rückläufigkeit beim Saturn häufiger eintritt als beim Jupiter, seltener noch beim Mars und bei der Venus als bei Merkur; außerdem, warum Saturn, Jupiter und Mars, wenn sie am Abend aufgehen, der Erde näher sind als bei ihrem Verschwinden und Auftauchen in den Sonnenstrahlen. Vor allem aber scheint Mars, wenn er die ganze Nacht am Himmel steht, an Größe dem Jupiter gleich zu sein, wobei er sich nur durch die rötliche Farbe unterscheidet; ist er aber nahe bei der Sonne, so wird er kaum unter den Sternen zweiter Größe gefunden, nur denen erkennbar, die in sorgfältiger Beobachtung nach ihm forschen. Und das alles ergibt sich aus derselben Ursache, die in der Bewegung der Erde liegt.

Daß aber an den Fixsternen keine Bewegung wahrzunehmen ist, beweist ihre unermeßliche Höhe, die bewirkt, daß selbst die Bahn der jährlichen Bewegung oder deren [parallaktisches] Abbild für unsere Augen verschwindet; denn alles Sichtbare hat eine bestimmte, begrenzte Größe der Entfernung, und es wird nicht mehr wahrgenommen, wenn diese erreicht ist, wie das in der „Optik“ bei Euklid dargelegt wird. Daß nämlich zwischen dem obersten Planeten, dem Saturn, und der Fixsternsphäre noch sehr viel Raum liegt, beweist deren funkelndes Licht. Durch diese Eigenschaft unterscheiden sie sich besonders von den Planeten, denn zwischen Bewegtem und Unbewegtem muß ein sehr großer Unterschied bestehen. So groß ist in der Tat die göttliche Werkstatt des Optimus Maximus.

In diesem besonders wichtigen 10. Kapitel legt Kopernikus Wert auf die „bewundernswerte Symmetrie“ und „das deutliche Band der Harmonie der Bewegung und Größe der Sphären“, die ein heliozentrisches System den Himmelserscheinungen verleiht. Wenn die Sonne im Mittelpunkt steht, dann kann sich ein innerer Planet nicht in großer Entfernung von der Sonne zeigen; und so weiter und so fort. Mit Argumenten wie diesen versucht Kopernikus, seine Zeitgenossen von der Gültigkeit seines neuen Ansatzes zu überzeugen. Jedes Argument zitiert einen Teil der Himmelserscheinungen, der sowohl

vom ptolemäischen *als auch* vom kopernikanischen System erklärt werden kann und jedesmal zeigt er auf, um wieviel harmonischer, natürlicher und einheitlicher seine eigene Erklärung ist. Es gibt zahllose solcher Argumente. Zusammengekommen sind sie äußerst eindrucksvoll.

Doch bedeuten sie wirklich etwas? „Harmonie“ scheint ein sonderbarer Grund für die Erdbewegung, besonders da sie durch die komplexe Vielfalt von Kreisen des vollständigen kopernikanischen Systems verschleiert wird. Seine Argumente sind nicht pragmatisch. Sie appellieren ja nicht an den praktischen Sinn des Astronomen, sondern ausschließlich an den ästhetischen. Sie sprechen den Laien nicht an, der, selbst wenn er die Argumente verstand, nicht willens war, geringfügige Himmelsharmonien für größereirdische Probleme einzuhandeln. Sie fanden auch bei Astronomen nicht unbedingt Anklang, denn die Harmonien, auf die Kopernikus hinwies, halfen den Astronomen nicht, ihren Beruf besser auszuüben. Neue Harmonien verbesserten weder Genauigkeit noch Einfachheit. Daher sprachen sie hauptsächlich jene kleine und vielleicht irrationale Untergruppe mathematischer Astronomen an, deren neuplatonischer Sinn für mathematische Harmonien nicht durch seitenlange, komplexe Mathematik abgeschreckt wurde, die schließlich auf numerische Vorhersagen, nicht besser als die bisher bekannten führte. Wie wir im nächsten Kapitel sehen werden, gab es glücklicherweise einige solcher Astronomen. Ihr Werk ist ein wesentlicher Bestandteil der kopernikanischen Revolution.

### *Schrittweise Revolution*

Weil er als erster ein astronomisches System vollständig auf der Erdbewegung aufbaute, wird Kopernikus häufig der erste moderne Astronom genannt. Doch wie sein Werk *De Revolutionibus* andeutet, könnte man ihn genausogut den letzten großen ptolemäischen Astronomen nennen. Ptolemäische Astronomie bedeutete weit mehr als die Aussage, daß die Erde ruhe, nur in dieser Hinsicht brach Kopernikus mit der Tradition. Der kosmologische Rahmen, in den seine Astronomie eingebettet wurde, seine Physik und sogar die mathematischen Hilfsmittel, die er verwendete, damit sein System gute Vorhersagen machte, sie alle stehen in der Tradition der antiken und mittelalterlichen Gelehrten.

Obwohl Historiker gelegentlich erbittert argumentiert haben, ob Kopernikus tatsächlich der letzte antike oder der erste moderne Astronom ist, ist die Debatte im Prinzip unsinnig. Kopernikus ist weder ein antiker, noch

ein moderner Astronom, sondern statt dessen ein Astronom der Renaissance, in dessen Werk sich die beiden Traditionen treffen. Die Frage, ob sein Werk tatsächlich antik oder modern sei, entspricht der Frage, ob der Knick in einer sonst geraden Straße jenem Abschnitt vor dem Knick oder jenem nach dem Knick zugehört. Genauso markiert *De Revolutionibus* eine Änderung der Richtung, in die sich astronomisches Denken entwickelte.

Bisher haben wir in diesem Kapitel hauptsächlich die Verknüpfungen zwischen *De Revolutionibus* und der früheren astronomischen und kosmologischen Tradition betont. Wir haben das Ausmaß der kopernikanischen Neuerung, wie es Kopernikus selbst tat, wenig betont, weil wir hauptsächlich entdecken wollten, wie eine möglicherweise zerstörerische Neuerung von einer Tradition hervorgebracht werden könnte, die dadurch schließlich untergehen sollte. Doch wie wir bald sehen werden, ist dies nicht der einzige gültige Weg, *De Revolutionibus* zu sehen, und es ist nicht der Standpunkt, den die meisten späteren Anhänger des Kopernikus einnahmen. Für seine Nachfolger im 16. und 17. Jahrhundert leitete sich die hauptsächliche Bedeutung von *De Revolutionibus* aus dem einzig neuen Konzept, dem Planeten Erde, und aus den neuen astronomischen Konsequenzen, den neuen Harmonien ab, die Kopernikus daraus abgeleitet hatte. Für sie bedeutete das kopernikanische System die dreifache Bewegung der Erde und ursprünglich diese allein. Die traditionellen Vorstellungen, mit denen Kopernikus seine Neuerungen verzerrt hatte, waren für seine Nachfolger keine wesentlichen Elemente seines Werkes, da sie als traditionelle Elemente nicht sein Beitrag zur Wissenschaft waren.

Das ist der Grund, warum *De Revolutionibus* der Anfangspunkt einer neuen astronomischen und kosmologischen Tradition sein konnte, ebenso wie der Höhepunkt einer alten. Jene, die Kopernikus zum Konzept einer bewegten Erde bekehrte, begannen ihre Forschung dort, wo Kopernikus aufgehört hatte. Ihr Ausgangspunkt war die Bewegung der Erde, was auch alles war, was sie von Kopernikus übernahmen, und die Probleme, denen sie sich zuwandten, waren nicht die Probleme der alten Astronomie, die Kopernikus beschäftigt hatten, sondern die Probleme der neuen heliozentrischen Astronomie, die sie in *De Revolutionibus* kennlernten. Kopernikus stellte sie vor Probleme, die weder er noch seine Vorgänger gesehen hatten. In der Bearbeitung dieser Probleme wurde die kopernikanische Revolution vervollständigt, eine neue astronomische Tradition wurde begründet. Die moderne Astronomie blickt auf *De Revolutionibus* zurück, wie Kopernikus auf Hipparch und Ptolemäus zurückgeblickt hatte.

Bedeutende Umwälzungen der fundamentalen Konzepte einer Wissenschaft erfolgen schrittweise. Das Werk einer einzelnen Person mag eine herausragende Rolle spielen, doch wenn es dies tut, dann entweder deshalb, weil es wie *De Revolutionibus* einen Umsturz durch eine kleine Neuerung einleitet, die die Wissenschaft vor neue Probleme stellt, oder weil es wie Newtons *Principia* eine Revolution beendet, indem es aus vielen Quellen abgeleitete Vorstellungen zusammenfaßt. Das Ausmaß der Neuerungen, die eine einzelne Person hervorrufen kann, ist notwendigerweise beschränkt, denn jedes Individuum muß bei seiner Forschung die Hilfsmittel verwenden, die es von einer traditionellen Erziehung erhält, es kann sie nicht alle im Laufe seines Lebens ersetzen. Es scheint daher, daß viele Elemente in *De Revolutionibus*, die wir in den früheren Teilen dieses Kapitels als enttäuschend bezeichnet hatten, dies doch nicht sind. *De Revolutionibus* scheint nur für jene enttäuschend, die die gesamte kopernikanische Revolution in dem Werk zu finden hoffen, das jener Wende den Namen gab, doch eine solche Erwartung leitet sich aus einem falschen Verständnis dessen ab, wie neue Wege wissenschaftlichen Denkens entstehen. Die Beschränkungen von *De Revolutionibus* sollte man besser als wesentliche und typische Züge eines jeden revolutionären Werkes betrachten.

Die meisten scheinbaren Überraschungen in *De Revolutionibus* spiegeln die Persönlichkeit ihres Autors wieder, die Persönlichkeit von Kopernikus scheint seiner Rolle in der Entwicklung der Astronomie vollständig angepassen zu sein. Kopernikus war zutiefst Spezialist. Er stand in der wiederbelebten hellenistischen Tradition der mathematischen Astronomie, die dem mathematischen Problem der Planeten mehr Aufmerksamkeit schenkte als der Kosmologie. Für seine hellenistischen Vorfürer war der physikalische Widersinn eines Epizykels kein wesentlicher Nachteil des ptolemäischen Systems gewesen. Kopernikus zeigte ein ähnliches Desinteresse an kosmologischen Details, als er die Problematik einer bewegten Erde in einem im übrigen traditionellen Universum nicht erkannte. Für ihn kamen die mathematischen Details zuerst. Er trug Scheuklappen, die seinen Blick auf die mathematischen Harmonien der Himmel gebannt hielten. Für jeden, der seine Vorliebe nicht teilte, war das kopernikanische Weltbild beschränkt und seine Werteskala verzerrt.

Doch ein ungewöhnliches Interesse am Himmel und eine verzerrte Werteskala mögen wesentliche Züge des Mannes sein, der den Umsturz in Astronomie und Kosmologie einleitete. Die Scheuklappen, die Kopernikus' Blick auf den Himmel beschränkten, mögen wesentlich gewesen sein. Sie ließen ihn über Diskrepanzen von wenigen Graden in astronomischen Vorher-

sagen grübeln, so daß er im Versuch, sie zu lösen, eine kosmologische Häresie, die Bewegung der Erde, akzeptierte. Sein Blick war von geometrischer Harmonie so gefesselt, daß er ihretwegen an seiner abweichenden Meinung selbst dann festhalten konnte, als er das ursprüngliche Problem nicht lösen konnte. Die Scheuklappen halfen ihm auch, die außerastronomischen Folgerungen seiner Neuerung zu vermeiden; Menschen mit weniger beschränktem Gesichtsfeld mußten hingegen seine Neuerungen als absurd verwerfen.

Schließlich ist Kopernikus' Konzentration auf die Himmelsbewegungen für die Feinarbeit verantwortlich, mit der er die mathematischen Konsequenzen der Erdbewegung studierte und sie zur vorhandenen Kenntnis hinzufügte. Diese detaillierte, jedoch technische Untersuchung ist sein wahrer Beitrag. Vor und nach ihm gab es Kosmologen, die radikaler waren als er, Leute, die mit raschen Pinselstrichen ein unendliches und vielfach besiedeltes Universum skizzierten. Doch keiner von ihnen schuf ein Werk, das den späteren Teilen von *De Revolutionibus* gleich kommt, und es sind gerade diese Teile, die durch die erstmalige Demonstration, daß die Arbeit des Astronomen von einer bewegten Erde aus – sogar besser – getan werden konnte, eine stabile Basis für eine neue astronomische Tradition boten. Wäre das erste Buch von Kopernikus alleine erschienen, die kopernikanische Revolution wäre unter einem anderen Namen bekannt.

## 6 Die Assimilation der kopernikanischen Astronomie

### *Die Aufnahme seines Werkes*

Kopernikus starb 1543, dem Erscheinungsjahr von *De Revolutionibus*. Die Überlieferung berichtet uns, daß er das erste gedruckte Exemplar seines Lebenswerkes am Totenbett erhielt. Das Buch mußte ohne weitere Hilfe seines Verfassers seinen Weg gehen. Doch dafür hatte Kopernikus eine fast ideale Waffe geschmiedet. Er hatte das Buch für alle außer den besten Astronomen seiner Zeit unlesbar gemacht. Außerhalb der astronomischen Welt erzeugte *De Revolutionibus* anfänglich sehr wenig Aufregung. Als sich dann weite Opposition in Laien- und Kirchenkreisen entwickelte, hatten bereits die meisten führenden europäischen Astronomen, an die das Buch gerichtet war, das eine oder andere von Kopernikus' mathematischen Verfahren für unersetztlich befunden. Es war daraufhin unmöglich, das Werk vollständig zu unterdrücken, besonders auch, weil es gedruckt worden war und nicht wie das Werk von Oresme oder Buridan nur als Manuskript existierte. Sei es Absicht oder nicht, der schließliche Sieg von *De Revolutionibus* wurde durch Infiltration erreicht.

Bereits zwei Jahrzehnte vor Publikation des Hauptwerkes war Kopernikus als einer der führenden europäischen Astronomen weithin anerkannt. Berichte über seine Forschung, einschließlich seiner neuen Hypothese, zirkulierten bereits seit etwa 1515. Die Veröffentlichung von *De Revolutionibus* wurde dringend erwartet. Als das Werk erschien, mögen die Zeitgenossen von Kopernikus seine Haupthypothese bezweifelt haben und über die Kompliziertheit seiner astronomischen Theorie enttäuscht gewesen sein, doch mußten sie das Buch als das erste europäische Werk anerkennen, das dem *Almagest* an Tiefe und Vollständigkeit gleich kam. Viele astronomische Spezialwerke, die in den ersten 50 Jahren nach Kopernikus' Tod geschrieben wurden, verwiesen auf ihn als einen zweiten Ptolemäus, oder „den hervorragenden Meister unseres Zeitalters“; in zunehmendem Maße borgten diese Bücher Daten, Berechnungen und Diagramme aus *De Revolutionibus*, zumindest aus Teilen, die von

der Erdbewegung unabhängig waren. In der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts wurde das Buch ein Standardnachschlagewerk für alle, die mit höheren Problemen der astronomischen Forschung beschäftigt waren.

Doch der Erfolg des Werkes bedeutet nicht den Erfolg seiner zentralen These. Der Glaube der meisten Astronomen an die Unbeweglichkeit der Erde war zunächst unerschüttert. Autoren, die Kopernikus applaudierten, seine Diagramme borgten, oder seine Bestimmung der Distanz Erde – Mond zitierten, ignorierten üblicherweise die Erdbewegung oder verwarfene sie als absurd. Selbst die wenigen Bücher, die die kopernikanische Hypothese erwähnten, verteidigten oder benützten sie kaum. Eine typische Reaktion auf die kopernikanische Neuerung zeigt sich an der Bemerkung des englischen Astronomen Thomas Blundeville; er schrieb: „Kopernikus behauptet, daß sich die Erde um die Sonne dreht und die Sonne in der Mitte des Himmels still steht, durch welche falsche Annahme er bessere Berechnungen der Bewegungen und Umdrehungen der Himmelskugel gemacht hat als jemals zuvor.“<sup>1</sup> Blundevilles Bemerkung erschien 1594 in einem elementaren Buch über Astronomie, das die Stabilität der Erde als gültig annahm. Doch der Kern von Blundevilles ablehnender Aussage muß seine aufmerksameren und interessierteren Leser direkt zu *De Revolutionibus* geführt haben, ein Buch, das kein echter Astronom ignorieren konnte. Von Anfang an war es weithin gelesen, doch man las es trotz und nicht wegen seiner sonderbaren kosmologischen Hypothese.

Die weite Verbreitung des Buches sicherte ihm eine kleine, jedoch zunehmende Zahl von Lesern, die imstande waren, Kopernikus' Harmonien zu entdecken, und die willens waren, sie als Argument zu akzeptieren. Es gab einige wenige Anhänger, ihr Werk half auf verschiedene Weise, die Kenntnis des kopernikanischen Systems zu verbreiten. Die *Narratio Prima (Erster Bericht)* von Kopernikus' frühestem Schüler, Georg Joachim Rhetikus (1514 bis 1576), blieb die beste kurze Beschreibung der neuen astronomischen Methoden durch viele Jahre nach ihrer ersten Veröffentlichung im Jahre 1540. Die volkstümliche Verteidigung der kopernikanischen Auffassung, die 1576 vom englischen Astronomen Thomas Digges (ca. 1546 bis 1595) veröffentlicht wurde, trug viel zur Verbreitung der Vorstellung einer bewegten Erde außerhalb des engen Zirkels der Astronomen bei. Michael Mästlin (1550 bis 1631), Professor der Astronomie an der Universität Tübingen, gewann der neuen Astronomie einige Anhänger, unter ihnen Kepler. Durch Lehre, Schriften und Forschung gewann die kopernikanische Lehre unausweichlich an Boden, obwohl die Astronomen, die ihren Glauben an die Vorstellung einer bewegten Erde offen eingestanden, eine kleine Minderheit blieben.

Die Zahl der erklärten Kopernikaner ist jedoch kein adäquates Maß für den Erfolg der kopernikanischen Idee. Viele Astronomen fanden einen Weg, sein mathematisches System zu verwenden und zum Erfolg der neuen Astronomie beizutragen, während sie die Erdbewegung leugneten oder über sie schwiegen. Die hellenistische Astronomie bot dafür ein Vorbild. Ptolemäus selbst hatte niemals behauptet, daß alle Kreise, die im Almagest zur Berechnung von Planetenpositionen gebraucht wurden, physikalische Realität hätten. Sie waren nützliche mathematische Hilfsmittel, und sie brauchten nicht mehr als dies sein. In ähnlicher Weise stand es den Astronomen der Renaissance frei, den Kreis der Erdbahn als eine mathematische Fiktion zu betrachten, die nur für die Rechnungen nützlich war. Sie konnten Planetenpositionen berechnen, als ob sich die Erde bewegte, ohne sich auf die physikalische Realität jener Bewegung festlegen zu müssen. Andreas Osiander, der lutheranische Theologe, der den Druck von Kopernikus' Manuskript besorgten ließ, hatte diese Möglichkeit den Lesern in einem anonymen Vorwort nahegelegt, das ohne Kopernikus' Erlaubnis *De Revolutionibus* beigelegt wurde. Das gefälschte Vorwort täuschte vermutlich nicht viele Astronomen, doch einige von ihnen nützten die ihnen vorgeschlagene Möglichkeit. Die Verwendung von Kopernikus' mathematischem System ohne Annahme einer wahren Bewegung der Erde bot eine zweckmäßige Ausflucht aus dem Dilemma zwischen den himmlischen Harmonien und dem irdischen Mißklang von *De Revolutionibus*. Dabei schwand langsam die ursprüngliche Überzeugung der Astronomen, daß eine Erdbewegung absurd wäre.

Erasmus Reinhold (1511 bis 1553) war der erste Astronom, der viel für die kopernikanische Lehre tat, ohne sich auf die Bewegung der Erde festzulegen. 1551, nur acht Jahre nach der Veröffentlichung von *De Revolutionibus*, brachte er einen vollständigen Satz astronomischer Tabellen heraus, die mittels der kopernikanischen Methoden berechnet worden waren; diese wurden bald für Astronomen und Astrologen unersetztlich, egal wie ihre Meinung über die Position und die Bewegung der Erde war. Reinholds Tabellen waren die ersten vollständigen Tafeln, die in Europa seit 300 Jahren berechnet worden waren; die alten Tafeln, die von Anfang an einige Fehler enthalten hatten, waren nun überflüssig geworden. Reinholds überaus sorgfältige Arbeit, die auf etwas zahlreicheren und besseren Daten fußte, als sie denen zur Verfügung standen, die im 13. Jahrhundert Tafeln berechneten, führte auf einen Satz von Tabellen, die für die meisten Anwendungen den alten merkbar überlegen waren. Sie waren allerdings nicht vollkommen. Kopernikus' mathematisches System war nicht genauer als das ptolemäische; Fehler von der Größe eines Tages waren bei der Vorhersage von Mondesfinsternissen üblich, die Länge des Jahres war

nach Reinholds Tabellen tatsächlich etwas weniger genau bestimmt als nach den alten. Doch die meisten Vergleiche zeigten die Überlegenheit von Reinholds Werk, seine Tabellen wurden zunehmend ein astronomisches Hilfsmittel. Da die Tabellen bekannterweise aus der astronomischen Theorie von *De Revolutionibus* abgeleitet waren, stieg das Ansehen von Kopernikus unvermeidlich. Jedermann, der Reinholds Tabellen verwendete, stimmte zumindest stillschweigend der kopernikanischen Vorstellung zu.

In der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts konnten die Astronomen weder auf *De Revolutionibus* noch auf die darauf aufbauenden Tabellen verzichten. Kopernikus' Vorschlag gewann langsam, aber unaufhörlich an Boden. Nachfolgende Generationen von Astronomen waren aufgrund von Erfahrung und Erziehung weniger auf die Stabilität der Erde festgelegt, sie fanden in den neuen Harmonien ein immer stärkeres Argument für die Bewegung der Erde. Außerdem hatten sie gegen das Ende des Jahrhunderts begonnen, neue Hinweise zu entdecken. Hätte daher die Entscheidung zwischen Kopernikus und der Tradition nur Astronomen betroffen, hätte sein Vorschlag fast sicher allmählich einen stillen Sieg davongetragen. Doch die Entscheidung war nicht ausschließlich oder gar primär eine Sache der Astronomen, und als die Debatte aus den astronomischen Zirkeln hinausgetragen wurde, wurde sie äußerst stürmisch. Für die meisten, die sich nicht für das genaue Studium der Himmelbewegungen interessierten, schien die kopernikanische Neuerung absurd und gottlos. Selbst wenn sie verstanden wurden, schienen die gepriesenen Harmonien überhaupt kein Beweis zu sein.

Doch der Sturm begann langsam. Ursprünglich wußten wenige Nicht-Astronomen von Kopernikus' Neuerung oder erkannten in ihr mehr als eine vorübergehende Verirrung eines Einzelgängers, wie es bereits viele gegeben hatte. Die meisten einführenden astronomischen Lehrbücher, die in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts verwendet wurden, waren lang vor Kopernikus geschrieben worden – die Einführung von John of Holywood aus dem 13. Jahrhundert war noch ein häufig verwendetes Unterrichtsbehelf – und die neuen Handbücher, die nach dem Erscheinen von *De Revolutionibus* hergestellt wurden, erwähnten Kopernikus meist nicht oder lehnten seinen Vorschlag in ein oder zwei Sätzen ab. Die volkstümlichen Bücher zur Kosmologie, die den Laien das Universum beschrieben, blieben noch mehr in Ton und Inhalt aristotelisch. Ihren Verfassern war Kopernikus entweder unbekannt, oder er wurde ignoriert. Außer in einigen Zentren protestantischer Wissenschaft scheint die kopernikanische Lehre in den ersten Jahrzehnten nach Kopernikus' Tod kein kosmologisches Problem gewesen zu sein. Außerhalb der astronomischen Zirkel wurde sie bis zum Beginn des 17. Jahrhunderts selten eine wichtigere Frage.

Es gab einige Reaktionen von Nichtastronomen im 16. Jahrhundert. Sie bieten einen Vorgeschmack der stürmischen Debatte, die folgen sollte, denn sie waren meist eindeutig ablehnend. Kopernikus und seine wenigen Nachfolger wurden wegen der Absurdität ihrer Vorstellung einer bewegten Erde lächerlich gemacht, wenn auch ohne die spätere Heftigkeit oder ausgefeilte Dialektik, als die kopernikanische Lehre als harter und gefährlicher Gegner erkannt wurde. Ein langes Gedicht mit kosmologischem Inhalt, das zuerst in Frankreich 1578 veröffentlicht wurde und dort und in England die nächsten einviertel Jahrhunderte populär war, beschreibt in typischer Weise die Anhänger des Kopernikus:

Diese Kerle denken (was für ein dummer Scherz),  
daß weder Himmel noch Sterne sich drehen,  
noch um diesen großen runden Erdball tanzen,  
doch die Erde selbst, unser massives Erdenrund, dreht sich  
um sich alle 24 Stunden: und wir sind wie Landratten,  
die neu zur Seefahrt an Bord kommen.  
Die beim ersten in See stechen vermuten,  
das Schiff steht still, es ist die Küste, die davon zieht. ....  
So sollte niemals ein Pfeil, senkrecht hinaufgeschossen,  
an den selben Platz zurückfallen. ....  
Mit diesen Gründen wird es überflüssig,  
die Gründe des Kopernikus anzugreifen,  
der, um die Erscheinung der Sterne zu ver-  
bessern, der Erde eine dreifache Bewegung auferlegt.<sup>2</sup>

Da der Autor dieser poetischen Ablehnung der kopernikanischen Lehre ein Dichter, nicht ein Wissenschaftler oder Philosoph war, mögen sein kosmologischer Konservativismus und sein Klammern an klassische Quellen nicht überraschend sein. Doch gerade durch diese Dichter und populären Schriftsteller lernten die meisten Menschen das 16. und 17. Jahrhundert (wie auch heute) das Universum kennen. Das Werk *Die Woche, oder die Schöpfung der Welt*, aus dem das obige Zitat entnommen ist, wurde weiter verbreitet und einflußreicher als *De Revolutionibus*.

Keinesfalls beschränkt sich unkritische oberflächliche Ablehnung von Kopernikus und seinen Nachfolgern auf konservative und unoriginelle populäre Schriftsteller. Jean Bodin, der als einer der fortgeschrittensten und schöpferischsten politischen Philosophen des 17. Jahrhunderts gilt, verwirft die kopernikanische Idee mit fast den gleichen Worten:

Niemand mit Verstand oder mit der kleinsten Ahnung von Physik wird jemals glauben, daß die Erde, schwer und groß, um ihren eigenen Mittelpunkt und um den der Sonne hin- und herschwankt. ... Würde sich die Erde bewegen, so würde weder ein senkrecht nach oben geschossener Pfeil noch ein von der Spitze eines Turmes fallen gelassener Stein senkrecht fallen, sondern entweder vorausseilen oder zurückbleiben. ... Schließlich bleiben alle Dinge nach Aristoteles dort, wo sie einen ihrer Natur angepaßten Ort finden. Da der Erde ein Platz zugewiesen worden ist, der ihrer Natur entspricht, kann sie nicht von einer anderen Bewegung als ihrer eigenen herumgeführt werden<sup>3</sup>.

In diesem Abschnitt scheint Bodin ein Traditionalist zu sein, doch er war es nicht. Wegen seines im allgemeinen radikalen und atheistischen Tones wurde das Buch, aus dem obiges Zitat stammt, 1628 auf den Index derjenigen Bücher gesetzt, die Katholiken nicht lesen durften. Obwohl sein Autor selbst Katholik war, blieb das Buch bis in unsere Tage auf dem Index. Bodin war durchaus willens, mit der Tradition zu brechen, doch war dies nicht genug, um aus ihm einen Kopernikaner zu machen. Es war fast ausnahmslos notwendig, auch etwas von Astronomie zu verstehen und ihre Probleme ungeheuer ernst zu nehmen. Nur den Menschen mit Interesse an der Astronomie erschien die Erdbewegung in den Jahren nach Kopernikus' Tod nicht ganz so absurd wie zuvor.

Die Argumente gegen Kopernikus, wie sie von Du Bartas und Bodin vorgebracht wurden, können beträchtlich verfeinert werden, wie wir in unseren Diskussionen des aristotelischen Universums in den Kapiteln 3 und 4 gesehen haben. In der einen oder anderen Form, auf die wir nicht einzugehen brauchen, kommen sie in der ersten Hälfte des 17. Jahrhunderts immer wieder, als die Debatte über die Erdbewegung bitter und hart wurde. Die Erdbewegung, so sagt man, verletzt das erste Gebot des gesunden Menschenverstandes; sie steht im Konflikt mit wohletablierten Bewegungsgesetzen; sie wurde bloß vorgeschlagen, „um eine bessere Erscheinung der Sterne zu ermöglichen“, eine spöttische Herabsetzung des Anstoßes zur Revolution. Dies sind kräftige Argumente, sie reichen aus, um die meisten Leute zu überzeugen. Doch waren sie nicht die stärksten Waffen in der antikopernikanischen Schlachtreihe und sie erzeugten auch nicht die meiste Aufregung. Jene Waffen kamen aus der Religion, besonders aus der Bibel.

Zitate aus der Bibel wurden gegen Kopernikus bereits vor der Veröffentlichung von *De Revolutionibus* vorgebracht. In einer seiner Tischreden soll Martin Luther 1539 gesagt haben:

Die Leute schenken ihr Ohr einem Astrologen, der zeigen möchte, daß sich die Erde dreht, nicht der Himmel oder das Firmament, die Sonne, oder der Mond. ... Dieser Dummkopf möchte die ganze Astronomie umstürzen; doch die heilige Schrift sagt uns [Josua 10:13], daß Josua die Sonne still stehen hieß und nicht die Erde.<sup>4</sup>

Luthers hauptsächlicher Mitarbeiter Melanchthon gesellte sich bald zur zunehmenden protestantischen Front gegen Kopernikus. Sechs Jahre nach Kopernikus' Tod schrieb er:

Die Augen sind Zeugen, daß sich der Himmel in 24 Stunden umdreht. Doch gewisse Leute haben entweder aus Neuerungssucht, oder um ihre Klugheit zu zeigen, geschlossen, daß sich die Erde bewegt. Sie behaupten, daß sich weder die achte Sphäre noch die Sonne drehen. ... Doch es zeigt einen Mangel an Ehre und Geschmack, solche Vorstellungen öffentlich zu äußern, das Beispiel ist gefährlich. Es ist Pflicht eines guten Christen, die Wahrheit, wie sie von Gott offenbar wurde, zu akzeptieren und auf sie zu vertrauen<sup>5</sup>.

Melanchthon fuhr dann fort, einige Bibelzitate gegen Kopernikus zusammenzustellen, darunter die berühmten Verse (Pred. 1:4–5), die feststellen, daß „die Erde auf ewig ruht“ und daß „die Sonne sich erhebt und untergeht und zu der Stelle eilt, wo sie aufgegangen ist“. Schließlich schlägt er strenge Maßnahmen vor, um die Gottlosigkeit der Kopernikaner zu bekämpfen.

Andere protestantische Führer schlossen sich bald der Ablehnung von Kopernikus an. Calvin zitierte in seinem Kommentar zur Genesis die Einangsverse des 93. Psalm: „Die Erde ist so gegründet, daß sie sich nicht bewegen kann“, und er forderte: „Wer wird es wagen, die Autorität von Kopernikus über die des heiligen Geistes zu stellen?“<sup>6</sup>. In zunehmendem Maß wurde das Zitieren aus der Bibel eine beliebte Quelle für Argumente gegen Kopernikus. In den ersten Jahrzehnten des 17. Jahrhunderts suchten Geistliche aller Konfessionen die Bibel Zeile für Zeile nach neuen Passagen ab, die die Anhänger der Erdbewegung zum Schweigen bringen sollten. Immer häufiger wurden die Kopernikaner als ungläubig und atheistisch bezeichnet, und als sich nach 1610 die katholische Kirche offiziell dem Kampf gegen die kopernikanische Lehre anschloß, lautete die Anklage auf Häresie. 1616 wurden *De Revolutionibus* und alle anderen Schriften, die die Erdbewegung

bejahten, auf den Index gesetzt. Den Katholiken war es verboten, die koper-nikanischen Ansichten zu lehren, ja sogar zu lesen, außer in Versionen, in denen jeder Hinweis auf die Erdbewegung und die zentrale Sonne weggelassen wurden.

Die vorangegangene Skizze zeigt die populärsten und stärksten Waffen gegen Kopernikus und seine Anhänger, doch zeigt sie kaum, worum der Krieg in Wirklichkeit ging. Die meisten oben erwähnten Autoren sind so beschäftigt, die Erdbewegung als absurd oder als im Konflikt mit der Bibel abzulehnen, daß sie zu zeigen vergessen – und sie mögen es zunächst gar nicht bemerkt haben –, daß die kopernikanische Lehre einer ganzen Denkweise das Ende bereiten könnte. Mehr als eine Auffassung vom Universum und als einige Zeilen aus der Bibel standen am Spiel. Christliche Lebensauffassung und Moral wollten sich nicht einem Universum anpassen, in dem die Erde bloß einer von vielen Planeten war. Kosmologie, Moral und Theologie waren lange zu dem traditionellen christlichen Gedankengewebe verknüpft gewesen, das Dante zu Beginn des 14. Jahrhunderts beschrieben hatte. Heftigkeit und Gehässigkeit, die sich am Höhepunkt der Kontroverse zeigten, legten Zeugnis von der Stärke und Lebenskraft dieser Tradition ab.

Wenn Kopernikus' Vorschlag ernst genommen wurde, schuf er für den gläubigen Christen viele große Probleme. Wenn etwa die Erde nur einer von 6 Planeten wäre, wie sollten die Berichte vom Sündenfall und der Erlösung mit ihrer ungeheuren Bedeutung für das christliche Leben weiter gelten. Wenn es andere Körper gäbe, die der Erde ähnlich wären, würde Gottes Güte sicherlich bewirken, daß auch sie bewohnt wären. Doch wenn es Menschen auf anderen Planeten gäbe, wie könnten sie von Adam und Eva abstammen, wie könnten sie die Ursünde geerbt haben, die die sonst unverständlichen Mühen und Leiden des Menschen auf der Erde, die ihm ein guter und allmächtiger Gott auferlegte, erklärt? Wie könnten Menschen auf anderen Planeten vom Heiland wissen, der ihnen die Möglichkeit ewigen Lebens eröffnet hat? Oder wenn die Erde ein Planet ist und daher als Himmelskörper vom Mittelpunkt des Universums entfernt wäre, wie könnte man die Stellung des Menschen zwischen den Teufeln und den Engeln verstehen? Wenn die Erde als Planet ihrer Natur nach zu den Himmelskörpern gehört, dann kann sie nicht der Ort der Schlechtigkeit sein, dem der Mensch zur göttlichen Reinheit der Himmel entfliehen möchte. Noch können die Himmel ein passender Wohnsitz Gottes sein, wenn sie an den Übeln und der Unvollkommenheit teilhaben, die auf dem Planeten Erde so deutlich zu sehen sind. Schließlich, wo kann Gottes Thron stehen, wenn das Universum unendlich

ist, wie viele späteren Kopernikaner dachten? Wie soll in einem unendlichen Universum der Mensch Gott finden oder Gott den Menschen?

Auf diese Fragen gibt es Antworten, doch man fand sie nicht leicht und sie waren nicht ohne Folgen; sie halfen, die religiöse Erfahrung des Durchschnittsmenschen zu ändern. Die kopernikanische Anschauung erforderte einen Wandel in der Vorstellung des Menschen über seine Beziehung zu Gott und in der Grundlage seiner Moral. Solch ein Wandel konnte nicht über Nacht kommen; bis dahin mochten feinfühlige Beobachter sehr wohl die traditionellen Werte unverträglich mit der neuen Kosmologie finden, und die Häufigkeit, mit der die Anklage des Atheismus gegen die kopernikanische Lehre erhoben wurde, zeigt die Bedrohung, die das Konzept eines Planeten Erde in den Augen vieler Beobachter für die etablierte Ordnung darstellte.

Doch die Anklage auf Atheismus ist nur ein indirekter Beweis. Ein wichtigeres Zeugnis stammt von Menschen, die sich gezwungen fühlten, die kopernikanische Idee ernst zu nehmen. Bereits 1611 sagt der englische Poet und Geistliche John Donne zu den Kopernikanern, daß „Eure Ansichten sehr wohl wahr sein mögen ..., sie dringen in jedermann's Denken ein“<sup>7</sup>, doch konnte er nur Schlechtes in dem bevorstehenden Wandel erkennen. In demselben Jahr, in dem er widerstrebend die Möglichkeit einer Erdbewegung eingestand, beschrieb er sein Unbehagen über die bevorstehende Auflösung der traditionellen Kosmologie in einem Gedicht mit dem Titel *The Anatomy of the World*, in dem „die Schwäche und der Verfall dieser ganzen Welt“ dargestellt wurden. Zum Teil leitete sich sein Unbehagen direkt aus der kopernikanischen Lehre ab:

Die neue Philosophie zieht alles in Zweifel,  
Das Element Feuer ist verlöscht;  
Die Sonne ist nicht mehr, was sie war, und auch die Erde.  
Und man gesteht, daß diese Welt vorbei ist,  
Wenn unter den Planeten und am Firmament  
sie so viele neue suchen.<sup>8</sup>

65 Jahre später, als die Mehrheit der Wissenschaftler die Erdbewegung akzeptierte, bot die kopernikanische Lehre dem englischen Dichter John Milton dasselbe Problem für die christliche Moral, obwohl er es anders löste. Milton dachte ebenfalls, daß die kopernikanische Idee sehr wohl wahr sein könnte. Er nahm in sein Werk *Paradise Lost* eine lange Beschreibung der beiden gegensätzlichen Weltsysteme auf, des ptolemäischen und des kopernikanischen, doch ergriff er in der Kontroverse keinerlei Partei. In seinem

Epos, dessen Thema die „Rechtfertigung der Wege von Gott zum Menschen“ war, war er gezwungen, einen traditionellen kosmologischen Rahmen zu verwenden. Das Universum von *Paradise Lost* ist aber nicht das von Dante; Milton leitet die Position von Himmel und Hölle aus einer noch älteren Tradition als Dante ab. Doch der irdische Rahmen, in dem Milton den Sturz des Menschen zeichnet, ist weiterhin ein stabiler und im Mittelpunkt ruhender Körper, von Gott für den Menschen geschaffen. Obwohl bereits mehr als ein Jahrhundert seit der Veröffentlichung von *De Revolutionibus* vergangen war, konnten die christlichen Anschauungen noch nicht einem Universum angepaßt werden, in dem die Erde ein Planet war und in dem neue Welten beständig „unter den Planeten und am Firmament“ entdeckt werden konnten.

Das Unbehagen von Donne und die kosmologische Entscheidung Miltons zeigen die außerwissenschaftlichen Fragen, die im 17. Jahrhundert wesentliche Teile der Kontroverse über Kopernikus bildeten. Diese Fragen erklären die Feindseligkeit, auf die Kopernikus' Vorschlag außerhalb der wissenschaftlichen Kreise traf. Sie können aber nicht die Intensität jener Feindseligkeit, noch die Entschlossenheit bedeutender Protestanten und Katholiken erklären, die Ablehnung der kopernikanischen Lehre zu einer offiziellen Kirchenlehre zu machen, die die Verfolgung von Kopernikanern rechtfertigen konnte. Man kann leicht das Vorhandensein eines starken Widerstandes gegen die kopernikanische Idee verstehen, doch man kann die extremen Formen, die jener Widerstand gelegentlich annahm, nur schwer verstehen. Vor der Mitte des 16. Jahrhunderts bietet die Kirchengeschichte wenig Beispiele für die Härte, mit der die offiziellen Führer der größeren religiösen Gruppen den Bibeltext anwandten, um eine wissenschaftliche Theorie zu unterdrücken. Selbst in der Frühzeit der katholischen Kirche, als Kirchenväter wie Lactantius die Schrift verwendeten, um die klassische Kosmologie zu zerstören, hatte es keine offizielle katholische Stellungnahme zu kosmologischen Fragen gegeben, an die sich die Gläubigen halten mußten.

Die Härte der offiziellen protestantischen Opposition ist wesentlich leichter zu verstehen als die katholische, denn man kann sie zur grundlegenden Streitfrage in Beziehung setzen, die bei der Spaltung der Kirchen aufflammte. Luther, Calvin und ihre Anhänger wollten zu einem ursprünglichen Christentum zurückkehren, wie man es in den Worten von Jesus und den frühen Kirchenvätern finden konnte. Für die Protestanten war die Bibel die einzige grundlegende Quelle christlichen Wissens. Sie lehnten das Ritual und die dialektischen Spitzfindigkeiten ab, die Kirchenkonzile immer wieder zwischen dem Gläubigen und der Quelle seines Glaubens errichtet hatten. Sie verabscheuten die ausgefeilte, bildhafte und allegorische Interpretation

der Schrift; ihr buchstabentreues Hängen an der Bibel im Hinblick auf die Kosmologie fand seit den Tagen von Lactantius, Basil und Kosmas kein Gegenstück. Für sie mag Kopernikus als Symbol der gewundenen Neudeutungen gegolten haben, die im späteren Mittelalter die Christen von der Grundlage ihres Glaubens getrennt hatten. Daher erscheint die heftige Ablehnung durch offizielle protestantische Stellen nahezu natürlich. Ein Tolerieren der kopernikanischen Lehre hätte das Tolerieren einer bestimmten Haltung gegenüber der heiligen Schrift und gegen Wissen im allgemeinen bedeutet, das nach Ansicht der Protestantten die Christenheit bereits auf Abwege gebracht hatte.

Die kopernikanische Vorstellung ist daher indirekt in die größeren religiösen Kämpfe zwischen Protestantten und Katholiken hineingezogen, dies erklärt einen Teil der großen Erbitterung, die die kopernikanische Kontroverse hervorrief. Luther, Calvin und Melanchthon waren beim Zitieren der Bibel gegen Kopernikus und bei der Forderung nach Unterdrückung der Kopernikaner führend. Da jedoch die Protestantten niemals den Polizeiapparat besaßen, der der katholischen Krise zur Verfügung stand, waren ihre Unterdrückungsmaßnahmen selten so wirkungsvoll wie die später von den Katholiken ergriffenen; sie wurden auch leichter wieder aufgegeben, als die Evidenz zugunsten Kopernikus überwältigend wurde. Doch boten die Protestantten trotzdem die erste wirkungsvolle institutionelle Opposition. Reinhards Schweigen über die physikalische Realität des mathematischen Systems, das er bei der Berechnung seiner Tabellen verwendet hatte, wird üblicherweise als Anzeichen der offiziellen Opposition an der protestantischen Universität zu Wittenberg gedeutet. Osiander, der die gefälschte Vorrede zu *De Revolutionibus* hinzufügte, war ebenfalls Protestant. Rheticus, der erste öffentliche Verteidiger der kopernikanischen Astronomie, war ebenfalls ein Protestant, doch seine *Narratio Prima* wurde geschrieben, während er von Wittenberg abwesend war und bevor *De Revolutionibus* erschien. Nach seiner Rückkehr nach Wittenberg veröffentlichte er keine weiteren Schriften zugunsten Kopernikus.

60 Jahre lang nach Kopernikus' Tod gab es kein wesentliches katholisches Gegenstück zur protestantischen Opposition gegen ihn. Vereinzelt zeigten katholische Geistliche ihren Unglauben, beziehungsweise ihren Abscheu vor den neuen Vorstellungen über die Erde, doch die Kirche selbst schwieg. *De Revolutionibus* wurde gelesen und zumindest hin und wieder an führenden katholischen Universitäten unterrichtet. Reinhards Tabellen, die auf dem mathematischen System von Kopernikus beruhen, wurden bei der Reform des Kalenders benutzt, die für die katholische Welt 1582 von Gre-

gor XIII. angeordnet wurde. Kopernikus selbst war ein geachteter Kleriker gewesen, dessen Rat auch in nichtastronomischen Angelegenheiten gefragt war. Sein Buch war dem Papst gewidmet, unter den Freunden, die ihn zur Veröffentlichung drängten, waren ein katholischer Bischof und ein Kardinal. Im 14., 15. und 16. Jahrhundert hatte die Kirche ihren Gläubigen keinerlei einheitliche Meinung in kosmologischen Fragen auferlegt. *De Revolutionibus* war selbst ein Produkt des Spielraumes, den Kirchenangehörige bei wissenschaftlichen und weltlich-philosophischen Themen genossen, und vor *De Revolutionibus* waren ohne theologische Krämpfe aus ihrem Bereich noch revolutionärere kosmologische Konzepte hervorgegangen. Im 15. Jahrhundert hatte der hervorragende Kardinal und päpstliche Legat Nikolaus von Cusa eine radikale neuplatonische Kosmologie vorgeschlagen und hatte keine Bedenken über den Konflikt zwischen seinen Ansichten und der Bibel. Obwohl er die Erde als einen bewegten Stern wie die Sonne und andere Sterne ansah, und obwohl seine Werke weit verbreitet waren und großen Einfluß hatten, wurde er von seiner Kirche weder verurteilt noch kritisiert.

Als daher 1616 und nochmals 1633 die Kirche die Lehre oder den Glauben, daß die Sonne im Zentrum des Universums stand und sich die Erde um sie bewegte, verbot, kehrte die Kirche eine Haltung um, die Jahrhunderte lang in der katholischen Praxis bestanden hatte. Diese Umkehr schockierte eine Anzahl aufrechter Katholiken, weil sie die Kirche zwang, gegen eine physikalische Lehre Stellung zu nehmen, für die fast täglich neue Beweise entdeckt wurden, und weil für die Kirche offensichtlich auch eine andere Haltung möglich gewesen wäre. Dieselben Kunstgriffe, die im 12. und 13. Jahrhundert der Kirche gestattet hatten, Ptolemäus und Aristoteles zu integrieren, hätten im 17. Jahrhundert auch auf Kopernikus angewendet werden können. In begrenztem Ausmaß waren sie bereits verwendet. Die Diskussion der täglichen Erdrotation durch Oresme im 14. Jahrhundert hatte die biblische Evidenz für die Unbeweglichkeit der Erde nicht ignoriert. Oresme hatte zwei Bibelstellen zitiert, die oben erwähnt wurden, und hatte dann geantwortet:

Auf das Argument aus der heiligen Schrift, das besagt, daß sich die Sonne um die Erde dreht, würde man sagen, daß sie hier dem allgemeinen Sprachgebrauch entspricht, wie auch an einigen [anderen] Stellen, zum Beispiel, wenn es geschrieben steht, daß Gott mitleidig oder zornig oder besänftigt ist, und all die anderen Dinge, die nicht genau so sind, wie sie klingen. Es paßt auch zu unserer Frage, wenn wir lesen, daß Gott den Himmel mit Wolken bedeckt: ... und doch in der Realität enthält der Himmel die Wolken.<sup>10</sup>

Obwohl die von der kopernikanischen Lehre geforderte neue Interpretation drastischer und schwieriger gewesen wäre, hätte dieselbe Art von Argumenten ausgereicht. Im 18. und 19. Jahrhundert wurden ähnliche Argumente verwendet und selbst im 17. Jahrhundert, als die offizielle Entscheidung getroffen wurde, die kopernikanische Lehre zu verbieten, erkannten einige führende Katholiken, daß solch weitreichende Neuformulierungen erforderlich sein könnten. 1615 schrieb Kardinal Bellarmin, der Vorsitzende des kirchlichen Gremiums, das ein Jahr später die kopernikanischen Ansichten verurteilte, an Foscarini:

Gäbe es tatsächlich einen Beweis, daß die Sonne im Mittelpunkt des Universums steht, daß die Erde im dritten Himmel ist, und daß die Sonne nicht um die Erde, sondern die Erde um die Sonne kreist, dann sollten wir mit großer Vorsicht die Passagen der Heiligen Schrift erklären, die das Gegenteil zu lehren scheinen, und eher eingestehen, daß wir sie nicht verstanden haben, als eine Meinung für falsch zu erklären, die sich als wahr erweist.<sup>11</sup>

Außerst wahrscheinlich erscheint Bellarmin hier liberaler, als er war. Der nächste Satz seines Briefes lautet: „Doch was mich betrifft, ich werde so lange nicht glauben, daß es solche Beweise gibt, bis man sie mir gezeigt hat.“ Und dieser Satz war in voller Kenntnis der Entdeckungen geschrieben, bei denen Galilei mit Hilfe des Teleskopes neue starke Hinweise auf die Gültigkeit der kopernikanischen Idee gefunden hatte. Wir mögen uns fragen, welche Art von Beweis Bellarmin als „echten Beweis“ neben dem buchstäblichen Wort der Schrift hätte gelten lassen. Doch war er sich zumindest im Prinzip der Möglichkeit eines Beweises bewußt, der eine neue Deutung erzwingen würde. Erst in der zweiten Dekade des 17. Jahrhunderts legten die katholischen Autoritäten größeres Gewicht auf die wörtliche Auslegung der Schrift und gewährten abweichenden Spekulationen weniger Spielraum als in den vergangenen Jahrhunderten.

Ein Großteil der zunehmend fundamentalistischen Position, die der katholischen Verurteilung von Kopernikus zugrunde liegt, muß meiner Meinung nach eine Reaktion auf den Druck gewesen sein, der auf der Kirche durch die protestantische Auflehnung lastete. Die kopernikanischen Lehren wurden ja im Laufe der Gegenreformation verurteilt, als die Kirche gerade von den inneren Reformen erschüttert war, die die Antwort auf die protestantische Kritik bilden sollten. Die Ablehnung von Kopernikus scheint zumindest teilweise eine jener Reformen zu sein. Ein anderer Grund für die zunehmende

Empfindlichkeit der Kirche der kopernikanischen Lehre gegenüber mag im langsamem Erkennen der weiteren theologischen Folgerungen aus der Erdbewegung liegen. Im 16. Jahrhundert waren diese Folgerungen kaum zu sehen gewesen, im Jahre 1600 wurden sie jedoch durch das Aufsehen deutlich, das die Hinrichtung von Giordano Bruno, dem Philosophen und Mystiker, auf dem Scheiterhaufen zu Rom in ganz Europa erregte. Bruno wurde nicht wegen seiner kopernikanischen Ansichten hingerichtet, sondern wegen zahlreicher theologischer Häresien, die in seiner Anschauung der Dreieinigkeit gipfelten, und deretwegen Katholiken schon zuvor hingerichtet worden waren. Er wurde oft ein Märtyrer der Wissenschaft genannt, das ist er aber nicht. Doch hatte Bruno den Vorschlag von Kopernikus als verwandt mit seinen neuplatonischen und demokritischen Ansichten über ein unendliches Universum, das eine unendliche Anzahl von Welten enthielt, empfunden. Er hatte die kopernikanische Lehre in England und am Festland verkündet und hatte ihr eine Bedeutung gegeben, die man in *De Revolutionibus* nicht findet (s. Kapitel 7). Gewiß fürchtete die Kirche Brunos kopernikanische Ansichten, und diese Angst mag ihre Reaktion hervorgerufen haben.

Was auch immer die Gründe gewesen sein mögen, im Jahre 1616 machte die Kirche die kopernikanische Lehre zu einer Glaubenssache, die schlimmsten Exzesse gegen die Erdbewegung – die Verurteilung der Ansichten von Kopernikus, Galileis Widerruf und Gefängnis, und die Entlassung und Verbannung prominenter katholischer Anhänger des Kopernikus – ereigneten sich in oder bald nach diesem Jahr. Sobald der Apparat der Inquisition auf die kopernikanische Lehre losgelassen worden war, konnte die Kirche ihre Meinung kaum mehr ändern. Erst 1822 erlaubte sie den Druck von Büchern, die die Erdbewegung als physikalisch real behandelten; zu diesem Zeitpunkt waren alle außer den ganz orthodoxen protestantischen Sekten seit langem überzeugt. Die offizielle Stellungnahme der Kirche zur Stabilität der Erde fügte der katholischen Wissenschaft und später dem Prestige der Kirche unwiderruflichen Schaden zu. Keine Episode wurde so oft gegen die Kirche angeführt wie der dem betagten Galilei im Jahre 1633 aufgezwungene Widerruf.

Der Widerruf Galileis markiert den Höhepunkt des Kampfes gegen Kopernikus, doch welche Ironie – er wurde erst erzwungen, als das Ergebnis des Kampfes vorhergesehen werden konnte. Vor 1610, als sich die Opposition gegen die kopernikanische Lehre sammelte, wären alle außer den fanatischsten Anhängern der Erdbewegung zum Eingeständnis gezwungen gewesen, daß die Evidenz dafür schwach und die Gegenevidenz hingegen stark wäre. Vielleicht wären die grundlegenden Ansätze von *De Revolutionibus*

verworfen worden. Doch um 1633 war dies nicht der Fall. Während der ersten Jahrzehnte des 17. Jahrhunderts wurden neue und stärkere Hinweise entdeckt, der Charakter des Kampfes änderte sich. Selbst vor dem Widerruf Galileis hatten die neuen Hinweise den Widerstand gegen Kopernikus zu einer hoffnungslosen Nachhutaktion gemacht. Der Rest dieses Kapitels beschreibt die neuen Entdeckungen von drei unmittelbaren Nachfolgern von Kopernikus.

### *Tycho Brahe*

Wenn Kopernikus der größte europäische Astronom in der ersten Hälfte des 16. Jahrhunderts war, so war Tycho Brahe (1546–1601) die herausragende astronomische Persönlichkeit der zweiten Hälfte. An rein technischen Fähigkeiten gemessen war Brahe der größere. Doch ein Vergleich ist weitgehend sinnlos, weil beide verschiedene Stärken und Schwächen hatten, die sich nicht leicht in eine einzige Persönlichkeit pressen lassen; beider Vorzüge waren für die kopernikanische Revolution wesentlich. Brahes Denken war noch stark der Tradition verhaftet. Sein Werk zeigt wenig von dem neuplatonischen Bemühen um mathematische Harmonien, das für Kopernikus zum Bruch mit der ptolemäischen Tradition führte und am Anfang den einzigen echten Hinweis auf die Erdbewegung gab. Er schlug in der astronomischen Theorie keine Neuerungen von bleibender Bedeutung vor, im Gegenteil war er sein Leben lang ein Gegner der kopernikanischen Anschauung, sein ungeheures Ansehen half, die Bekehrung der Astronomen zur neuen Theorie zu verzögern.

Wenn auch Brahe keine neuen astronomischen Konzepte schuf, so brachte er doch einen beträchtlichen Fortschritt in den astronomischen Beobachtungstechniken und in den Genauigkeitsansprüchen für die astronomischen Daten. Von allen, die mit freiem Auge beobachten, war er der größte. Er entwarf und baute zahlreiche neue Instrumente, größer, stabiler und genauer als die bisher benutzten. Mit großem Scharfsinn erforschte und korrigierte er Fehler, die bei der Verwendung dieser Instrumente entstanden, und etablierte eine ganze Reihe neuer Techniken zur Sammlung genauer Information über die Position von Planeten und Sternen. Am bedeutendsten aber war, daß er regelmäßige Beobachtungen der Planeten begann, statt sie nur in besonders günstigen Konfigurationen zu beobachten. Moderne Teleskopbeobachtungen zeigen, daß Brahe die Position eines Fixsternes, wenn er besondere Sorgfalt aufwandte, auf eine Bogenminute oder noch

besser bestimmen konnte, eine erstaunliche Leistung für das freie Auge. Seine Beobachtungen der Planetenpositionen scheinen gewöhnlich etwa auf 4 Bogenminuten verlässlich zu sein, zweimal die Genauigkeit, die die Beobachter der Antike erreichten. Doch noch wichtiger als die Genauigkeit der einzelnen Beobachtungen war die Verlässlichkeit und der Umfang seiner Datensammlung. Er und die von ihm geschulten Beobachter befreiten die europäische Astronomie von ihrer Abhängigkeit von antiken Daten und eliminierten eine ganze Reihe von astronomischen Scheinproblemen, die aus schlechten Daten entsprungen waren. Seine Beobachtungen boten eine neue Basis für das Planetenproblem, sie waren eine Voraussetzung für dessen Lösung. Keine Theorie der Planeten hätte die Daten erklären können, die Kopernikus zur Verfügung standen.

Vertrauenswürdige, umfangreiche und aktuelle Daten sind der Hauptbeitrag Brahes zur Lösung des Planetenproblems. Doch spielte er noch eine andere und bedeutendere Rolle in der kopernikanischen Revolution: er war Urheber eines astronomischen Systems, das rasch das ptolemäische System verdrängte und zum Sammelpunkt aller Astronomen wurde, die wie Brahe selbst die Erdbewegung nicht akzeptieren konnten. Die meisten Gründe Brahes, den kopernikanischen Vorschlag zurückzuweisen, sind die üblichen, obwohl er sie weiter ausgearbeitet hat als die meisten seiner Zeitgenossen. Brahe schenkte jedoch dem ungeheuren leeren Raum, den die kopernikanische Theorie zwischen der Kugel des Saturn und der Sterne bloß zur Erklärung des Fehlens beobachtbarer parallaktischer Bewegung eingeführt hatte, besondere Beachtung. Er selbst hatte mit seinem neuen großen Instrument nach der Parallaxe gesucht; da er sie nicht fand, sah er sich gezwungen, die Erdbewegung zu verwerfen. Die einzige Alternative, die mit seinen Beobachtungen verträglich war, hätte eine Distanz zwischen der Sternenkugel und Saturn gefordert, die das siebenhundertfache der Distanz zwischen Saturn und der Sonne war.

Obwohl Brahe die Erdbewegung ablehnte, konnte er nicht die mathematischen Harmonien ignorieren, die durch *De Revolutionibus* in die Astronomie eingeführt worden waren. Diese Harmonien bekehrten ihn nicht. Für ihn waren sie kein hinreichend starkes Argument, um die Schwierigkeiten, die die Erdbewegung mit sich brachte, auszugleichen. Doch müssen sie seine Unzufriedenheit mit dem ptolemäischen System verstärkt haben, denn er verwarf es ebenfalls, allerdings zugunsten eines dritten Systems eigener Erfundung. Das Brahesche System, das „Tychonische“, ist in Bild 37 gezeigt. Wiederum liegt die Erde im geometrischen Mittelpunkt einer Sternenkugel stationär, deren tägliche Drehung den Tagenkreisen der Sterne

entspricht. Wie im ptolemäischen System werden Sonne, Mond und Planeten jeden Tag in westlicher Richtung mit den Sternen der äußeren Kugel mitgeführt, sie haben aber zusätzliche eigene Bahnbewegungen (durch Kreise dargestellt), obwohl im vollständigen tychonischen System kleinere Epizykel, Exzenter und Äquanten ebenfalls gebraucht werden. Die Kreise von Mond und Sonne haben die Erde zum Mittelpunkt; bis hieher ist das System noch ptolemäisch. Die Zentren der fünf restlichen Planetenbahnen werden aber von der Erde auf die Sonne verschoben. Brahes System ist eine vielleicht unbewußte Erweiterung des Systems von Heraklid, der Merkur und Venus sonnenzentrierte Bahnen zugeschrieben hat.

Es ist bemerkenswert und historisch wichtig, daß das tychonische System eine adäquate Kompromißlösung der Probleme darstellte, die von *De Revolutionibus* aufgeworfen worden waren. Da die Erde im Mittelpunkt ruht, fallen alle Argumente gegen Kopernikus weg. Die Bibel, die Bewegungsgesetze und das Fehlen einer Sternparallaxe sind alle von Brahes Vorschlag berücksichtigt. Dies wird ohne Opferung irgendeiner von Kopernikus' wesentlichen mathematischen Harmonien erreicht. In der Tat ist das tychonische System dem kopernikanischen in mathematischer Hinsicht vollkommen äquivalent. Entfernungsbestimmung, die scheinbaren Anomalien im Verhalten der inneren Planeten, diese und noch andere neue Harmonien, die Kopernikus von der Erdbewegung überzeugt hatten, gelten alle weiterhin.

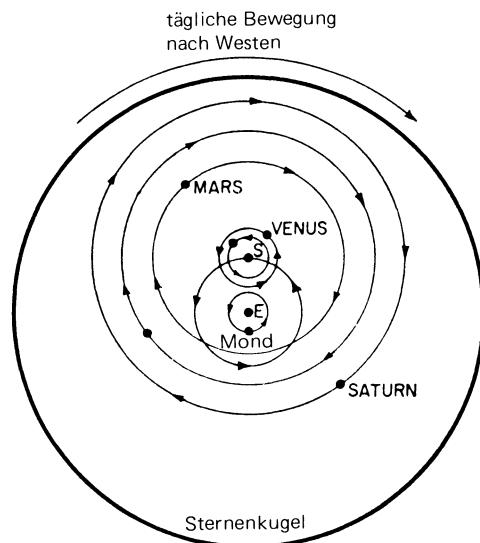
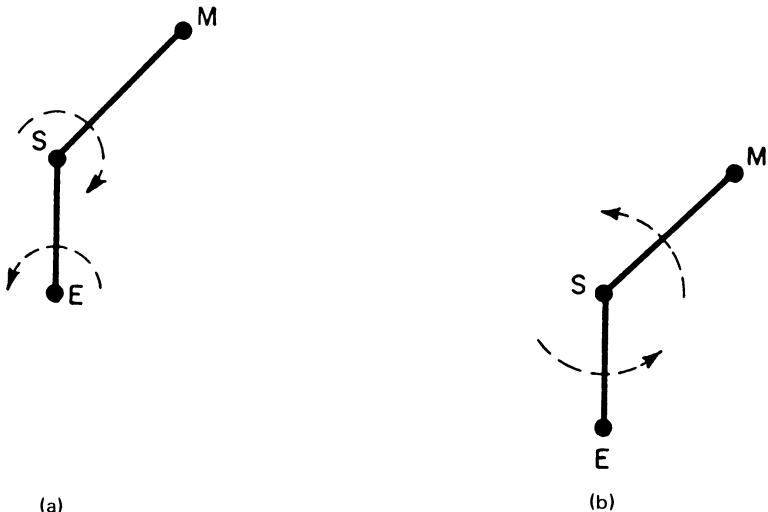


Bild 37

*Das tychonische System. Die Erde steht wieder im Mittelpunkt der rotierenden Sternkugel, Sonne und Mond bewegen sich auf ihren alten ptolemäischen Bahnen. Die anderen Planeten sind jedoch auf Epizykeln fixiert, deren gemeinsamer Mittelpunkt die Sonne ist.*



**Bild 38** Geometrische Gleichwertigkeit des (a) tychonischen und des (b) kopernikanischen Systems. In (a) wird die Sonne S von der starren Verbindung ES in östlicher Richtung um die ruhende Erde E geführt, gleichzeitig wird Mars M in westlicher Richtung von dem Hebel SM um die Sonne geführt. Da ES schneller als SM rotiert, ergibt sich für Mars eine Gesamtbewegung nach Osten außer in den kurzen Intervallen, wenn SM ES überstreicht. In (b) rotieren dieselben Zeiger um die feste Sonne, die relativen Lagen von E, S und M sind in beiden Darstellungen stets gleich. Man beachte, daß in (b) der Winkel ESM abnehmen muß, da ES schneller um die Sonne rotiert als SM.

Die Harmonien des tychonischen Systems können mit denselben Hilfsmitteln wie bei der Diskussion des kopernikanischen Systems einzeln und vollständig entwickelt werden, doch für unseren Zweck soll die folgende gekürzte Demonstration der Äquivalenz beider Systeme ausreichend sein. Man stelle sich die Sternenkugel in Bild 37 ungeheuer groß vor, so daß ein Beobachter auf der bewegten Sonne keine Sternparallaxe mehr beobachten könnte; dies hat keinerlei Einfluß auf die mathematische Beschreibung der Planetenbewegungen. Nun stelle man sich vor, daß die verschiedenen Planeten auf ihren Bahnen durch Uhrwerke angetrieben werden, wie sie in Bild 38a für die Erde, die Sonne und den Mars schematisch angedeutet sind. In der Zeichnung ist die Sonne durch einen Arm fixer Länge mit der zentralen Erde verbunden, der sie gegen den Uhrzeigersinn um die Erde bewegt, Mars ist durch einen anderen Arm fixer Länge mit der Sonne verbunden, der ihn im

Uhrzeigersinn um die bewegte Sonne führt. Da die Längen beider Arme während der Bewegung konstant sind, wird der Uhrwerksmechanismus gerade die in Bild 37 angedeuteten Kreisbahnen hervorrufen.

Man stelle sich nun vor, daß ohne Eingriff in den Mechanismus die Sonne statt der Erde im Mittelpunkt festgehalten wird. Diese Situation ist in Bild 38b dargestellt. Die Zeiger haben dieselben Längen wie zuvor. Sie werden vom selben Werk mit denselben Geschwindigkeiten angetrieben und sie behalten daher dieselben relativen Abstände zu jedem Zeitpunkt. Alle geometrischen Beziehungen zwischen Erde, Sonne und Mars in der Zeichnung von Bild 38a gelten auch für die Anordnung von Bild 38b; da nur der Fixpunkt des Mechanismus geändert wurde, müssen alle Relativbewegungen gleich bleiben.

Die vom Mechanismus (Bild 38b) erzeugten Bewegungen sind jedoch kopernikanische Bewegungen. Die Zeiger fester Länge bewegen in dem zweiten Diagramm Erde und Mars wie bei Kopernikus auf Kreisbahnen um die Sonne. Es wird also das tychonische System einfach dadurch zum kopernikanischen, daß man die Sonne statt der Erde festhält. Die Relativbewegungen der Planeten sind in beiden Systemen gleich, die Harmonien daher weiterhin gültig. In mathematischer Hinsicht ist der einzige mögliche Unterschied zwischen den beiden Systemen eine parallaktische Bewegung der Sterne, doch haben wir diese Bewegung am Anfang durch das Ausdehnen der Sternenkugel bis zum Verschwinden der Parallaxe eliminiert.

Das tychonische System hat seine eigenen Schwierigkeiten: Die meisten Planeten sind weit vom Mittelpunkt entfernt. Das geometrische Zentrum des Universums ist nicht länger der Mittelpunkt der meisten Himmelsbewegungen; man kann sich nur schwer einen physikalischen Mechanismus vorstellen, der Planetenbewegungen wie bei Brahe auch nur angenähert hervorufen sollte. Daher konnte das tychonische System jene wenigen Neuplatoniker, etwa Kepler, nicht für sich gewinnen, die wegen seiner großen Symmetrie am kopernikanischen System Gefallen gefunden hatten. Doch überzeugte es die meisten anderen Astronomen jener Zeit, weil es einen Ausweg aus einem allgemein gefühlten Dilemma bot. Es erhielt die mathematischen Vorteile des kopernikanischen Systems ohne dessen physikalischen, kosmologischen und theologischen Nachteile. Darin liegt die wahre Bedeutung des tychonischen Systems. Es war ein fast perfekter Kompromiß, es scheint seine Existenz einem allgemeinen Bedürfnis nach einem solchen Kompromiß zu verdanken. Das tychonische System, dem sich fast alle ptolemäischen Astronomen des 17. Jahrhunderts anschlossen, scheint ein unmittelbares Nebenprodukt von *De Revolutionibus* zu sein.

Brahe selbst hätte dies geleugnet. Er behauptete, daß er in seinem System nichts von Kopernikus übernommen hätte, doch kann er sich kaum des Druckes bewußt gewesen sein, der auf ihm und seinen Zeitgenossen lastete. Sicherlich studierte er sowohl die ptolemäische, als auch die koper-nikanische Astronomie gründlich, bevor er an sein eigenes System dachte, und er war sich sicherlich bewußt, welche Probleme sein eigenes System lösen sollte. Der sofortige Erfolg des Systems zeigt die Bedeutung und die allge-meine Anerkennung der Dringlichkeit des Problems. Daß noch zwei andere Astronomen mit Brahe um die Priorität stritten und behaupteten, selbst ähnliche Lösungen gefunden zu haben, beweist die Rolle von *De Revolutionibus* bei der Geburt des tychonischen Systems. Brahe gibt mit seinem System das erste Beispiel für eine der wesentlichen Folgerungen, die das letzte Kapitel beschlossen: *De Revolutionibus* änderte den Zustand der Astronomie, indem es allen Astronomen neue Probleme stellte.

Brahes Kritik an Kopernikus und seine Kompromißlösung des Planeten-problems zeigen, daß er wie die meisten Astronomen seiner Zeit nicht im-stande war, mit traditionellen Gedankengängen zu brechen. Unter Koper-nikus' Nachfolgern gehört Brahe zu den Konservativen, doch die Wirkung seines Werkes war nicht konservativ. Im Gegenteil – das System und die Beobachtungen Brahes zwangen seine Nachfolger, wichtige Aspekte des aristotelisch-ptolemäischen Universums zu verwerfen, und trieb sie langsam in das Lager der Kopernikaner. Zunächst half das Brahesche System, die Astronomen mit den mathematischen Problemen der koper-nikanischen Astronomie vertraut zu machen, in geometrischer Hinsicht waren ja beide Systeme identisch. Noch wichtiger war jedoch, daß Brahes System aufgrund seiner Kometenbeobachtungen, die wir noch besprechen werden, seine Nach-folger zwang, die kristallinen Sphären aufzugeben, die in der Vergangenheit die Planeten auf ihren Bahnen geführt hatten. Im tychonischen System (siehe Bild 37) schneidet die Marsbahn die Bahn der Sonne. Daher können Mars und Sonne nicht in Sphären eingebettet sein, die sie herumbewegen, denn die beiden Sphären müßten sich durchdringen und sich beständig im Wege sein. In ähnlicher Weise schneidet die Sonnensphäre die Sphären von Merkur und Venus. Mit der Ablehnung kristalliner Sphären wird man noch nicht zum Kopernikaner, hatte doch Kopernikus selbst Sphären zur Beschrei-bung der Planetenbahnen verwendet. Sphären waren aber auch ein wesent-licher Bestandteil der aristotelischen kosmologischen Tradition gewesen, die die Hauptbarriere für den Erfolg von Kopernikus war. Jeder Bruch mit der Tradition wirkte zugunsten von Kopernikus. Das tychonische System war trotz seiner traditionellen Elemente ein wesentlicher Bruch.

Brahes geschickte Beobachtungen waren noch wichtiger als sein System, um seine Zeitgenossen zu einer neuen Kosmologie zu führen. Sie schufen die Basis für Keplers Werk, der Kopernikus' Idee zur ersten echten Lösung des Planetenproblems vollendete. Doch selbst bevor die neuen Daten, die Brahe gesammelt hatte, zur Revision des kopernikanischen Systems verwendet wurden, zeigten sie die Notwendigkeit einer weiteren Abweichung von der klassischen Kosmologie, – sie stellten die Unwandelbarkeit der Himmel infrage. Gegen Ende des Jahres 1572, als Brahe noch am Beginn seiner Laufbahn als Astronom stand, erschien ein neuer Himmelskörper im Sternbild Cassiopeia. Bei seiner ersten Beobachtung war er sehr strahlend, so hell wie Venus zum Zeitpunkt ihrer größten Helligkeit. Im Laufe der nächsten 18 Monate wurde der neue Himmelsbewohner langsam schwächer, schließlich verschwand er gänzlich zu Jahresbeginn 1574. Von Anfang an zog der neue Stern das Interesse von Wissenschaftlern und Laien in ganz Europa auf sich. Er konnte kein Komet sein, denn er hatte keinen Schweif und stand stets an derselben Stelle. Sicherlich war er ein schlechtes Vorzeichen. Die Astrologen entfalteten fieberhafte Tätigkeit. Auch die Astronomen konzentrierten ihre Beobachtungen und Veröffentlichungen auf den „neuen Stern“ am Himmel.

Das Wort „Stern“ ist der Schlüssel zur astronomischen und kosmologischen Bedeutung der neuen Erscheinung. Wenn sie ein Stern wäre, dann hätten sich die unveränderbaren Himmel doch verändert, der grundlegende Unterschied zwischen der superlunaren Region und der vergänglichen Erde wäre erschüttert. Wenn die Erscheinung ein Stern wäre, dann könnte die Erde leichter als Planet begriffen werden, denn der vergängliche Charakter irdischer Affären wäre somit auch am Himmel entdeckt. Brahe und seine fähigsten Kollegen schlossen, daß der Neuling ein Stern war. Beobachtungen, wie die in Bild 39 gezeigte, ergaben, daß die neue Erscheinung nicht unter der Sphäre des Mondes und auch nicht knapp über der sublunaren Region liegen konnte. Vermutlich gehörte sie zu den Sternen, denn man beobachtete, wie sie sich mit ihnen bewegte. Ein weiterer Grund gegen die bestehende Kosmologie war damit gefunden.

Die Entdeckung der Veränderlichkeit der Himmel im 16. Jahrhundert wäre möglicherweise eher wirkungslos geblieben, wäre der einzige Hinweis auf Veränderungen im Bereich außerhalb des Mondes nur von dem neuen Stern, der Nova des Jahres 1572, gekommen. Dies war ein vorübergehendes Phänomen; man konnte jenen nicht widersprechen, die Brahes Daten nicht glaubten; zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der Daten war der Stern bereits verschwunden. Man konnte immer einige weniger sorgfältige Beob-

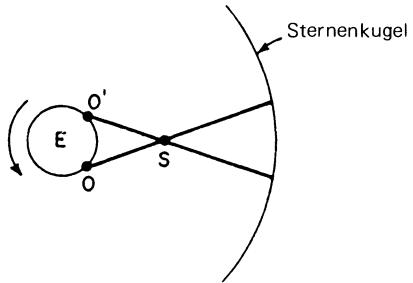


Bild 39

Tägliche Parallaxe eines nahen Himmelskörpers. Befindet sich S zwischen der Erde und der Sternkugel, sollte S für verschiedene irdische Beobachter O und O' gegen die Sterne gesehen an verschiedenen Orten erscheinen. Man braucht keine zwei Beobachter, die Erdrotation bringt den Beobachter in z. B. 6 Stunden von O nach O'. Daher scheint S seinen Ort ständig zu verändern und erst nach 24 Stunden an die ursprüngliche Stelle zurückzukehren. Wäre S so nahe wie der Mond, betrüge diese scheinbare Verschiebung in 6 Stunden fast genau 1 Grad. Weiter entfernte Körper zeigen weniger Verschiebung.

Mit modernen Instrumenten kann man mit dieser Methode den Abstand von Mond und Planeten messen, Beobachtungen mit freiem Auge sind dafür nicht genau genug. Die Größe des Mondes und seine rasche Bahnbewegung verschleieren den parallaktischen Effekt, die Planeten sind zu weit entfernt.

achter finden, die eine ausreichende Parallaxe beobachtet hatten, um die Nova in den Raum innerhalb der Mondbahn zu plazieren. Doch glücklicherweise boten Kometen, die Brahe sorgfältig in den Jahren 1577, 1580, 1585, 1590, 1593 und 1596 beobachtete, immer wieder weitere Hinweise auf Veränderungen im Bereich außerhalb des Mondes. Wiederum konnte keine meßbare Parallaxe beobachtet werden. Auch die Kometen befanden sich außerhalb der Sphäre des Mondes, wo sie sich durch die Region bewegten, die früher durch die kristallinen Sphären erfüllt war.

Brahes Diskussion der Kometen konnte ähnlich seinen Beobachtungen der Nova nicht alle Zeitgenossen überzeugen. In den ersten Jahrzehnten des 17. Jahrhunderts wurde Brahe häufig von Leuten angegriffen – gelegentlich mit derselben Heftigkeit wie Kopernikus –, die der Meinung waren, daß auf Grund anderer Daten Kometen und Novae sublunare Erscheinungen wären und die Unverletzlichkeit der Himmel daher weiterhin gelte. Brahe konnte

trotzdem zahlreiche Astronomen von einem grundlegenden Fehler in der aristotelischen Weltsicht überzeugen und – was noch wichtiger war – er gab Skeptikern die Mittel in die Hand, mit denen sie seine Schlüsse überprüfen konnten. Kometen, hell genug, um mit dem freien Auge gesehen zu werden, erscheinen alle paar Jahre. Nachdem ihre Zugehörigkeit zum Bereich außerhalb des Mondes aus Beobachtungen gefolgert und allgemein diskutiert worden war, konnte der Hinweis, den die Kometen für die Wandelbarkeit der Himmel gaben, nicht auf ewig ignoriert werden. Wieder einmal war die kopernikanische Richtung der Gewinner.

Dabei waren nicht einmal Brahes feine Instrumente zur Entdeckung notwendig, daß Novae und Kometen zum Raum außerhalb des Mondes gehörten. Eine parallaktische Verschiebung von einem Grad wäre ohne jene Instrumente bereits meßbar gewesen, etliche von Brahes Zeitgenossen kamen bezüglich der Kometen zur selben Schlußfolgerung, indem sie Instrumente benützten, die seit Jahrhunderten bekannt waren. Der Kopernikaner Mästlin brauchte bloß ein Stück Faden, um festzustellen, daß die Nova von 1572 weiter entfernt war als der Mond. Kurz gesagt, die Entdeckungen, mit denen Brahe und seine Zeitgenossen den Niedergang der traditionellen Kosmologie und den Aufstieg der kopernikanischen Lehre beschleunigten, hätten zu jeder Zeit seit der Antike gemacht werden können. Die Erscheinungen und die erforderlichen Instrumente waren seit 2000 Jahren vorhanden, und doch wurden die Beobachtungen entweder nicht gemacht oder nicht allgemein zur Kenntnis genommen. In der letzten Hälfte des 16. Jahrhunderts wandelten altbekannte Erscheinungen rapide ihre Bedeutung. Diese Verwandlungen scheinen unverständlich, wenn man nicht die neue Form wissenschaftlichen Denkens zur Kenntnis nimmt, die in Kopernikus ihren ersten bedeutenden Vertreter fand. Wie am Ende des letzten Kapitels betont, zeigt *De Revolutionibus* einen Wendepunkt an, es gab von da keinen Weg zurück.

### *Johannes Kepler*

Wie Brahes Werk zeigt, sahen selbst die Gegner der kopernikanischen Lehre, zumindest die fähigsten und aufrichtigsten unter ihnen, die Notwendigkeit umfassender Reformen in Astronomie und Kosmologie. Ob sie nun mit Kopernikus übereinstimmten oder nicht, er hatte ihr Gebiet verändert. Das Werk eines Antikopernikaners wie Brahe zeigt jedoch nicht das Ausmaß dieser Veränderungen. Einen besseren Hinweis auf die neuen Probleme, die sich nach Kopernikus' Tod der Astronomie boten, bietet die Forschung

von Brahes berühmtestem Kollegen, Johannes Kepler (1573–1630). Er scheint als Student an der Universität Tübingen von Mästlin mit Kopernikus' System vertraut gemacht worden zu sein. Sein Glaube daran geriet nie ins Wanken, immer wieder verwies er in den schwärmerischen Tönen, die für den Neuplatonismus der Renaissance charakteristisch waren, auf die großartige Rolle, die Kopernikus der Sonne zugeteilt hatte. Sein erstes wichtiges Buch, das *Kosmographische Mysterium* aus dem Jahre 1596, begann mit einer langen Verteidigung des kopernikanischen Systems, in der er all jene Argumente über die Harmonie betont, die wir in Kapitel 5 diskutierten; und indem er zahlreiche neue hinzufügt, erklärt er, warum der Epizykel des Mars so viel größer als der des Jupiter und der des Jupiter größer als der des Saturn gewesen waren; warum nach der heliozentrischen Astronomie von allen himmlischen Wandelsternen nur Sonne und Mond keine rückläufige Bewegung zeigen; und so weiter. Keplers Argumente sind die gleichen wie die von Kopernikus, doch Kepler entwickelt im Gegensatz zu Kopernikus die Beweise ausführlich und mit genauen Diagrammen. Erstmals wurde die Kraft der mathematischen Argumente, die für die neue Astronomie sprachen, deutlich.

Obwohl Kepler zwar voll des Lobes für die Vorstellung eines heliozentrischen Planetensystems war, stand er doch dem speziellen mathematischen System, das Kopernikus entwickelt hatte, ziemlich kritisch gegenüber. Immer wieder betonte er in seinen Aufsätzen, daß Kopernikus seinen eigenen Ideen nicht vollständig gefolgt sei, und daß er sich nach dem ersten großen Schritt, der Vertauschung der Rollen von Sonne und Erde, bei der Entwicklung der Details seines Systems zu eng an Ptolemäus gehalten hätte. Kepler war sich der unpassenden archaischen Überreste in *De Revolutionibus* wohl bewußt. Er unternahm es, sie dadurch zu eliminieren, daß er die neue Rolle der Erde als Planet, die wie die anderen Planeten von der Sonne gelenkt wurde, vollständig ausnützte.

Kopernikus hatte es nicht geschafft, die Erde wie jeden anderen Planeten im heliozentrischen System zu behandeln. Im Gegensatz zur qualitativen Beschreibung im ersten Buch von *De Revolutionibus* wies die mathematische Beschreibung des Planetensystems in den späteren Büchern der Erde einige besondere Aufgaben zu. Zum Beispiel waren im ptolemäischen System die Ebenen aller Planetenbahnen so konstruiert gewesen, daß sie sich im Erdmittelpunkt schnitten. Kopernikus modifizierte diese Funktion der Erde, indem er alle Bahnebenen so zog, daß sie sich im Mittelpunkt der Erdbahn schnitten. Kepler bestand jedoch darauf, daß sich die Bahnebenen in der Sonne schneiden müßten, da die Sonne die Planeten lenkte und die

Erde keine besondere Rolle spielte. Er formte also das kopernikanische System entsprechend um und erzielte den ersten wesentlichen Fortschritt seit Ptolemäus bei dem Problem, die Abweichungen der Planeten von der Ekliptik nach Norden und Süden zu erklären. Kepler hatte das mathematische System des Kopernikus durch strikte Anwendung der kopernikanischen Vorstellungen verbessert.

Ein ähnliches Beharren auf der Gleichberechtigung der Planeten erlaubte Kepler, zahlreiche Scheinprobleme auszuschalten, die Kopernikus' Leistung verdunkelt hatten. So hatte etwa Kopernikus geglaubt, daß sich die Exzentrizitäten von Merkur und Venus langsam veränderten, er hatte seinem System deshalb weitere Kreise hinzugefügt. Kepler wies nach, daß dies bloß einem Mangel in der kopernikanischen Definition der Exzentrizität entsprang. In *De Revolutionibus* wurde die Exzentrizität der Erdbahn von der Sonne gemessen (das ist der Abstand  $SO_E$  in Bild 34a, während die Exzentrizitäten aller anderen Bahnen vom Mittelpunkt der Erdbahn aus gemessen wurden (die Marsexzentrizität ist die Strecke  $O_E O_M$  in Bild 34b)). Kepler bestand darauf, daß alle Exzentrizitäten der Planetenbahnen in einem kopernikanischen Universum in der gleichen Weise, nämlich in bezug auf die Sonne berechnet werden müßten. Als die neue Methode angewendet wurde, verschwanden einige scheinbare Variationen der Exzentrizität, die Anzahl der zur Berechnung erforderlichen Kreise wurde reduziert.

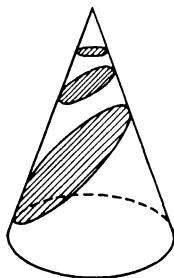
Jedes dieser Beispiele zeigt das Bemühen Keplers, die übermäßig an Ptolemäus orientierten mathematischen Verfahren von Kopernikus der kopernikanischen Vorstellung eines heliozentrischen Universums anzupassen. Dadurch löste Kepler schließlich das Planetenproblem, wobei er Kopernikus' umständliches System in ein überaus einfaches und genaues Verfahren zur Berechnung der Planetenörter umwandelte. Seine wesentlichsten Entdeckungen machte er beim Studium der Bewegung des Mars, dessen exzentrische Bahn und Erdnähe Unregelmäßigkeiten hervorruften, die schon immer die Erfindungsgabe mathematischer Astronomen herausgefordert hatten. Ptolemäus war nicht imstande gewesen, diese Bewegung genauso gut wie die anderer Planeten zu beschreiben, Kopernikus hatte Ptolemäus dabei nicht verbessert. Brahe hatte eine neue Lösung versucht, er unternahm eine lange Reihe von Beobachtungen ausschließlich für diesen Zweck, doch gab er das Problem auf, als er die Schwierigkeiten erkannte. Kepler hatte während Brahes letzten Lebensjahren mit ihm gearbeitet, er erbte die neuen Beobachtungen und griff in den Jahren nach Brahes Tod das Problem selbst auf.

Fast 10 Jahre war Kepler nahezu ausschließlich damit beschäftigt. Zwei Bahnen mußten bestimmt werden: die Marsbahn und die Erdbahn,

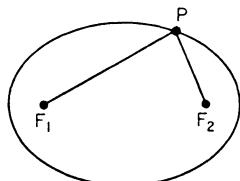
von der die Marsbahn beobachtet wird. Immer wieder mußte Kepler die Kombination von Kreisen ändern, die er bei der Berechnung dieser Bahnen verwendete. System nach System wurde ausprobiert und verworfen, da sie mit Brahes ausgezeichneten Beobachtungen nicht übereinstimmten. Alle seine Zwischenlösungen waren besser als die Systeme von Ptolemäus und Kopernikus. Einige ergaben Fehler von weniger als 8 Bogenminuten, was der Genauigkeit antiker Beobachtungen entsprach. Die meisten von Kepler verworfenen Systeme hätten alle früheren Astronomen befriedigt. Doch nach Brahe, dessen Daten auf 4 Bogenminuten genau waren, war dies nicht mehr möglich. Kepler sagte, Gottes Güte hätte uns in Tycho Brahe einen äußerst fruchtbaren Beobachter geschenkt, und deshalb müßten wir in Dankbarkeit von diesem Geschenk Gebrauch machen, um die wahren Himmelsbewegungen zu finden.

Eine lange Reihe erfolgloser Versuche zwang Kepler zum Schluß, daß kein System kombinierter Kreise das Problem lösen würde. Er dachte, irgend eine andere geometrische Figur müßte den Schlüssel enthalten. Daher versuchte er verschiedene Arten von Ovalen, doch konnte keine die Diskrepanzen zwischen seinem Versuch und der Beobachtung eliminieren. Als er dann zufällig sah, daß die Diskrepanzen selbst in einer vertrauten mathematischen Form variierten, entdeckte er, daß Theorie und Beobachtungen übereinstimmen würden, wenn sich die Planeten nach einem einfachen Gesetz, das er auch angeben konnte, auf elliptischen Bahnen mit variablen Geschwindigkeiten bewegten. Diese Resultate kündigte Kepler in seinem Buch *Über die Bewegung des Mars* an, das erstmals in Prag 1609 erschien. Eine mathematische Methode, einfacher als jede andere seit Appollonius und Hipparch, gab die besten, jemals getroffenen Vorhersagen. Das Planetenproblem hatte schließlich eine Lösung gefunden, es wurde im Rahmen eines kopernikanischen Universums gelöst.

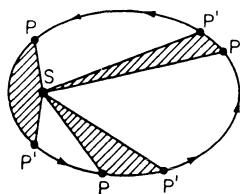
Die beiden Gesetze, die Keplers (und unsere) endgültige Lösung für das Problem der Planeten bilden, sind im Detail in Bild 40 beschrieben. Die Planeten bewegen sich auf einfachen elliptischen Bahnen, die Sonne sitzt in einem der beiden Brennpunkte jeder Bahnellipse: dies ist Keplers erstes Gesetz. Sein zweites Gesetz vervollständigt die Beschreibung: Die Geschwindigkeit jedes Planeten in seiner Umlaufbahn verändert sich so, daß eine Linie von der Sonne zum Planeten in gleichen Zeitintervallen gleiche Flächen der Ellipse überstreicht. Wenn Ellipsen die Kreisbahnen von Ptolemäus und Kopernikus ersetzen und das Gesetz gleicher Flächen an die Stelle des Gesetzes der gleichförmigen Drehung um einen ausgezeichneten Punkt tritt, endet jede Notwendigkeit für Exzenter, Epizykeln, Äquanten und andere



(a)



(b)



(c)

Bild 40

*Keplers erstes und zweites Gesetz (a) und (b) definieren die Ellipse, auf der sich nach Keplers erstem Gesetz alle Planeten bewegen müssen. In (a) ist die Ellipse als diejenige geschlossene Kurve dargestellt, in der eine Ebene einen Kegel schneidet. Wenn die Ebene zur Kegelachse senkrecht steht, ist der Schnitt ein Kreis, wenn die Ebene geneigt wird, ergeben sich immer längere Ellipsen.*

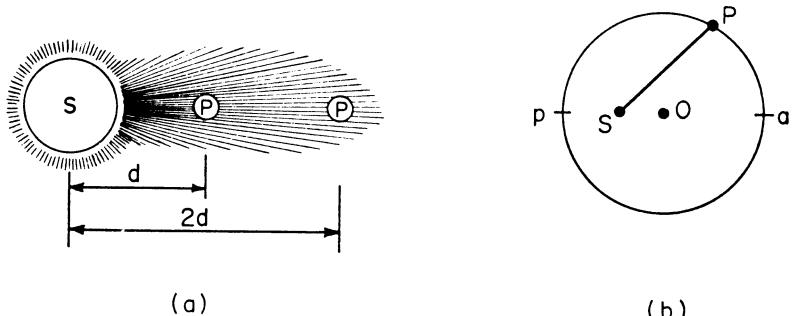
*Eine andere Definition der Ellipse ist in (b) gegeben. Werden die beiden Enden eines Fadens in den Punkten  $F_1$  und  $F_2$  einer Ebene befestigt und wird ein Bleistift an dem gespannten Faden entlang geführt, erzeugt die Bleistiftspitze eine Ellipse. Eine Änderung der Fadellänge oder des Abstands der Brennpunkte  $F_1$  und  $F_2$  verändert die Form der Ellipse. Die meisten Planetenbahnen sind fast kreisförmig, die Brennpunkte stehen daher nahe beieinander.*

*(c) illustriert Keplers zweites Gesetz, das die Bahngeschwindigkeit bestimmt. Die Sonne S befindet sich nach dem ersten Gesetz in einem Brennpunkt, ihr Zentrum ist mit einigen Planetenörtern  $P$  und  $P'$  so durch gerade Linien verbunden, daß die drei schraffierten Sektoren  $SPP'$  die gleiche Fläche haben. Nach dem zweiten Gesetz müssen die Planeten die entsprechenden Bögen  $PP'$  in gleichen Zeiten durchlaufen. Daher bewegt sich ein Planet in Sonnennähe schneller als in Sonnenferne.*

*ad hoc* eingeführte Hilfsmittel. Zum ersten Mal reichen eine einzige einfache geometrische Kurve und ein einziges Geschwindigkeitsgesetz für die Vorhersage von Planetenpositionen aus, zum ersten Mal sind die Vorhersagen so genau wie die Beobachtungen.

Das kopernikanische astronomische System, das auf die moderne astronomische Wissenschaft übergegangen ist, ist daher das gemeinsame Werk von Kepler und Kopernikus. Keplers System von sechs Ellipsen vollendete die heliozentrische Astronomie und zeigte gleichzeitig die Ökonomie und die Fruchtbarkeit, die in Kopernikus' Idee enthalten waren. Was war für diesen Übergang des kopernikanischen Systems in seine moderne, Keplersche Gestalt notwendig? Zwei Voraussetzungen für Keplers Werk sind bereits bekannt: Er mußte ein überzeugter Kopernikaner sein, einer, der seine Suche nach besseren Bahnen dadurch begann, daß er die Erde als reinen Planeten behandelte, und der die Ebenen aller Planetenbahnen durch den Mittelpunkt der Sonne legte. Zusätzlich brauchte er Brahes Daten. Die von Kopernikus und seinen Vorläufern verwendeten Daten waren zu sehr mit Fehlern behaftet, als daß sie durch irgendein System einfacher Bahnen erklärt werden konnten, und selbst ohne Fehler hätten sie nicht ausgereicht. Wie Kepler selbst zeigte, könnten weniger genaue Beobachtungen als die Brahes durch ein klassisches System zusammengesetzter Kreise erklärt werden. Der Weg, auf dem Kepler zu seinen berühmten Gesetzen gelangte, hängt jedoch von mehr als der Existenz genauer Daten und seiner Überzeugung vom Planeten Erde ab. Kepler war ein glühender Neuplatoniker. Er glaubte, daß mathematisch einfache Gesetze die Grundlage aller Naturerscheinungen wären und daß die Sonne die physikalische Ursache aller Himmelsbewegungen sei. Sowohl seine bleibenden als auch seine vergänglichsten Beiträge zur Astronomie zeigen diese beiden Züge seines häufig mystischen, neuplatonischen Glaubens.

In einer Passage, die wir am Schluß von Kapitel 4 zitierten, beschrieb Kepler die Sonne als den Körper, der „aufgrund seiner Würde und Kraft als einziger ... würdig ist, der Sitz Gottes zu werden.“ Diese Überzeugung bildete für ihn zusammen mit gewissen, dem tychonischen System anhaftenden Problemen den Grund, es zu verwerfen. Sie spielte bei seiner eigenen Forschung eine ungeheuer wichtige Rolle, besonders bei seiner Ableitung des zweiten Gesetzes, von dem das erste abhängt. In seinen Ursprüngen ist das zweite Gesetz unabhängig von jeder Art von Beobachtung. Es entsprang Keplers physikalischer Intuition, daß die Planeten auf ihren Bahnen durch Strahlen einer bewegenden Kraft, der sogenannten *anima motrix*, geführt würden, die von der Sonne ausgeht. Diese Strahlen müßten nach Kepler auf die Ebene der Ekliptik beschränkt sein, in deren Nähe sich alle Planeten



**Bild 41** Keplers frühestes Geschwindigkeitsgesetz. (a) zeigt, wie typische Strahlen der *anima motrix* aus der Sonne entströmen; (b) zeigt die Anwendung der Vorstellung auf einen Planeten, der sich auf einem Exzenter bewegt.

bewegen. Daher würde die Anzahl der Strahlen, die auf einen Planeten trafen, und die entsprechende Kraft, die den Planeten antreibe, mit zunehmendem Abstand zwischen dem Planeten und der Sonne abnehmen. Bei einer Verdopplung des Abstands von der Sonne würden nur halb so viele Strahlen der *anima motrix* auf einen Planeten treffen (Bild 41a), die Bahngeschwindigkeit des Planeten wäre folglich halb so groß wie im ursprünglichen Abstand von der Sonne. Ein Planet, der sich auf einem exzentrischen Kreis oder einer anderen geschlossenen Kurve um die Sonne  $S$  bewegt (Bild 41b), muß sich mit einer Geschwindigkeit bewegen, die umgekehrt proportional zum Abstand  $SP$  ist. Die Geschwindigkeit wird am größten sein, wenn der Planet im Perihel  $p$  steht, in größter Nähe zur Sonne, und am geringsten im Aphel  $a$ , wo der Planet der Sonne am fernsten ist. Während sich der Planet auf seiner Umlaufbahn bewegt, wird sich seine Geschwindigkeit beständig zwischen diesen Extremen verändern.

Lange bevor Kepler über elliptische Bahnen zu arbeiten begann oder den Flächensatz in seiner vertrauten modernen Form formulierte, hatte er dieses Geschwindigkeitsgesetz der inversen Abstände gefunden, das sowohl das antike Gesetz der gleichmäßigen Kreisbewegung als auch die ptolemäische Variante ersetzen sollte, die gleichförmige Geschwindigkeit bezüglich eines Äquantenpunktes erlaubte. Dieses frühe Geschwindigkeitsgesetz war das Ergebnis einer sonderbaren, von seinen Nachfolgern schnell wieder verworfenen Vorstellung über die Kräfte, die ein heliozentrisches Universum regierten. Außerdem ist diese frühe Form nicht korrekt. Der spätere Flächensatz,

das sogenannte zweite Keplersche Gesetz, ist dem Gesetz der inversen Abstände nicht völlig gleichwertig, der Flächensatz gibt bessere Werte, doch führen beide Formen des Geschwindigkeitsgesetzes bei der Berechnung der Planetenörter auf fast dieselben Vorhersagen. Irrtümlich dachte Kepler, daß die beiden Formen im Prinzip äquivalent wären; er verwendete sie sein Leben lang nebeneinander. Wegen seines visionären Charakters wurde das frühe, neuplatonische Geschwindigkeitsgesetz für Keplers erfolgreiche Forschung besonders wichtig.

Im Gegensatz zu Keplers Ableitung des Geschwindigkeitsgesetzes war sein Werk über die elliptischen Bahnen das Ergebnis einer äußerst genauen und umfangreichen Studie der besten verfügbaren astronomischen Beobachtungen. Versuch nach Versuch mußte verworfen werden, weil sie nach mühevollen Berechnungen nicht den Braheschen Daten entsprachen. Keplers gewissenhafter Versuch, seine berechneten Bahnen den Daten anzupassen, wird oft als frühes Beispiel bester wissenschaftlicher Arbeitsweise angeführt. Doch selbst Keplers erstes Gesetz, das Gesetz der elliptischen Bahnen, wurde nicht nur aus Beobachtung und Berechnung gewonnen. Wenn man nicht in sich geschlossene Planetenbahnen annimmt – was man erst nach Keplers Werk tat –, braucht man ein Geschwindigkeitsgesetz, um die Gestalt der Bahn aus den Daten zu berechnen: Bei der Analyse der Braheschen Beobachtungen benützte Kepler fortgesetzt seinen früheren neuplatonischen Ansatz.

Die Beziehung zwischen Bahn, Geschwindigkeitsgesetz und Beobachtung wurde in unseren früheren Diskussionen der astronomischen Theorie nicht erwähnt, weil antike und mittelalterliche Astronomen von vorn herein ein einfaches Geschwindigkeitsgesetz annahmen: Alle Kreise, die Planeten auf ihren Umlaufbahnen bewegten, sollten bezüglich eines Punktes im oder in der Nähe des Mittelpunktes gleichförmig rotieren. Ohne eine solche Annahme hätten sie keine Bahnbestimmung beginnen können, weder Geschwindigkeitsgesetz noch Bahn können unabhängig von einander aus der Beobachtung abgeleitet oder mit ihr verglichen werden. Als Kepler das antike Gesetz gleichförmiger Bewegung aufgab, mußte er es ersetzen oder völlig auf Planetenberechnungen verzichten. Tatsächlich verwarf er das antike Gesetz erst, nachdem er zuerst sein eigenes entwickelt hatte, ein Gesetz, von dem ihm seine neuplatonische Intuition sagte, daß es besser als sein antiker Vorgänger die Himmelsbewegungen in einem heliozentrischen Universum bestimmen konnte.

Keplers Ableitung des Gesetzes des inversen Abstandes zeigt seinen Glauben an mathematische Harmonien genauso wie den Glauben an die ursächliche Rolle der Sonne. Nachdem er die Vorstellung der *anima motrix*

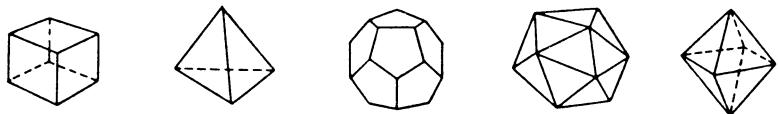
entwickelt hatte, war Kepler überzeugt, daß sie in der einfachsten, mit groben Beobachtungen verträglichen Weise wirksam sein müßte. Er wußte zwar, daß sich die Planeten im Perihel am schnellsten bewegten, doch hatte er nur wenig andere Daten, die außerdem rein qualitativ waren, auf die er das Gesetz des inversen Abstands gründen konnte. Doch sein Glaube an die Harmonie der Zahlen und die Bedeutung seines Glaubens für sein Werk zeigt sich in dem sogenannten dritten Keplerschen Gesetz noch deutlicher, das Kepler 1619 in den *Weltharmonien* verkündete.

Das dritte Gesetz war das erste einer neuen Art astronomischer Gesetze. Das erste und das zweite Gesetz betreffen wie ihre antiken und mittelalterlichen Gegenstücke nur die Bewegungen einzelner Planeten auf ihren Bahnen. Im Gegensatz dazu stellte das dritte Gesetz eine Beziehung zwischen den Geschwindigkeiten der Planeten auf verschiedenen Bahnen her. Wenn  $T_1$  und  $T_2$  die Umlaufdauern zweier Planeten um die Sonne und  $R_1$  und  $R_2$  die entsprechenden mittleren Abstände von der Sonne sind, dann stellt das dritte Gesetz fest, daß das Verhältnis der Quadrate der Umlaufzeiten dem Verhältnis der Kuben der mittleren Abstände gleich ist, oder in Formel  $(T_1/T_2)^2 = (R_1/R_2)^3$ . Dies ist ein faszinierendes Gesetz, denn es weist auf eine früher nie im Planetensystem beobachtete Regelmäßigkeit hin. Doch war dies in Keplers Tagen auch alles. Es änderte nichts an der Planetentheorie, es erlaubte den Astronomen nicht, irgendwelche zuvor unbekannten Größen zu berechnen. Bahnradien und Umlaufdauern waren für jeden Planeten bereits bekannt.

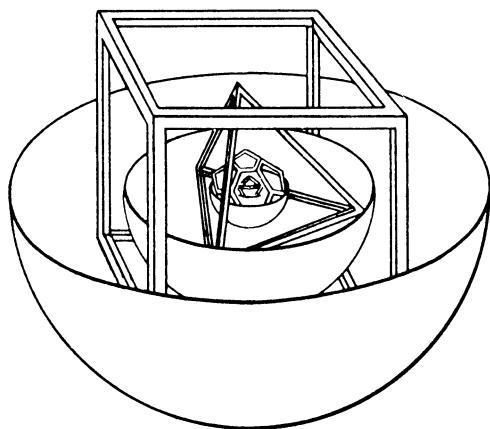
Obwohl es also wenig unmittelbare praktische Bedeutung hatte, gehört das dritte Gesetz gerade zu jenen Gesetzen, die Kepler zeit seines Lebens am meisten beeindruckten. Er war als Mathematiker ein Neuplatoniker oder ein Neupythagoreer, der daran glaubte, daß die gesamte Natur einfache mathematische Regelmäßigkeiten aufzeigte, deren Entdeckung die Aufgabe des Wissenschaftlers sei. Für Kepler und andere seiner Gesinnung war eine einfache mathematische Regelmäßigkeit bereits eine Erklärung. Für ihn erklärte das dritte Gesetz vollständig, warum die Planetenbahnen von Gott gerade so geschaffen worden waren, wie sie existierten. Solche Erklärungen, abgeleitet aus mathematischer Harmonie, suchte Kepler unaufhörlich am Himmel. Er schlug zahlreiche weitere Gesetze einer ähnlichen Art vor, die seither längst verworfen wurden, weil sie trotz ihrer Harmonien nicht hinreichend gut mit der Beobachtung übereinstimmten. Doch Kepler war nicht so kritisch; er dachte, daß er eine große Zahl dieser mathematischen Gesetzmäßigkeiten entdeckt und bewiesen hätte, und diese Gesetze interessierten ihn am meisten.

In Keplers erstem größerem Werk, den *kosmographischen Mysterien* argumentierte er, daß man die Zahl der Planeten und die Größe ihrer Bahnen mit Hilfe einer Relation zwischen den Planetensphären und den fünf regulären oder „kosmischen“ Körpern verstehen könnte. Diese Körper sind in Bild 42a dargestellt, sie sind dadurch eindeutig charakterisiert, daß alle Flächen jedes Körpers identisch sind und daß nur gleichseitige Figuren unter den Flächen vorkommen. Es war in der Antike bewiesen worden, daß es nur fünf solcher Körper gibt: Würfel, Tetraeder, Dodekaeder, Ikosaeder und Oktaeder. Kepler behauptete, daß man die Sphäre des Saturns einem Würfel umschreiben sollte, dem die Jupitersphäre eingeschrieben wäre, darauf sollte ein Tetraeder in die Jupitersphäre eingesetzt werden, dem die Marssphäre eingeschrieben sei und so weiter mit den restlichen drei Körpern und den drei anderen Sphären; denn die relativen Größen aller Sphären würden genau denjenigen entsprechen, die Kopernikus durch Messung bestimmt hatte. Die Konstruktion ist in Bild 42b zu sehen. Da es nur fünf reguläre Körper gibt, erklärt dies nach Kepler, warum es nur sechs Planeten gibt, und warum sie so angeordnet sind, wie man sie vorfindet. Gott ist von Natur Mathematiker.

Keplers Verwendung der regulären Körper war nicht bloß eine jugendliche Verirrung – oder wenn sie es war, wurde er niemals erwachsen. Eine abgewandelte Form erschien 20 Jahre später in seinen *Weltharmonien*, in jenem Buch, in dem das 3. Keplersche Gesetz enthalten ist. Im selben Buch arbeitete Kepler einen Satz neuplatonischer Regeln aus, die die maximale und minimale Bahngeschwindigkeit der Planeten zu den harmonischen Intervallen der Tonleiter in Beziehung setzten. Heute scheint dieser starke Glaube an Zahlenharmonien sonderbar, zum Teil deshalb, weil die Wissenschaftler heute nicht mehr hoffen können, ihre Harmonien so einfach zu formulieren. Keplers Glauben an die Harmonien mag naiv erscheinen, doch unterscheidet er sich nicht wesentlich von den Anschauungen, die die bedeutendsten Forscher unserer Zeit motivieren. Dieselbe wissenschaftliche Einstellung, die sich in den nun verworfenen Keplerschen „Gesetzen“ zeigt, führte ihn zu den drei Gesetzen, die wir heute noch aufrecht erhalten. Beide entsprangen demselben erneuerten Glauben an die Existenz mathematischer Harmonien, der bereits bei Kopernikus eine so große Rolle gespielt hatte, daß er mit der astronomischen Tradition brach, und der ihn überzeugte, daß die Erde in Bewegung sein müsse. Doch ist in Keplers Werk – besonders in den Teilen, die wir nun verworfen haben – der neuplatonische Drang, verborgene mathematische Harmonien zu entdecken, die der Natur vom Schöpfer gegeben worden waren, in einer neueren und reineren Form illustriert.



(a)



(b)

**Bild 42** Keplers Anwendung der fünf regulären Körper. (a) zeigt die Körper; von links nach rechts sind sie: Würfel, Tetraeder, Dodekaeder, Ikosaeder und Oktaeder in der von Kepler zur Beschreibung der Größen der Planetensphären angegebenen Reihenfolge. (b) zeigt das Modell: die Saturnsphäre ist einem Würfel umgeschrieben, die des Jupiter ihm eingeschrieben. Dieser wieder ist das Tetraeder eingeschrieben, usw.

## *Galileo Galilei*

Kepler löste das Problem der Planeten. Zu guter Letzt würde seine Version von Kopernikus' Vorschlag gewiß alle Astronomen zur kopernikanischen Lehre bekehrt haben, besonders als er 1627 die *Rudolfinischen Tafeln* veröffentlichte, die aus seiner neuen Theorie abgeleitet waren und allen zuvor benützten astronomischen Tabellen klar überlegen waren. Die Geschichte der astronomischen Komponenten der kopernikanischen Revolution könnte daher mit dem langsamem Siege von Keplers Werk enden, weil es alle Elemente enthielt, die der Umwälzung in der Astronomie Dauer verleihen konnten. Doch endet die Geschichte noch nicht. 1609 betrachtete der italienische Wissenschaftler Galileo Galilei (1564–1642) als erster den Himmel durch ein Teleskop, er konnte auf diese Weise der Astronomie die ersten völlig neuartigen Daten schenken, die seit der Antike gefunden worden waren.

In Galileis Händen enthüllte das Teleskop zahllose Beweise für die kopernikanische Lehre. Hätte man es bereits früher benützt, die Geschichte der kopernikanischen Revolution wäre völlig anders verlaufen. So trug Galileis astronomisches Werk hauptsächlich zu einer Aufräumaktion bei, durchgeführt, nachdem der Sieg bereits in Sicht war.

1609 war das Teleskop ein neues Instrument, obwohl unklar ist, wie neu es wirklich war. Galilei hörte, daß ein holländischer Linsenschleifer zwei Linsen so angeordnet hatte, daß sie entfernte Objekte vergrößerten. Er versuchte selbst verschiedene Kombinationen und baute rasch ein eigenes Teleskop mit geringer Vergrößerung, dann tat er etwas, was offensichtlich noch niemand zuvor getan hatte. Er richtete sein Glas auf den Himmel, das Resultat war verblüffend. Jede Beobachtung enthüllte neue und unerwartete Objekte. Selbst wenn das Teleskop auf vertraute Himmelsobjekte, Sonne, Mond, Planeten gerichtet wurde, wurden neue Züge dieser alten Freunde entdeckt. Galilei war schon einige Jahre, bevor er das Teleskop baute, ein Anhänger von Kopernikus geworden, er konnte jede neue Entdeckung als Argument für die kopernikanische Lehre deuten.

Die ersten Enthüllungen des Teleskops waren die neuen Welten am Firmament, über die zwei Jahre später Donne Klage führte. Wohin er auch blickte, Galilei fand neue Sterne. Die Milchstraße, die dem bloßen Auge als schwacher Schimmer am Himmel erscheint (man hatte sie häufig als sublunare Erscheinung wie die Kometen oder als Reflexion von gestreutem Sonnen- oder Mondlicht erklärt), wurde nun als gigantische Ansammlung von Sternen erkannt, zu lichtschwach und zu zahlreich, als daß sie vom bloßen

Auge aufgelöst werden könnten. Über Nacht war der Himmel mit zahllosen neuen Bewohnern besiedelt. Die ungeheure Ausdehnung des Universums, vielleicht seine Unendlichkeit, die von einigen Kopernikanern postuliert worden war, schien plötzlich weniger unvorstellbar. Brunos mystische Vision eines Universums, dessen unendliche Ausdehnung und Bevölkerung die unendliche Schöpferkraft der Gottheit verkündete, wurde fast zu einer Sinneswahrnehmung.

Die Beobachtung der Sterne löste eine technische Schwierigkeit, vor der sich die Kopernikaner befanden. Beobachter mit bloßem Auge hatten den Winkeldurchmesser von Sternen geschätzt und mit Hilfe der allgemein anerkannten Größe des Abstandes zwischen der Erde und der Sternenkugel aus dem Winkeldurchmesser auf die Größe der Sterne geschlossen. In einem ptolemäischen Universum hatten diese Schätzungen keine unvernünftigen Resultate ergeben: die Sterne konnten so groß wie die Sonne sein. Doch wie Brahe wiederholt in seinen Angriffen auf die kopernikanische Anschauung betonte, müßten die Sterne unvorstellbar groß sein, wenn das kopernikanische Universum so groß wäre, wie das Fehlen der Sternparallaxe erforderte. Die helleren Sterne müßten nach Brahes Berechnung so groß sein, daß sie die ganze Erdbahn ausfüllen würden; er weigerte sich, dies zu glauben. Doch als das Teleskop zum Himmel gerichtet wurde, erwies sich Brahes Problem als Scheinproblem. Obwohl das Teleskop die Anzahl der am Himmel sichtbaren Sterne ungeheuer vergrößerte, vergrößerte es ihre scheinbare Größe nicht. Im Gegensatz zu Sonne, Mond und den Planeten, die alle durch das Teleskop vergrößert wurden, behielten die Sterne ihre bisherige Größe. Es wurde klar, daß der Winkeldurchmesser der Sterne von der instrumentenlosen Beobachtung beträchtlich überschätzt worden war, ein Fehler, den man heute als Folge von atmosphärischen Turbulenzen erklärt, die das Bild der Sterne verschmieren und im Auge über eine weitere Fläche ausbreiten, als vom ungestörten Bild alleine bedeckt würde. Derselbe Effekt läßt die Sterne blinken, dies wird vom Teleskop zum Großteil unterdrückt, weil es eine größere Zahl von Strahlen für das Auge sammelt.

Die Sterne boten jedoch nicht die einzige, nicht einmal die beste Evidenz für Kopernikus. Als Galilei sein Teleskop zum Mond richtete, fand er, daß dessen Oberfläche von Löchern und Kratern, Bergen und Tälern bedeckt war. Indem er die Länge der Schatten maß, die an Bergen und Kratern zu einer Zeit zu beobachten waren, zu der er die relativen Positionen von Sonne, Mond und Erde kannte, konnte er die Tiefe der Täler und die Höhe der Berge auf dem Mond abschätzen und eine dreidimensionale Beschreibung der Mondoberfläche beginnen. Galilei fand, daß sie nicht sehr

von der Erdoberfläche verschieden wäre. Wie die Messungen der Parallaxe von Kometen weckten daher die teleskopischen Mondbeobachtungen Zweifel an der traditionellen Unterscheidung zwischen den irdischen und den himmlischen Regionen. Diese Zweifel wurden unmittelbar darauf durch die Teleskopbeobachtungen der Sonne verstärkt. Auch sie zeigte Unvollkommenheiten, dunkle Flecken, die sich auf ihrer Oberfläche zeigten und wieder verschwanden. Gerade die Existenz der Sonnenflecken stand im Widerspruch zur Vollkommenheit der himmlischen Region, ihr Erscheinen und Verschwinden verletzte die Unveränderlichkeit des Himmels und, was am allerschlimmsten war, die Bewegung der Flecken über die Sonnenscheibe zeigte, daß die Sonne beständig um ihre eigene Achse rotierte und so ein sichtbares Beispiel für die Erdrotation bot.

Doch dies war noch nicht das Schlimmste. Galilei blickte mit seinem Teleskop zum Jupiter und entdeckte in dessen unmittelbarer Nähe vier kleine Lichtpunkte. Beobachtungen in aufeinanderfolgenden Nächten zeigten, daß sie beständig ihre relative Position in einer Weise veränderten, die man am einfachsten durch die Annahme erklären konnte, daß sie sich relativ schnell um den Jupiter bewegten (Bild 43). Diese Körper waren die vier Hauptmonde des Jupiter, ihre Entdeckung hatte einen ungeheuren Einfluß auf die Phantasie des 17. Jahrhunderts. Es schien, daß es neue Welten „bei den Planeten“ wie auch am „Firmament“ gäbe. Was noch wichtiger war, es war undenkbar, daß sich diese neuen Welten in etwa kreisförmigen Bahnen um den Mittelpunkt des ptolemäischen oder des kopernikanischen Universums bewegten. Offensichtlich bewegten sie sich um einen Planeten, sie verhielten sich wie der Erdmond in der kopernikanischen Astronomie. Die Entdeckung der Jupitermonde schwächte daher einen weiteren Einwand gegen das kopernikanische System. Die alte und die neue Astronomie mußten die Existenz von Satelliten der Planeten zur Kenntnis nehmen. Zusätzlich lieferten die

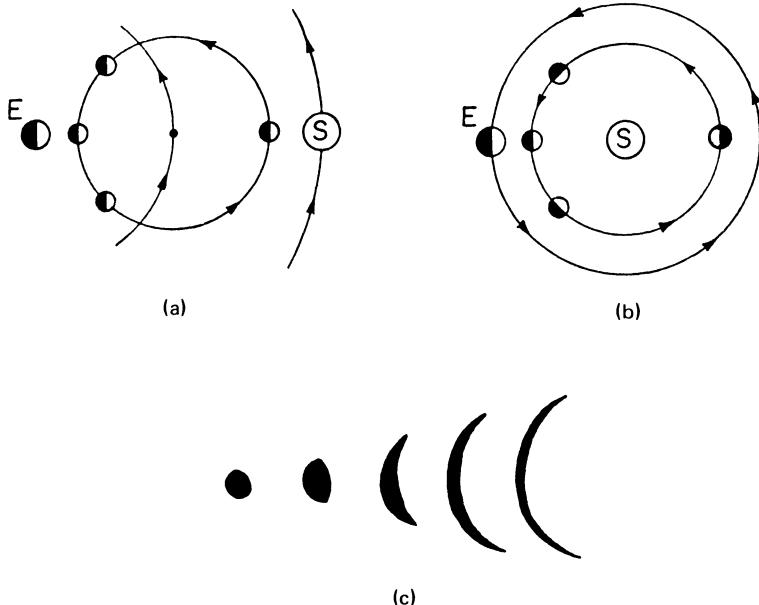


**Bild 43** Drei auf einander folgende Beobachtungen Jupiters und seiner Satelliten im Abstand weniger Tage. Die beständige Neuanordnung läßt sich am leichtesten durch die Annahme erklären, daß die Satelliten gleichmäßig um den viel größeren Planeten kreisen.

Jupitermonde ein sichtbares Modell des kopernikanischen Sonnensystems selbst. Hier im planetaren Raum war ein Himmelskörper, der von eigenen Planeten umgeben war, so wie die bisher bekannten Planeten die Sonne umkreisten. Die Argumente zugunsten der kopernikanischen Lehre vervielfachten sich mit Hilfe des Teleskops fast so schnell wie die Himmelskörper selbst. Viele andere Argumente folgten aus Teleskopbeobachtungen, doch nur die Beobachtungen der Venus sollen uns hier noch interessieren. Kopernikus selbst hatte im 10. Kapitel des ersten Buches von *De Revolutionibus* darauf hingewiesen, daß das Bild der Venus, wenn es im Detail beobachtbar wäre, direkten Aufschluß über die Gestalt der Venusbahn liefern sollte. Wäre Venus einem Epizykel angeheftet, der sich auf einem geozentrischen Deferenten bewegt, und wäre der Mittelpunkt des Epizykels stets in einer Linie mit der Sonne, dann könnte ein Beobachter auf der Erde niemals mehr als eine schmale Sichel von dem Planeten sehen (Bild 44a). Umkreiste hingegen die Venus die Sonne wie in Bild 44b, dann sollte ein irdischer Beobachter einen fast vollständigen Zyklus der Phasen, ähnlich denen des Mondes sehen können; nur die Phasen in der Nähe von „neu“ und „voll“ wären unbeobachtbar, weil dann die Venus der Sonne zu nahe wäre. Mit dem bloßen Auge kann man die Venusphasen nicht unterscheiden, man sieht die Planeten als gestaltlose Punkte. Das Teleskop vergrößert jedoch die Planeten ausreichend, um ihnen eine Gestalt zu geben, man erhält daraus, wie in Bild 44c angedeutet, einen deutlichen Hinweis, daß sich die Venus um die Sonne bewegt.

Keine der bisher diskutierten Beobachtungen, die letzte vielleicht ausgenommen, liefert direkten Aufschluß über den Hauptpunkt der kopernikanischen Theorie, die zentralen Position der Sonne und die Planetenbewegung um sie. Sowohl das ptolemäische als auch das tychonische System enthalten genug Raum für die neu entdeckten Sterne. Beide können modifiziert werden, um die Unvollkommenheiten am Himmel und die den Himmelskörpern zugesellten Satelliten aufzunehmen. Im tychonischen System gilt dieselbe Erklärung der beobachteten Venusphasen wie im kopernikanischen. Daher bewies das Teleskop die Gültigkeit der kopernikanischen Vorstellung nicht, doch lieferte es eine immens wirkungsvolle Waffe für den Kampf, es war kein Beweis, es war Propaganda.

Nach 1609 war die hauptsächliche psychologische Stärke des ptolemäischen Systems sein Konservatismus. Jene, die an ihm festhielten, wollten keine neuen Dinge lernen müssen. Doch wenn das ptolemäische System umfangreiche Veränderungen brauchte, um an die Resultate der Teleskopbeobachtungen angepaßt zu werden, dann mußte es auch seinen konservativen Reiz verlieren. Es war dann fast genauso leicht, den vollen Übertritt zur



**Bild 44** Die Venusphasen (a) im ptolemäischen, (b) im kopernikanischen System, (c) bei Beobachtung mit einem schwachen Teleskop. In (a) sollte ein irdischer Beobachter nie mehr als eine schwache Sichel sehen. In (b) sollte er fast die ganze Scheibe der Venus knapp vor und nach ihrem Vorbeigang hinter der Sonne sehen. In (c) ist auf Grund von Beobachtungen mit einem schwachen Teleskop das fast kreisförmige Bild der Venus gezeichnet, wenn sie erstmalig als Abendstern sichtbar wird. Die aufeinander folgenden Beobachtungen zeigen, wie Venus abnimmt und an Größe zunimmt, während ihre Bahnbewegung sie näher zur Erde bringt.

kopernikanischen Lehre zu vollziehen, wie sich auf die geforderte neue Version des ptolemäischen Systems einzustellen, und viele von denen, die die Beobachtungen ernst nahmen, machten den vollen Übertritt. Die Neubekhrten mögen auch durch eine andere Überlegung dazu gedrängt worden sein: die Kopernikaner, zumindest die in kosmologischer Hinsicht radikaleren, hatten jene Art von Universum vorweggenommen, die das Teleskop enthüllte. Sie hatten ein Detail, die Venusphasen, genau vorhergesagt. Sie hatten weiter, zumindest vage, die Unvollkommenheiten und die immens angewachsene Bevölkerung des Himmels vorhergesehen. Ihr Bild des Universums zeigte deutliche Parallelen zu dem Universum, das das Teleskop offenbarte.

Für den astronomischen Fachmann war die vom Teleskop gelieferte Evidenz vielleicht überflüssig. Keplers Gesetze und Rudolfinische Tafeln wären genauso wirkungsvoll gewesen. Doch nicht auf den astronomischen Fachmann machte das Teleskop den größten und unmittelbarsten Eindruck: Die wesentliche Rolle des Teleskops lag darin, eine allgemein zugängliche und nicht mathematische Dokumentation des kopernikanischen Standpunktes zu liefern. Nach 1609 konnten Menschen, die kaum etwas von Astronomie wußten, durch ein Teleskop blicken und für sich selbst sehen, daß das Universum nicht den naiven Vorurteilen des sogenannten gesunden Menschenverstandes entsprach. Im Laufe des 17. Jahrhunderts tat man dies eifrig, das Teleskop wurde ein populäres Spielzeug. Menschen, die niemals zuvor Interesse an Astronomie oder einer anderen Wissenschaft gezeigt hatten, besorgten sich das neue Instrument und studierten den Himmel an klaren Nächten. Der Amateurbeobachter wurde eine bekannte Figur, Vorbild und auch Spottobjekt. Mit ihm entstand auch eine neue Literatur. Man findet im 17. Jahrhundert den Anfang der volkstümlichen Wissenschaft und des uto-pischen Romans, das Teleskop und seine Entdeckungen gehörten zu den wichtigsten Themen. Darin liegt die größte Bedeutung von Galileis astronomischem Werk: Es machte Astronomie volkstümlich, und diese volks-tümliche Astronomie war die kopernikanische.

### *Der Niedergang der ptolemäischen Astronomie*

Keplers Ellipsen und Galileis Teleskop brachten die Opposition gegen Kopernikus nicht sofort zum Schweigen. Im Gegenteil, wie wir zu Beginn des Kapitels festgestellt haben, organisierte sich die erbittertste und lauteste Opposition erst, nachdem Kepler und Galilei ihre wesentlichen astronomischen Entdeckungen gemacht hatten. Wie bei Kopernikus 65 Jahre zuvor, war Keplers Werk nur ausgebildeten Astronomen zugänglich, und trotz der großen Genauigkeit, für die Kepler bereits bekannt war, fanden viele Astronomen seine nicht-kreisförmigen Bahnen und seine neuen Methoden zur Bestimmung der Planetengeschwindigkeiten allzu sonderbar, als daß sie sie sogleich akzeptiert hätten. Selbst nach der Mitte des Jahrhunderts findet man noch Astronomen, die zu zeigen trachteten, daß Keplers Genauigkeit mit mathematisch weniger radikalen Systemen erreicht werden könnte. Der eine versuchte, zu Epizykeln zurückzukehren, ein anderer verwendete zwar Ellipsen, doch sollte bei ihm die Geschwindigkeit eines Planeten in Bezug auf den nichtbesetzten Brennpunkt der Ellipse gleichförmig sein, noch

andere versuchten Bahnen mit anderer Gestalt. Keiner dieser Versuche war erfolgreich, und im Laufe des Jahrhunderts wurden diese Versuche immer spärlicher. Selbst unter den besten Astronomen Europas wurden die Keplerischen Gesetze erst gegen Ende des 17. Jahrhunderts zur allgemein anerkannten Grundlage für Planetenberechnungen.

Galileis Beobachtungen stießen ursprünglich auf noch größere Opposition, wenn auch seitens einer anderen Gruppe. Mit der Erfindung des Teleskops hörte die kopernikanische Lehre auf, nur für den Fachmann wichtig zu sein. Sie war nicht mehr das hauptsächliche Anliegen von bestausgebildeten mathematischen Astronomen. Daher wurde sie beunruhigender und gefährlicher. Die durch das Teleskop entdeckten neuen Welten waren eine wesentliche Ursache von Donnes Unbehagen. Wenige Jahre später boten die Teleskopbeobachtungen zum Teil den Anlaß, die kirchliche Maschinerie der offiziellen katholischen Opposition gegen Kopernikus in Gang zu setzen. Nachdem Galilei seine Beobachtungen 1610 bekannt gemacht hatte, konnte die kopernikanische Lehre nicht als bloßer mathematischer Trick hingestellt werden, nützlich, aber ohne physikalische Bedeutung. Es konnte nicht einmal der Wohlmeindste die Vorstellung der Erdbewegung als vorübergehende Verirrung ansehen. Die Entdeckungen mittels Teleskop boten daher einen natürlichen Angriffspunkt für einen Großteil der immer noch bestehenden Opposition gegen Kopernikus. Sie zeigten die wahrhaft brennenden kosmologischen Fragen schneller und klarer als seitenlange Mathematik.

Die Opposition gab es in verschiedenen Formen. Einige von Galileis fanatischeren Gegnern weigerten sich sogar, durch das neue Instrument zu blicken, und stellten fest, daß Gott den Menschen mit Teleskopaugen ausgestattet hätte, hätte er gewollt, daß der Mensch das Teleskop zur Bereicherung seines Wissens verwende. Andere blickten sogar willig durch das Fernrohr, nahmen die neuen Erscheinungen zur Kenntnis und behaupteten trotzdem, daß die neuen Objekte gar nicht am Himmel wären. Sie sollten Erscheinungen sein, die vom Teleskop selbst hervorgerufen würden. Die meisten von Galileis Gegnern verhielten sich rationaler. Wie Bellarmin argumentierten sie, daß die Erscheinungen am Himmel wären, doch stritten sie ab, daß sie Galileis Behauptungen bewiesen. Dabei hatten sie allerdings völlig recht. Obwohl das Teleskop viele Hinweise brachte, bewies es nichts.

Die fortgesetzte Opposition gegen die Resultate von Teleskopbeobachtungen und der Widerstand gegen die kopernikanische Lehre hatten tiefere Wurzeln, beide entsprangen einem unterbewußten Widerstreben, der Vernichtung einer Kosmologie zuzustimmen, die jahrhundertelang die Grundlage des täglichen praktischen und religiösen Lebens gewesen war. Die begriff-

liche Neuorientierung, die nach Kepler und Galilei für die Wissenschaftler eine Vereinfachung brachte, bedeutete häufig für Menschen wie Donne und Milton, deren Hauptanliegen in anderen Gebieten zu suchen waren, den Verlust eines geschlossenen Weltbildes, und einige Menschen, deren Hauptinteressen religiöser, moralischer oder ästhetischer Art waren, blieben noch lange Zeit gegen die kopernikanische Lehre feindlich eingestellt. Die Angriffe nahmen um die Mitte des 17. Jahrhunderts kaum ab. Bis in die Mitte des 18. Jahrhunderts erschienen immer wieder Abhandlungen, die auf einer wörtlichen Interpretation der Bibel bestanden und die Undenkbartheit der Erdbewegung zum Thema hatten. Noch 1873 veröffentlichte der Präsident eines amerikanischen, lutheranischen Lehrerseminars ein Werk, in dem er Kopernikus, Newton und eine Reihe späterer Astronomen wegen ihres Abweichens von der biblischen Kosmologie verdammte. Sogar heute noch berichten Zeitungen über Aussprüche von „Verrückten“, die auf der Unbeweglichkeit der Erde bestehen. Alte Vorstellungen sterben niemals!

Alte Vorstellungen schwinden jedoch allmählich; das langsame Verlöschen der Vorstellung von der Einzigartigkeit der Erde begann mit dem Werk von Kepler und Galilei. Im Laufe von 150 Jahren, die auf Galileis Tod im Jahre 1642 folgten, wandelte sich der Glaube an das geozentrische Universum langsam von einem wichtigen Anzeichen eines gesunden Verstandes zunächst zu einem Hinweis auf unflexiblen Konservativismus, dann auf übertriebene Kirchentreue, schließlich auf vollständigen Fanatismus. Um die Mitte des 17. Jahrhunderts kann man kaum noch einen wichtigen Astronomen finden, der nicht Kopernikaner gewesen wäre; am Ende des Jahrhunderts ist es unmöglich. Die astronomische Lehre folgte langsamer. In den Schlußjahrzehnten des 17. Jahrhunderts wurden die kopernikanische, die ptolemäische und die tychonische Astronomie nebeneinander an zahlreichen wichtigen protestantischen Universitäten gelehrt, im Laufe des 18. Jahrhunderts wurden die Vorlesungen über die beiden letzten Systeme immer weniger. Die volkstümliche Kosmologie fühlte den Einfluß von Kopernikus am spätesten. Fast das ganze 18. Jahrhundert wurde benötigt, das Volk und seine Lehrer zur kopernikanischen Ansicht zu bekehren. Der Triumph der kopernikanischen Lehre war ein langsamer Prozeß, seine Geschwindigkeit hing stark vom sozialen Stand, vom Beruf und vom religiösen Glauben ab. Doch trotz aller Schwierigkeiten war er ein unaufhaltsamer Prozeß.

Das kopernikanische Universum, das nach Galileis Tod eineinhalb Jahrhunderte lang gelehrt wurde, war jedoch nicht das Universum von Kopernikus, Galilei und Kepler. Außerdem leitete sich seine neue Struktur nicht hauptsächlich aus astronomischen Beweisen ab. Kopernikus und seine Nach-

folger vollzogen den ersten wesentlichen und erfolgreichen Bruch mit der aristotelischen Kosmologie, sie begannen die Konstruktion eines neuen Universums, und doch sahen die frühen Kopernikaner nicht, wohin ihr Werk führte. Im Laufe des 17. Jahrhunderts halfen viele anderen wissenschaftlichen und kosmologischen Strömungen mit, den kosmologischen Rahmen, der ihre Gedanken geleitet hatte, zu verändern und zu vervollständigen. Das kopernikanische Weltbild, das die späteren Jahrhunderte erbten, ist bereits eine Adaption, um der Vorstellung des 17. Jahrhunderts von einer Newtonschen Weltdynamik zu genügen. Die endgültige Integration der kopernikanischen Astronomie in das Weltbild des 17. Jahrhunderts ist der Gegenstand unseres letzten Kapitels, das wir allerdings mit der einem Epilog angemessenen Kürze behandeln werden. Soweit die kopernikanische Wende lediglich eine Revolution im astronomischen Denken war, endet ihre Geschichte hier. Was noch folgt, ist eine unvollständige Skizze der größeren Revolution in Wissenschaft und Kosmologie, die mit Kopernikus begann und durch die die kopernikanische Revolution schließlich vollendet wurde.

# 7 Das neue Universum

## *Die neue wissenschaftliche Perspektive*

Kepler und Galilei sammelten eindrucksvolle Hinweise zugunsten der Hypothese vom Planeten Erde. Die Vorstellung von elliptischen Bahnen und die neuen, mit Teleskopen gesammelten Daten bildeten jedoch nur astronomische Hinweise dafür, sie beantworteten die nichtastronomischen Gegenargumente nicht. Während diese unbeantwortet blieben, legte jedes von ihnen, sei es nun aus dem Gebiet der Physik, der Kosmologie oder der Religion, Zeugnis von der tiefen Kluft zwischen den Vorstellungen der Astronomie und den Konzepten in anderen Wissenschaften und in der Philosophie ab. Je weniger man an den astronomischen Neueinführungen zweifeln konnte, umso dringender wurde das Bedürfnis nach Anpassungen in anderen Gebieten. Bis es soweit war, blieb die kopernikanische Revolution unvollständig.

Die meisten umfassenden Umwälzungen im wissenschaftlichen Denken rufen ähnliche begriffliche Schwierigkeiten hervor. Wir befinden uns zum Beispiel heute im Spätstadium einer wissenschaftlichen Revolution, die von Planck, Einstein und Bohr begonnen wurde. Ihre neuen Vorstellungen und andere, von denen die gegenwärtige Revolution abhängt, zeigen enge historische Parallelen zur kopernikanischen Idee vom Planeten Erde. Vorstellungen wie das Bohrsche Atom und Einsteins endlicher, jedoch unbeschränkter Raum, wurden eingeführt, um dringende Probleme in einem einzigen wissenschaftlichen Spezialgebiet zu lösen. Jene, die die Lösung akzeptierten, fühlten dafür ein ungeheures Bedürfnis und taten dies trotz des offensichtlichen Konfliktes mit dem allgemeinen Denken, der physikalischen Intuition und den grundlegenden Konzepten anderer Wissenschaften. Eine Zeitlang wurden sie nur von Spezialisten verwendet, auch wenn sie im größeren Rahmen wissenschaftlichen Denkens unglaublich schienen.

Fortgesetzte Anwendung macht jedoch sogar die seltsamste Vorstellung plausibel, daraufhin gewinnt sie eine größere wissenschaftliche Funktion. Sie hört auf – um im Vokabular des ersten Kapitels zu sprechen –, ein bloß paradoxes und für den Augenblick bestimmtes Hilfsmittel zur ökonomischen Beschreibung der Fakten zu sein, sie wird statt dessen ein grundlegendes

Werkzeug zur Erklärung und Erforschung der Natur. In diesem Stadium kann die neue Vorstellung nicht mehr auf eine einzige wissenschaftliche Fachrichtung beschränkt bleiben. Die Natur sollte nicht in verschiedenen Gebieten unvereinbare Eigenschaften aufweisen. Wenn das Elektron des Physikers von einer Bahn zur nächsten springen kann, ohne den dazwischenliegenden Raum zu kreuzen, dann sollte das Elektron des Chemikers dieselben Fähigkeiten haben, die Vorstellung des Philosophen von Raum und Zeit erforderten daher eine Überprüfung. Jede fundamentale neue Einführung in einem wissenschaftlichen Spezialgebiet verändert zwangsläufig benachbarte Wissenschaften und – ganz langsam – die Welt der Philosophen und der gebildeten Laien.

Auch Kopernikus' Entdeckung ist keine Ausnahme. In den frühen Jahrzehnten des 17. Jahrhunderts bildete sie bestenfalls eine astronomische Neuerung. Außerhalb der Astronomie warf sie eine Unmenge an Problemen auf, die genau so verwirrend und wesentlich schwieriger waren, als die Frage nach genauen numerischen Details, die sie gelöst hatte. Warum fallen schwere Körper stets auf die Oberfläche der rotierenden Erde, während sich die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne bewegt? Wie weit sind die Sterne entfernt, welche Rolle spielen sie im Aufbau des Universums? Was bewegt die Planeten und wie bleiben sie auf ihren Bahnen, wenn wir keine Sphären haben? Die kopernikanische Astronomie erklärte die traditionellen Antworten auf diese Fragen für ungültig, doch wußte sie keine besseren Antworten. Eine neue Physik und Kosmologie war notwendig, bevor die Astronomie wiederum in glaubwürdiger Weise zu einem einheitlichen Weltbild gehörte.

Bis zum Ende des 17. Jahrhunderts war jene neue Physik und Kosmologie vollendet, die dafür verantwortlichen Menschen waren alle Kopernikaner. Ihr Glaube an die Lehre von Kopernikus bestimmte ihre Forschung. Er führte auf neue Probleme, von denen wir eines – was bewegt die Erde? – bereits kurz in unserer Untersuchung von Keplers *anima motrix* kennengelernt haben. Zusätzlich bot die kopernikanische Lehre eine Vielzahl von Hinweisen auf Konzepte und Techniken, die für die Lösung dieser neuen Probleme gebraucht wurden. Zum Beispiel durfte man nun berechtigterweise von Geschossen auf die Planetenbewegung schließen, nachdem die Vereinheitlichung von irdischen und himmlischen Gesetzen begonnen worden war. Schließlich gab die kopernikanische Lehre einer Anzahl kosmologischer Ansichten neue Bedeutung und Gewicht, die bisher von den meisten Wissenschaftlern ignoriert worden waren, obwohl sie in der Antike und im Mittelalter von kleinen Gruppen gepflegt wurden. Im 17. Jahrhundert gaben einige dieser plötzlich populären Ansichten, besonders der Atomismus, immer wieder wichtige Anregungen für die Wissenschaft.

Diese neuen Probleme, neuen Techniken und neuen Bewertungen bilden die neue Weltschau, die die Wissenschaft des 17. Jahrhunderts durch die kopernikanische Lehre erwarb. Das letzte Kapitel zeigte die Wirkungen dieser neuen Perspektive für die Astronomie. Das jetzige wird ihre Rolle in der Entwicklung anderer Wissenschaften und der Kosmologie zeigen, denn das Newtonsche Universum entstand in einem intellektuellen Klima, das die kopernikanische Lehre befürchtet hatte. Doch im Gegensatz zu Keplers Gesetzen, die der astronomische Höhepunkt der kopernikanischen Revolution sind, ist das Newtonsche Universum mehr als nur ein Ergebnis der neuen Ideen von Kopernikus. Wenn wir die weitere Entwicklung diskutieren und untersuchen, wie die Vorstellung vom Planeten Erde schließlich begreifbar wurde, werden wir dabei gelegentlich Vorstellungen und Methoden einführen müssen, die wir bisher außer Acht gelassen haben, weil sie wenig Bedeutung für die Entwicklung der Astronomie und Kosmologie bis nach Kopernikus' Tod hatten. Unser Problem wird nun umfassender als das der eigentlichen kopernikanischen Revolution.

### *Am Weg zu einem unendlichen Universum*

Das aristotelische Universum war in den meisten Versionen ein endliches Universum gewesen. Materie und Raum endeten gemeinsam an der Sternensphäre und die meisten frühen Anhänger von Kopernikus hielten sich an die Überlieferung. In den Kosmologien von Kopernikus, Kepler und Galilei fiel der Mittelpunkt der Sonne mit dem Mittelpunkt der endlichen Sternenkugel zusammen. Die Sonne hatte bloß mit der Erde den Platz getauscht. Sie war das zentrale Gestirn geworden, das neuplatonische Symbol der Gottheit. Da es gegen diese neue Form des Zwei-Kugel-Universums keine Gegenbeweise gab, hätte es sich bis zum 19. Jahrhundert halten können, als verbesserte Teleskope zeigten, daß die einzelnen Sterne von der Sonne verschiedenen Abstand hatten.

Die Rolle des Zwei-Kugel-Universums war jedoch in den Weltbildern von Aristoteles und Kopernikus völlig verschieden: Die Endlichkeit hatte im aristotelischen Weltbild einen Zweck, der im kopernikanischen völlig fehlte. Zum Beispiel wurde die Sternenkugel bei Aristoteles gebraucht, um die Sterne auf ihren täglichen Kreisen zu führen und den Anstoß zu übertragen, der Planeten und irdische Objekte in Bewegung hielt. Außerdem definierte die äußerste Sphäre einen absoluten Mittelpunkt des Raumes, gegen den sich alle schweren Körper von selbst bewegten. Kopernikus' Univer-

sum beraubte die Sternensphäre all dieser und noch anderer Funktionen. Bewegung auf der Erde erforderte keinen absoluten Mittelpunkt des Raumes; Steine fielen auch auf die bewegte Erde. Man brauchte auch keine äußere Sphäre, um die Himmelsbewegungen hervorzurufen; ob die Sterne nun auf einer Sphäre waren oder nicht, sie ruhten. Die Kopernikaner konnten immer noch, wenn sie wollten, an der Sternenkugel festhalten, doch das einzige Motiv dafür konnte bloß die Tradition sein. Die Kugel konnte aber auch ohne Schaden für die kopernikanische Physik oder Kosmologie aufgegeben werden.

Die kopernikanische Lehre legte daher dem kosmologischen Denken keine Fesseln auf, das Resultat war eine neue Vorstellung vom Universum, die Kopernikus und Kepler sicher entsetzt hätte. Ein Jahrhundert nach Kopernikus' Tod war sein Zwei-Kugel-Modell durch ein Universum ersetzt worden, in dem die Sterne hier und dort im unendlichen Raum verstreut waren. Jeder dieser Sterne war eine „Sonne“; man glaubte, daß so mancher sein eigenes Planetensystem haben könnte. Um 1700 war die Erde, die Kopernikus von ihrem einzigartigen Status zu einem der sechs Planeten gemacht hatte, kaum mehr als ein kosmisches Staubkorn.

Obwohl die Historiker noch wenig darüber wissen, wie diese neue kopernikanische Vorstellung entstand, so ist ihr Ursprung doch klar. Indem Kopernikus die kosmologischen Funktionen der äußeren Sphäre beseitigte, rief er die mit der Scholastik, dem Neuplatonismus und dem Atomismus verknüpften Vorstellungen über das Universum wieder ins Leben. Vor *De Revolutionibus* waren diese drei Richtungen in Struktur und Motivation völlig verschieden, keine von ihnen hatte für die Astronomie eine Bedeutung. Doch unter dem Einfluß der kopernikanischen Lehre wandelten sie sich zu wissenschaftlichen Kosmologien und zeigten daraufhin bemerkenswerte Ähnlichkeiten im Aufbau.

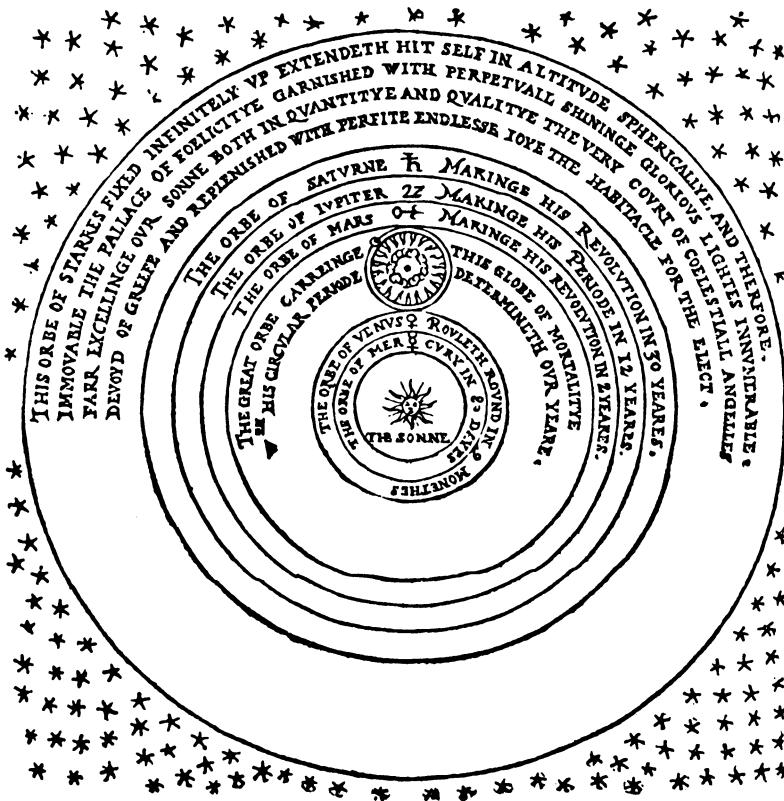
Betrachten wir zuerst die wichtigste vorkopernikanische Vorstellung eines unendlichen Universums, die von islamischen Philosophen entwickelt wurde, als sie den aristotelischen Beweis der logischen Unmöglichkeit eines leeren Raumes nicht akzeptieren konnten. Dieses Universum war im wesentlichen dasselbe wie das des Aristoteles, angefangen von der im Mittelpunkt stehenden Erde bis zur rotierenden Sternenkugel, doch jenseits derselben hörte der Raum nicht mehr auf zu existieren. Statt dessen war das gesamte aristotelische Universum als Kern im Mittelpunkt eines unendlichen Raumes eingebettet, der – frei von Materie – der Sitz Gottes und seiner Engel war. Diese Vorstellung wurde nach dem 13. Jahrhundert in Europa ziemlich populär, weil sie Gottes Fähigkeit, ein unendliches Universum zu schaffen, nicht einschränkte. Sie wurde in einigen weit verbreiteten Lehrbüchern

beschrieben, die zu Lebzeiten von Kopernikus im Gebrauch standen; die Kenntnis dieser Vorstellung mag ihm bei der Begründung geholfen haben, warum die Ausdehnung der Sternensphäre so groß war, wie es das Fehlen einer beobachteten Prallaxe erforderte. Vor Kopernikus hatte diese Version eines unendlichen Universums jedoch wenige Bedeutung für die astronomische Praxis oder eine andere Wissenschaft gehabt. Solange man die Himmelskörper in beständiger Bewegung dachte, konnte man sie nicht leicht in den unendlichen Raum jenseits der äußersten Sphäre setzen. Die Aufgaben jenes Raumes waren theologisch, nicht physikalisch oder astronomisch.

Indem Kopernikus die Sterne zur Ruhe brachte, konnte der unendliche Raum astronomische Funktionen übernehmen. Diese neue Freiheit wurde etwa eine Generation nach der Veröffentlichung von *De Revolutionibus* erstmalig ausgenutzt. 1576 führte der englische Kopernikaner Thomas Digges die Idee eines unendlichen Universums in eine sonst unveränderte Interpretation des ersten kopernikanischen Buches ein. Das Resultat, reproduziert nach Digges originaler Illustration, ist in Bild 45 zu sehen. Der zentrale Kern des Universums stimmt mit dem Universum von *De Revolutionibus* überein, die Sterne wurden aber von der Oberfläche der stationären Sternenkugel entfernt und im ganzen unendlichen Raum verstreut. Obwohl wenige unmittelbare Nachfolger Kopernikus' soweit wie Digges gingen, erkannten doch viele von ihnen, daß die Sterne nicht länger auf einer Kugel liegen müßten und daß die Abstände zwischen den einzelnen Sternen und der Sonne verschieden groß sein könnten, ohne die Himmelserscheinungen zu beeinflussen. Als Galileis Teleskop zahllose neue Sterne zeigte, wo man zuvor noch keine gesehen hatte, erschien dem weniger traditionell eingestellten Astronomen die Verteilung der Sterne im ganzen unmeßbar fernen Raum fast als Erfahrungstatsache.

Diggs beschrieb als erster ein unendliches kopernikanisches Universum, doch gelangte er zur Unendlichkeit nur durch die unbewußte Einführung eines Paradoxons, das in der Antike und im Mittelalter einen wesentlichen Grund zur Ablehnung des unendlichen Raumes gegeben hatte. Die zentrale Sonne ist bei Digges ein Widerspruch, denn sie ist nicht „zentraler“ als irgend einer der Sterne oder der Planeten. Der Mittelpunkt ist jener Punkt, der von allen Punkten des Umfangs gleich weit entfernt ist, – diese Bedingung wird von jedem Punkt eines unendlichen Universums erfüllt, oder von keinem. Dieses Paradoxon war ein Jahrhundert vor Kopernikus von dem bedeutenden Neuplatoniker Nicolaus von Cusa ausgearbeitet worden. Er hatte geglaubt, daß das Universum eine unendliche Kugel sei, nach seinen Worten wäre eine kleinere Kugel Gottes schöpferischer Allmacht nicht entsprechend, und er

**A perfitt description of the Cælestiall Orbæ,**  
*according to the most ancient doctrine of the  
Pythagoreans, &c.*



**Bild 45** Das unendliche kopernikanische Universum des Thomas Digges, reproduziert aus seinem Werk *Perfit Description of the Caelestiall Orbes* (1576). Die Darstellung ist allen anderen frühen Skizzen des kopernikanischen Universums ähnlich, jedoch liegen die Sterne nicht mehr nur auf der Oberfläche der Himmelskugel. Kein Stern befindet sich innerhalb (er würde sonst Parallaxe zeigen), doch der unendliche Raum dahinter ist von ihnen voll. Man beachte jedoch, daß die Sonne ihre privilegierte Stellung behält, der Abstand benachbarter Sterne ist beträchtlich kleiner als zwischen Sonne und Himmelskugel. In Digges' Universum ist die Sonne kein gewöhnlicher Stern.

hatte das entstehende Paradoxon durch die Erklärung gelöst, daß der Mittelpunkt der Sphäre überall mit ihrem Umfange zusammenfiel. In seinem Universum war jeder Körper, egal ob fest oder in Bewegung, gleichzeitig im Mittelpunkt, an der Oberfläche und im Inneren. Weil kein Stück des Raumes von einem anderen unterschieden werden konnte, mußten sich alle Bewohner des Raumes – Erde, Planeten und Sterne – bewegen und sie mußten von derselben Beschaffenheit sein.

Cusas Gedanken bilden ein zweites Beispiel einer Kosmologie, die sich durch die Existenz der kopernikanischen Lehre wandelte. Als Cusa seine Kosmologie 100 Jahre vor dem Erscheinen von *De Revolutionibus* entwickelte, machte sie keinen wissenschaftlichen Sinn. Als Kosmologe vernachlässigte der Mystiker Cusa gerne die Himmelserscheinungen zugunsten einer transzendentalen Auffassung der unendlichen Gottheit, in der alle Paradoxa aufgehoben wurden. Und doch waren das neuplatonische Beharren auf dem Unendlichen und seinen Paradoxa nicht automatisch mit den Himmelserscheinungen oder der Wissenschaft unverträglich. Nach Kopernikus Tod motivierte dieselbe Ansicht die kosmologischen Schriften des italienischen Mystikers Giordano Bruno und gab ihnen ein immer wiederkehrendes Thema. In Brunos Weltbild waren das Unendliche und die Himmelserscheinungen mit Hilfe der kopernikanischen Lehre in Einklang gebracht worden. Bruno kümmerte sich in seiner Kosmologie kaum mehr um die Himmelserscheinungen und die Astronomie als Cusa, von dem er stark beeinflußt war. Trotzdem hatte Bruno recht. Die Sonne braucht nicht im Mittelpunkt zu stehen, tatsächlich braucht man keinen Mittelpunkt. Ein kopernikanisches Sonnensystem kann an beliebiger Stelle in einem unendlichen Universum angesiedelt werden. Wenn nur die Sonne von den Nachbarsternen weit genug entfernt ist, so daß keine Parallaxe beobachtet werden kann, wird das Bild der Himmelserscheinungen erhalten bleiben.

Daß Bruno die Himmelserscheinungen in ein unendliches und mittelpunktlloses Universum einfügte, war nur ein Teil seiner kosmologischen Konstruktion. Ab etwa 1584 beschrieb er die physikalische Beziehung des kopernikanischen Sonnensystems zu den anderen Himmelsbewohnern seines unendlichen Raumes. Die Sonne war seiner Meinung nach nur einer von unendlich vielen Sternen im unendlich ausgedehnten Raum. Einige der Himmelskörper müßten wie die Erde bewohnte Planeten sein. Nicht nur die Erde, sondern auch die Sonne und das gesamte Sonnensystem wurden zu unbedeutenden Staubkörnern, verloren in der Unendlichkeit von Gottes Schöpfung. Der kompakte und geordnete Kosmos der Scholastik war ein ungeheures

Chaos geworden, das kopernikanische Verlassen der Tradition hatte seinen Höhepunkt erreicht.

Doch obwohl diese letzte Erweiterung der kopernikanischen Lehre radikal war, so war sie doch nicht völlig neu. Zwei Jahrtausende vor Brunos Geburt hatten die antiken Atomisten Leukipp und Demokrit ein unendliches Universum mit vielen bewegten Erden und Sonnen in Betracht gezogen. In der Antike hatten ihre Auffassungen niemals eine Konkurrenz für die aristotelische Lehre als Grundlage wissenschaftlichen Denkens bedeutet, ihre Schriften waren im Laufe des Mittelalters fast völlig verschwunden, doch die Werke ihrer Nachfolger Epikur und Lukrez gehörten zu den hauptsächlichen literarischen Wiederentdeckungen der Humanisten in der Renaissance. Aus diesen Werken, besonders aus Lukrez' *De Rerum Natura* gewann Bruno viele seiner fruchtbarsten Vorstellungen. In seiner Kosmologie wurde eine dritte antike Vorstellung vom Universum wiederbelebt, sie erhielt durch ihre Nähe zur kopernikanischen Lehre eine neue Existenzberechtigung.

Diese Verwandtschaft ist einigermaßen überraschend, denn in historischer und logischer Sicht scheinen Atomismus und kopernikanische Lehre völlig verschiedene Sachen zu sein. Die antiken Atomisten hatten die Hauptpunkte ihrer Kosmologie nicht hauptsächlich aus der Beobachtung, sondern im Versuch gewonnen, logische Paradoxien zu lösen. Die Existenz und Bewegung endlicher Körper konnte ihrer Meinung nach nur erklärt werden, wenn die reelle Welt aus winzigen unteilbaren Bestandteilen, den Atomen, bestand, die sich in einem leeren Raum frei bewegten. Der leere Raum war für die Bewegung erforderlich. Gäbe es ihn nicht, dann wäre für die Materie kein Platz vorhanden, in dem sie sich bewegen könnte. In ähnlicher Weise schien ihnen die Unteilbarkeit der letzten Teilchen für die Existenz endlicher Körper notwendig: Wenn Materie unendlich teilbar wäre, dann wären ihre letzten Teile bloße geometrische Punkte, die überhaupt keinen Platz einnähmen. Aus Teilen, die für sich keinen Raum beanspruchen, schien es unmöglich, einen endlichen Körper mit endlichem Volumen zu konstruieren. Null plus Null ergibt Null, unabhängig wie oft die Addition wiederholt wird. Die Realität muß daher – so sagten die Atomisten – aus unteilbaren Atomen und dem leeren Raum bestehen, und diese der kopernikanischen Lehre völlig fremde Ansicht war die Basis ihres Weltbildes.

Diese Vorstellungen hatten jedoch einige überraschende Konsequenzen. Zum Beispiel mußte der leere Raum der Atomisten unendlich ausgedehnt sein. Er konnte nur durch Materie begrenzt sein, die Materie mußte wiederum durch weiteren leeren Raum begrenzt sein. Weiters gab es keine ausgezeichneten Örter oder Körper im Universum der Atomisten. Der leere Raum selbst

war neutral, jeder Ort war wie der andere. Die Erde oder die Sonne existierten in dieser Region und nicht in einer anderen, bloß weil die zufälligen Bewegungen und Stöße der Atome ein Aggregat an diesem Ort hervorgebracht hatten und weil sich die Atome nach ihrem zufälligen Zusammentreffen zu größeren Körpern vereinigt hatten. Der Vorgang hätte sich genauso gut woanders zutragen können. Da das Universum unendlich war und unendlich viele Atome enthielt, hat sich der Prozeß fast gewiß auch an anderen Orten und zu anderen Zeiten zugetragen. Viele Erden und Sonnen bevölkerten den unendlichen leeren Raum der atomistischen Kosmologie. Es gab keine Unterscheidung irdisch oder himmlisch. Nach Meinung der Atomisten galten überall im unendlichen, neutralen, leeren Raum dieselben Gesetze.

Da die kopernikanische Lehre die Einzigartigkeit der Erde zerstört, die Unterscheidung zwischen irdisch und himmlisch abgeschafft und die Unendlichkeit des Raumes denkbar gemacht hatte, konnte der unendliche leere Raum der Atomisten das kopernikanische Sonnensystem und noch viele weitere aufnehmen. Brunos Hauptbeitrag war die Erkenntnis und Verdeutlichung dieser Verwandtschaft zwischen den antiken und modernen Lehren. Sobald sie erkannt war, erwies sich der Atomismus als die wirkungsvollste und folgenreichste intellektuelle Strömung, die im Laufe des 17. Jahrhunderts den endlichen Kosmos des Kopernikus in einen unendlichen und vielfach bewohnten umwandelte. Diese Erweiterung kosmologischer Dimensionen war jedoch nur eine erste wichtige Rolle des Atomismus bei der Konstruktion des neuen Universums.

### *Das korpuskulare Universum*

Zu Beginn 17. Jahrhundert erlebte der Atomismus einen bedeutenden Aufschwung. Teils wegen seiner beträchtlichen Übereinstimmung mit kopernikanischen Ansichten, teils, weil er die einzige entwickelte Kosmologie war, die die zunehmend in Mißkredit geratene scholastische Weltsicht ersetzen konnte, verband sich der Atomismus fest mit der kopernikanischen Lehre zu einem Grundsatz der „neuen Philosophie“, die die wissenschaftliche Phantasie lenkte. Donnes Klage, daß das Universum wegen der „neuen Philosophie“ zu „Atomen zertrümmert‘ werde, ist ein früher Hinweis auf die Verbindung dieser zuvor getrennten intellektuellen Strömungen. Schon um 1630 zeigte sich bei den führenden Physikern der Effekt dieser Verschmelzung. Sie glaubten, daß die Erde ein sich bewegender Planet sei, und sie gingen die Probleme, die sich ihnen durch diese kopernikanische Vorstellung stellten,

mit „korpuskularen“ Voraussetzungen an, die sie aus dem antiken Atomismus ableiteten.

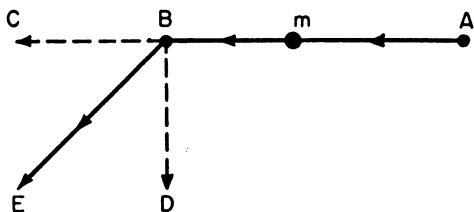
Die „Korpuskeltheorie“, die die Wissenschaft des 17. Jahrhunderts umwandelte, stand oft im Widerspruch zum antiken Atomismus, doch war sie trotzdem atomistisch. Einige „neue Philosophen“ glaubten zwar, daß die letzten Teilchen im Prinzip teilbar wären, aber alle stimmten überein, daß sie selten oder nie geteilt würden. Einige bezweifelten die Existenz des leeren Raumes, doch die ätherische Flüssigkeit, mit der sie den gesamten Raum erfüllten, war für die meisten Anwendungen genauso neutral und inaktiv wie der leere Raum. Es war die allgemeine Ansicht, daß die Bewegungen, Wechselwirkungen und Kombinationen der verschiedenen Teilchen durch Gesetze bestimmt würden, die von Gott den Teilchen zum Zeitpunkt der Schöpfung auferlegt worden wären. Die Entdeckung dieser Gesetze war für den Anhänger der Korpuskeltheorie das wichtigste Problem. Das nächstwichtige war die Anwendung dieser Gesetze bei der Erklärung der umfangreichen Sinneserfahrungen.

Der französische Philosoph René Descartes (1596–1650) wandte als erster dieses Programm systematisch auf die Probleme des kopernikanischen Universums an. Er begann mit der Frage, wie sich ein einziges Korpuskel im leeren Raum bewegen sollte. Er fragte dann, wie diese Bewegung durch Zusammenstoß mit einem zweiten Korpuskel verändert werden könnte. Da er glaubte, daß jede Veränderung im korpuskularen Universum als Aufeinanderfolge freier Korpuskelbewegungen zwischen den interkorpuskularen Stößen entstand, erwartete Descartes, die gesamte Struktur des kopernikanischen Universums aus den Antworten auf wenige Fragen wie der obigen ableiten zu können. Obwohl alle seine Ableitungen intuitiv waren und obwohl die meisten von ihnen falsch waren, erwies sich seine kühn ersonnene Kosmologie sehr plausibel. Descartes' Vorstellung beherrschte fast ein Jahrhundert lang die Wissenschaft, nachdem ihre Details erstmalig 1644 in seinen *Principien der Philosophie* veröffentlicht worden waren.

Descartes' Antwort auf seine erste Frage war besonders erfolgreich. Durch die Anwendung zeitgenössischer Versionen der mittelalterlichen Impetustheorie auf ein Teilchen im unendlichen neutralen Raum der atomistischen Kosmologie kam er zur ersten klaren Formulierung des Trägheitsgesetzes. Ein Teilchen, das im leeren Raum ruht, wird in Ruhe bleiben, so sagte er, ein bewegtes Teilchen wird sich weiterhin mit derselben Geschwindigkeit in einer geraden Linie bewegen, wenn es nicht durch ein anderes Korpuskel abgelenkt wird. Die Konstanz der Teilchengeschwindigkeit war eine direkte Folgerung aus der Impetustheorie, die wir im vorletzten Abschnitt von

Kapitel 4 diskutierten. Doch die Geraadlinigkeit der Bewegung war neu, sie hatte ungeheure Konsequenzen, und zeigt die fruchtbaren Anregungen des Atomismus für die Wissenschaft des 17. Jahrhunderts. Der unendliche leere Raum der Atomisten war ein Raum ohne Mittelpunkt, ohne besondere Richtungen, wie „oben“ und „unten“. In einem solchen Raum konnte ein Körper ohne äußere Einflüsse nur ruhen oder sich geradlinig bewegen. Die selbst erhaltenden Kreisbewegungen, die von Kopernikus, Galilei und anderen frühen Kopernikanern aus der scholastischen Impetustheorie übernommen worden waren, waren unmöglich. Nach Descartes spielten sie bei der Konstruktion des kopernikanischen Universums keine wesentliche Rolle mehr.

In der Natur ändern jedoch alle Teilchen oder Teilchenanhäufungen beständig Geschwindigkeit und Richtung. Descartes meinte, diese Änderungen müßten durch Druck und Zug verursacht werden, die von anderen Körpern ausgingen (Bild 46). Korpuskulare Stöße waren daher sein zweites Forschungsgebiet; dabei war er weniger erfolgreich. Nur eines seiner sieben Stoßgesetze wurde von seinen Nachfolgern aufrecht erhalten, seine Vorstellung vom Stoßprozeß wurde jedoch weiter verwendet. Wiederum hatte die Korpuskeltheorie ein neues Problem gestellt, es wurde innerhalb von 30 Jahren nach Descartes Tod gelöst. Mit der Lösung fand man sowohl das



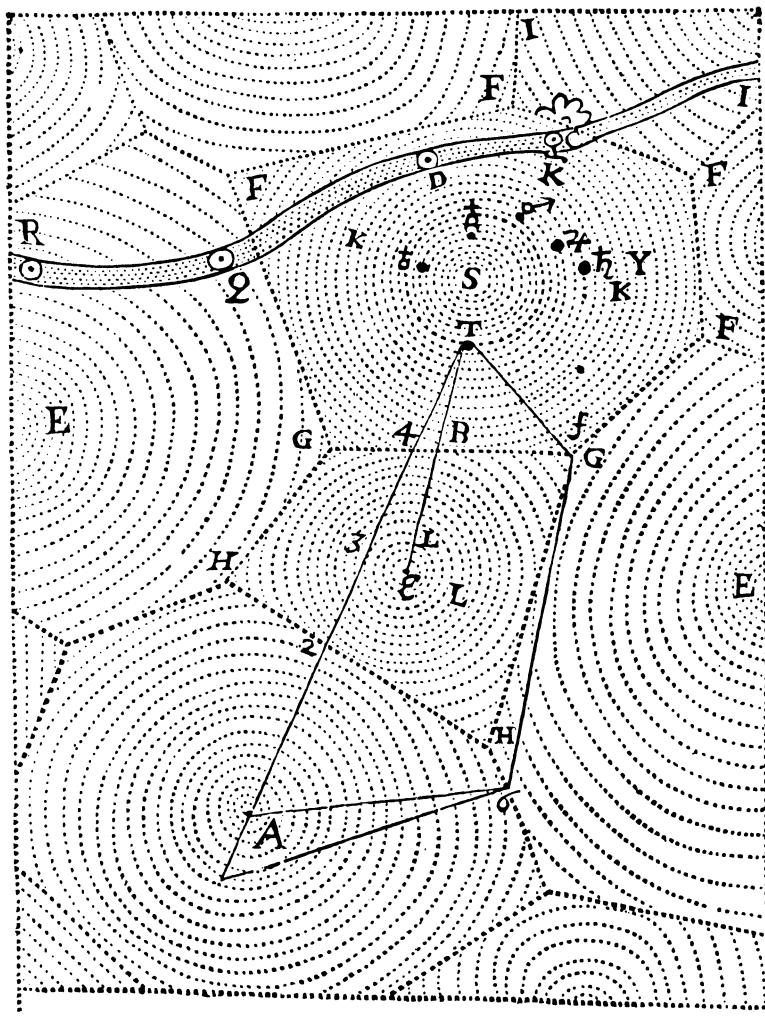
**Bild 46** Die Auswirkung eines Stoßes auf eine gleichförmige Bewegung. Im Punkt A erhält der Körper  $m$  einen scharfen Stoß in Richtung B. Wenn keine weiteren Stöße hinzukommen, wird sich der Körper mit konstanter Geschwindigkeit von A nach B bewegen. Erhält er in B einen weiteren Stoß in dieselbe Richtung, wird er sich mit erhöhter Geschwindigkeit nach C weiter bewegen. Erhält er in B einen Stoß in die umgekehrte Richtung, mag er sich mit verringriger Geschwindigkeit nach C bewegen oder, wenn der letzte Stoß stark genug war, nach A zurückkehren. Wenn schließlich der Körper in B einen seitlichen Stoß in Richtung D erhält, wird er sich nun gleichförmig in die neue Richtung BE bewegen. Letztere Bewegung kann man als Resultat zweier gleichzeitiger und ungestörter Bewegungen auf Grund der beiden Stöße in A und B auffassen.

Gesetz von der Erhaltung des Impulses als auch die Beziehung zwischen einer Kraft und der von ihr verursachten Impulsänderung. Beide waren wesentliche Schritte auf das Newtonsche Universum zu.

Als Descartes nach seinen Bewegungs- und Stoßgesetzen über die Struktur eines kopernikanischen Universums nachdachte, führte er ein Konzept ein, das seit dem 17. Jahrhundert die korpuskulare Grundlage seiner Kosmologie weitgehend verschleiert hat: Er füllte das Universum an. Doch die Materie, mit der sein Raum erfüllt war, hatte überall Teilchenstruktur, und bei der Bestimmung des Verhaltens dieses von Teilchen erfüllten Raumes benützte Descartes das Konzept des leeren Raumes. Er benützte ihn zuerst, um die Bewegungs- und Stoßgesetze einzelner Teilchen zu bestimmen. Um dann zu sehen, wie diese Gesetze in einem gefüllten Raum wirkten, scheint er sich zunächst die Teilchen in einem leeren Raum schwimmend vorgestellt zu haben, wobei ihre geradlinigen Bewegungen durch Stöße unterbrochen waren; daraufhin entfernte er schrittweise den leeren Raum aus seinem System und brachte die Teilchen immer enger aneinander, bis schließlich aus ihren Stößen und freien Bewegungen ein einziger Prozeß entstand. Leider müßten dabei die Bewegungen aller Teilchen gleichzeitig untersucht werden, ein ungeheuer kompliziertes Problem. Ohne die Zwischenschritte durchführen zu können, unternahm Descartes in seiner Vorstellung den Sprung von seinen Korpuskelgesetzen zur endgültigen Lösung.

Descartes schien es selbstverständlich, daß die einzigen andauernden Bewegungen in einem solchen Raum in kreisartigen Strömungen ablaufen müßten. Jedes Teilchen innerhalb einer solchen Strömung stößt seinen nächsten Nachbarn vorwärts, bis schließlich der Stoß zum ersten Teilchen über eine ungefähr kreisförmige Bahn zurückkehrt, worauf der Prozeß von neuem beginnt. Da für Descartes diese Kreisströmungen die einzigen möglichen andauernden Bewegungen waren, glaubte er, daß die Korpuskeln, gleichgültig welchen Stoß ihnen Gott bei der Erschaffung gegeben hätte, schließlich in Form von Wirbeln zirkulieren würden, die über den ganzen Raum verteilt wären. Ein kleiner Ausschnitt aus einer Illustration aus einem von Descartes' Frühwerken zeigt diese Wirbel in Bild 47.

Jeder Descartes'sche Wirbel war – zumindestens als Möglichkeit – ein Sonnensystem, das von den korpuskularen Trägheits- und Stoßgesetzen erzeugt und bestimmt war. Zum Beispiel sollten die korpuskularen Stöße gerade die Zentrifugalkraft aufheben, die die Trägheit jedem Korpuskel des Wirbels gab. Wenn alle anderen Teilchen entfernt wären, würde ein einzelnes Teilchen auf einer geraden Linie tangential zu seiner normalerweise kreisförmigen Bahn davonlaufen und den Wirbel verlassen. Dies tritt jedoch nicht



**Bild 47** Descartes' Wirbel-Kosmologie aus seinem Buch *Traité de la lumiere ou le monde*. Die Punkte S, E, A und e sind Wirbelzentren. Die schnelle Drehbewegung der zentralen Korpuskeln bringt sie zum Leuchten, so daß sie wie Sterne wirken. Die verschiedenen punktierten Kreise, die keine genauen Kreise sein müssen, stellen die Bahnen der beständig rotierenden korpuskularen Ströme dar, aus denen sich die Wirbel zusammensetzen. Die Punkte um den Wirbel S sind die Planeten, die von der Wirbelströmung auf ihren Bahnen herumgeführt werden. Der Körper C, der die Zeichnung in der oberen Hälfte kreuzt, ist ein Komet; er gelangt in einer Region von Wirbel zu Wirbel, in der der Strom zu langsam ist und ihn nicht einfängt. Andere Wirbel füllen den Raum außerhalb der Zeichnung, jeder stellt zumindest potentiell ein Sonnensystem in Descartes' vielfach bewohntem Universum dar.

ein, weil andauernd Stöße mit anderen Teilchen des Wirbels das Teilchen beständig zum Mittelpunkt drücken. Ähnliche Stöße halten die stabilen Korpuskelansammlungen, die die Planeten bilden, auf ihrer Kreisbahn um den Wirbel..

Die schnelle Drehung jedes Wirbels ruft eine Schwingung hervor, die sich in Form von Wellen durch den ganzen Raum ausbreitet. Nach Descartes ist diese Schwingung das Licht, das fortwährend von der Sonne oder den Sternen, die die Wirbelzentren sind, ausgesandt wird. Descartes' Überlegungen enden aber nicht bei den Himmelserscheinungen. Zum Beispiel erklärt er die Bewegung des Mondes und Bewegungen von Wurfgeschossen, indem er kleine Hilfswirbel anbringt, einen bei jedem Planeten. Korpuskulare Stöße mit diesen kleineren Wirbeln halten den Mond in Bewegung und regeln den Fall von Steinen zur Erde. In Descartes' Universum kann man letztlich Gewicht, Bewegung, Licht und alle Sinneswahrnehmungen auf korpuskulare Zusammenstöße zurückführen, die von den Gesetzen der atomaren Bewegung und Wechselwirkung bestimmt werden.

Heute ist es leicht, Fehler in Descartes' Diskussion der Wirbelkosmologie und in der daraus abgeleiteten Astronomie, Optik, Chemie, Physiologie, Geologie und Dynamik zu finden. Seine Vision war begeisternd und alles umfassend, doch unterwarf er sie zu wenig rationaler Kritik. Seine Bewegungsgesetze der Korpuskeln stellen nur eines von vielen Beispielen dar. Und doch waren für die Entwicklung der Wissenschaft des 17. Jahrhunderts die einzelnen Teile des cartesischen Systems nicht so wichtig wie das System insgesamt. Seine Nachfolger, angeführt von Christian Huyghens, fanden ihre Inspiration in seiner Grundannahme, nicht in seinen Einzelergebnissen. Sie konnten und mußten seine Bewegungsgesetze abändern, ebenso seine Beschreibung der Wirbel und seine Gesetze für die Ausbreitung des Lichtes. Sie gaben jedoch seine Vorstellung vom Universum als einer korpuskularen Maschine, die von wenigen Gesetzen regiert wird, nicht auf. Ein halbes Jahrhundert lang leitete diese Vorstellung die Suche nach einem widerspruchsfreien kopernikanischen Universum.

### *Das mechanische Sonnensystem*

Historisch gesehen führen zwei völlig getrennte Wege von Kopernikus' heliozentrischem Kosmos zu Newtons Universum, das der kopernikanischen Revolution die endgültige Form gab. Einer davon ist die soeben beschriebene Verbindung zwischen kopernikanischer Lehre und korpuskularer Philosophie.

Der andere ist eine Reihe wohl gezielter Angriffe auf das brennendste physikalische Problem: Was bewegt die Planeten? Beide Wege begannen ein halbes Jahrhundert nach Kopernikus' Tod. Ihr gemeinsamer Ursprung ist die neue wissenschaftliche Perspektive, die entstand, als Kepler, Bruno und andere die wahrhaft neuen Elemente von den pseudoaristotelischen Elementen im Werk von Kopernikus trennten. Die zwei Wege treffen sich wiederum in Newtons endgültiger Formulierung der Struktur des kopernikanischen Universums. Beide boten dazu wesentliche Hilfe. Doch außerhalb ihrer Anfangs- und Endpunkte, verliefen die beiden Wege meist getrennt.

Die physikalische Erklärung der Planetenbewegung war im 16. und 17. Jahrhundert bereits ein altes Problem. Weder Aristoteles noch Ptolemäus noch die mittelalterlichen Astronomen hatten die physikalische Ursache einer jeden kleineren Unregelmäßigkeit in der Bewegung eines Planeten angeben können, doch hatte die traditionelle Wissenschaft zumindest die mittlere ostwärtsgerichtete Bewegung aller Planeten um die Ekliptik erklärt. Planeten und Sphären, in die sie eingebettet waren, bestanden aus einem perfekten Himmelselement, dessen Wesen sich in ewigen Drehungen um den Mittelpunkt des Universums zeigte.

Kopernikus hatte versucht, diese traditionelle Erklärung der Planetenbewegung beizubehalten. Doch war die Vorstellung von natürlichen Himmelsbewegungen in einem heliozentrischen Universum weniger natürlich als in einem geozentrischen. Die Probleme in Kopernikus' ursprünglichem Vorschlag blieben nicht lange verborgen. Um auch nur die ostwärtsgerichtete Bewegung der Planeten zu erklären, forderte das kopernikanische System, daß jeder Partikel der Erde in natürlicher Weise um zwei verschiedene Zentren rotieren sollte: den festen Mittelpunkt des Universums und den bewegten Mittelpunkt der Erde. Jedes Teilchen des Mondes wurde gleichzeitig von mindestens drei Zentren gelenkt: dem Zentrum des Universums, dem Zentrum des zugehörigen Planeten und dem Zentrum des Satelliten selbst. Indem die kopernikanische Lehre die Kreisbewegungen zusammensetzte und zahlreiche bewegte und starre Zentren einführte, beendete sie die Glaubwürdigkeit von selbst-erhaltenden Kreisbewegungen. Weiters beraubte die Vielzahl und die Bewegung der verschiedenen Mittelpunkte die kopernikanischen Bewegungen jeder festen Beziehung zur Geometrie des Raumes. In der aristotelischen Physik waren alle natürlichen Bewegungen entweder zum Mittelpunkt des Universums gerichtet, oder weg vom Mittelpunkt, oder in Kreisen um den Mittelpunkt. Jenes Zentrum konnte, obwohl es nur ein geometrischer Punkt war, eine besondere kausale Rolle besitzen, denn es war einzigartig und ein für alle Mal durch seine Beziehung zur Begrenzung des Raumes bestimmt. Anderer-

seits erforderte der kopernikanische Vorschlag, daß einige natürliche Bewegungen von bewegten Mittelpunkten gelenkt würden, bewegte Mittelpunkte konnten nicht allein auf Grund ihrer geometrischen Position in kausaler Weise wirken.

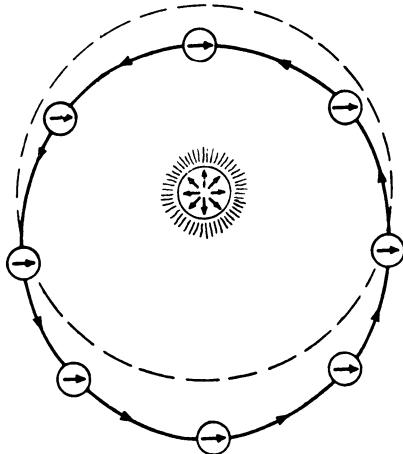
Im späten 16. und frühen 17. Jahrhundert gab es weitere astronomische Ansichten, durch die die Frage nach der physikalischen Ursache der Planetenbewegungen noch brennender wurde. Alle Himmelssphären außer der Sternensphäre waren durch die neuen Kometenbeobachtungen und durch die zunehmende Beliebtheit des tychonischen Systems hinfällig geworden. Mit den Sphären verschwand der gesamte physikalische Mechanismus, der zuvor die mittlere Kreisbewegung der Planeten verursacht hatte. Selbst diese Auflösung der Sphären beendete noch nicht den Einfluß des klassischen Denkens. Noch 1632 konnte Galilei in einem Versuch, die kopernikanische Physik weiterzuentwickeln, in seinem *Dialog über die zwei hauptsächlichen Weltsysteme* argumentieren, daß selbst ohne Himmelssphären alle Materie in natürlicher Weise gleichmäßig und ewig in zusammengesetzten Kreisen rotieren würde. Doch die Brillianz von Galileis Beweisführung – seither kaum in einem größeren wissenschaftlichen Werk erreicht – konnte die grundlegende Unglaubwürdigkeit der Methode nicht lange verbergen. Sein *Dialog* war für die Popularisierung der kopernikanischen Lehre wichtig, seine großartigen Beiträge zur Physik liegen jedoch in anderen Arbeiten. Nach seinem Tod nahm der Fortschritt beim Problem der Planeten eine völlig andere Richtung, weil Keplers Untersuchungen bereits vor Galileis *Dialog* den physikalischen Problemen der kopernikanischen Lehre eine neue Dimension verliehen und neue Methoden zu ihrer Lösung nahe gelegt hatten.

Indem Kepler mit der Vielzahl von Epizykeln und Exzentern aufräumte, ermöglichte er es zum erstenmal, die volle Komplexität der Himmelserscheinungen der physikalischen Analyse zu unterwerfen. Eine Erklärung, die wie bei Kopernikus und Galilei nur die mittlere ostwärts gerichtete Bewegung der Planeten betraf, hörte auf, ausreichend zu sein, selbst wenn sie plausibel schien. Die geometrisch einfachen und genauen elliptischen Bewegungen erforderten nun statt der mittleren Bewegungen eine Erklärung. Die neue Genauigkeit und Einfachheit waren jedoch nur um einen Preis erreicht worden. Im Gegensatz zur mittleren Kreisbewegung der klassischen Astronomie konnten die durch das zweite Gesetz bestimmten elliptischen Bewegungen nicht mehr natürliche Bewegungen sein, denn sie waren nicht mehr bezüglich irgendeines Mittelpunktes symmetrisch. Ein Planet, der sich gleichförmig auf einem Deferenten bewegt, oder sogar auf einem einfachen Epizykel-Deferenten System, bewegt sich in gewisser Weise an jedem Punkt

seiner Bahn „in derselben Weise“; seine Bewegung kann man als „natürlich“ ansehen. Andererseits ändert die Bewegung eines Planeten nach den Keplerschen Gesetzen in jedem Punkt der Bahn die Geschwindigkeit, Richtung und Krümmung. Diese Veränderungen schienen die Einführung einer Kraft zu erfordern, die beständig die Planetenbewegung in jedem Punkt der Bahn verändern mußte. Am Himmel wie auf der Erde konnte eine unsymmetrische Bewegung am leichtesten als Ergebnis fortgesetzter Stöße erklärt werden.

Mit anderen Worten, die kopernikanische Neuerung zerstörte zunächst die traditionelle Erklärung der Planetenbewegung und führte dann in der Keplerschen Modifikation zu einer völlig neuen Auffassung der Himmelsphysik. Diese neue Auffassung zeigte sich erstmalig in den Schriften Keplers um die Wende vom 16. zum 17. Jahrhundert. In ihrem Wesen war sie eine Umkehrung der Methode, die bereits Kopernikus und dann Galilei verwendet hatten, um die irdischen und himmlischen Gesetze in Einklang zu bringen. Kopernikus und Galilei erreichten die Einheitlichkeit, indem sie die traditionelle Vorstellung von natürlichen Kreisbewegungen am Himmel auf die Erde übertrugen. Kepler erreichte dasselbe in einer wesentlich fruchtbareren Weise, indem er die antiken Vorstellungen der von starken Kräften gelenkten irdischen Bewegungen auf den Himmel übertrug. Geleitet von seiner neu-platonischen Vorstellung von der Sonne führte er Kräfte ein, um der Planetenbewegung eine Begründung zu geben. In seinen Schriften war das Sonnensystem erstmalig einer Maschine nachempfunden. Trotz aller Mängel seiner ursprünglichen Idee, gehörte die Zukunft der Keplerschen Methode.

Die ersten Sonnenkräfte Keplers waren die *anima motrix*, die wir kurz im Kapitel 6 besprochen haben. Kepler stellte sie als ein System von Stählen dar, die von der Sonne in der Ebene der Ekliptik ausgingen und mit der Drehung der Sonne mitgeführt wurden. Wenn die bewegten Arme einen Planeten trafen, schoben sie ihn an und führten ihn auf einem Kreis um die Sonne. Um die ursprünglichen Kreisbahnen zu einer Ellipse zu verändern, war eine zweite Kraft notwendig, die den Abstand zwischen der Sonne und dem Planeten in verschiedenen Teilen seiner Bahn verändern sollte. Diese zweite Kraft identifizierte er mit dem Magnetismus, dessen Eigenschaften kurz zuvor in dem wichtigen Buch *On the Magnet* 1600 von dem englischen Arzt William Gilbert erforscht und besprochen worden waren. Gilbert hatte erkannt, daß die Erde selbst ein riesiger Magnet war, und Kepler dehnte diese Vorstellung auf die anderen Körper des Sonnensystems aus. Nicht nur die Erde, sagte Kepler, sondern auch die Planeten und die Sonne sind Magnete, die Anziehungen und Abstoßungen ihrer verschiedenen Pole bestimmen die Bahnen, auf denen sich die Planeten bewegen.



**Bild 48** *Keplers mechanisches Sonnensystem.* Die Sonne befindet sich im Mittelpunkt der Zeichnung, die von ihr ausgehenden Linien stellen die *anima motrix* dar, die den Planeten ohne weitere magnetische Kräfte auf einer Kreisbahn um die Sonne führen würde. Pfeile stellen die Magnete dar, die nach Kepler aus der Kreis- eine Ellipsenbahn machen. Der magnetische Südpol der Sonne befindet sich in ihrem Mittelpunkt, wo er keinen weiteren Einfluß ausübt. Ihr Nordpol ist gleichmäßig über ihre Oberfläche verteilt. Die magnetische Erdachse bleibt stets bei der Erdbewegung fast genau zu sich parallel. Wenn sich also die Erde in der rechten Hälfte der Zeichnung befindet, ist ihr Südpol der Sonne näher als ihr Nordpol, sie wird zur Sonne gezogen. In der anderen Hälfte der Bewegung wird der Planet abgestoßen. An allen Orten ist die Bahngeschwindigkeit dem Abstand des Planeten von der Sonne umgekehrt proportional, da die *anima motrix* in der Sonnen Nähe stärker ist.

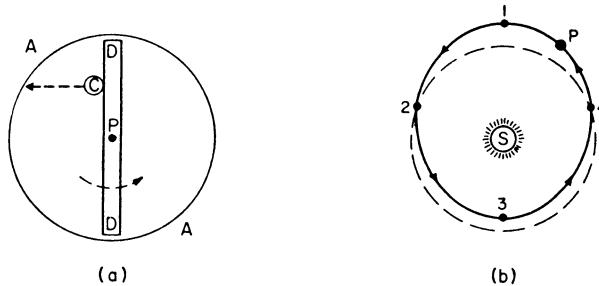
Nur wenige von Keplers Nachfolgern nahmen diese physikalische Theorie, deren Details in Bild 48 gezeigt werden, so ernst wie die mathematische Beschreibung der Planetenbahnen. Einige seiner Vorstellungen waren bereits veraltet, als er sie niederschrieb. Die Sonne rotiert zu langsam, um die beobachteten Umlaufsdauern der Planeten zu erklären; die Richtung der magnetischen Erdachse stimmt nicht mit der überein, die man für astronomische Erklärungen bräuchte. Daher findet man in wissenschaftlichen Schriften des 17. Jahrhunderts nach Keplers Tod sowohl die *anima motrix* als auch die magnetische Sonne nur selten. Doch Keplers Vorstellung vom Sonnensystem als einer von selbst ablaufenden Maschine tauchte immer wieder auf.

Zunächst gab Keplers physikalisches Gesetz, obwohl es von den korpuskularen Vorstellungen völlig unabhängig war, einigen wichtigen Folgerungen der Korpuskulartheorie kräftigste Unterstützung: Es bot einen zweiten natürlichen Zugang zur Vorstellung eines unendlichen funktionslosen Raumes. In Keplers Planetenmechanismus hing die Bewegung eines Planeten nur von seiner Beziehung zu einem anderen Körper, der Sonne, ab. Die Wirkungsweise von Magnetismus und *anima motrix* war unabhängig von der Stellung der Sonne im Universum. Obwohl Kepler die Sonne im Mittelpunkt einer endlichen Sternenkugel dachte, war dies nicht notwendig. Aus völlig verschiedenen Motiven und auf andere Weise hatte die Korpuskeltheorie ähnliche Schlußfolgerungen gezogen.

Keplers Ersetzung der natürlichen, kräftefreien und vom Raum bestimmten Bewegungen der traditionellen Himmelsmechanik durch kraftabhängige Planetenbewegungen spielte eine zweite wesentliche Rolle bei der Entwicklung der Wissenschaft des 17. Jahrhunderts. Keplers mechanisches Sonnensystem steht am Anfang einer Entwicklung, die in Newtons System ihren Höhepunkt findet. In historischer Sicht sind die dazwischenliegenden Entwicklungen äußerst kompliziert. Sie hängen von der mühevollen Entwicklung und Durchsetzung neuer dynamischer Vorstellungen und mathematischer Methoden ab, deren Beschreibung der Gegenstand eines weiteren Buches sein könnte. Doch in begrifflicher Hinsicht ist der Weg von Kepler zu Newton relativ einfach. Einige wichtige Verbesserungen werden Keplers System so umformen, daß es dem Newtonschen sehr ähnlich ist; diese Verbesserungen sind eine direkte Konsequenz der Erkenntnis, welche Rolle die Descartessche Auffassung der kräftefreien Bewegung in der Himmelsmechanik spielt. Das Fehlen dieses Begriffes bei Kepler ist der Hauptpunkt, der sein mechanisches Sonnensystem von ähnlichen unterscheidet, die von Newtons unmittelbaren Vorgängern ersonnen wurden. Zwei dieser späteren Systeme, das des Italieners G. A. Borelli (1608–1679) und das des Engländer Robert Hooke (1635–1703) werden uns sehr nahe an die qualitativen Eigenschaften des Newtonschen Systems heranbringen.

Borellis Verständnis der Bewegung war weit weniger entwickelt als bei Hooke, seine Planetentheorie war deshalb der Keplerschen wesentlich näher. Im Gegensatz zu Kepler erkannte Borelli, daß kein Antrieb notwendig war, nur um die Planeten in Bewegung zu halten. Doch behielt er eine gewisse Art von *anima motrix* bei, um der abstandsabhängigen Veränderung der Geschwindigkeit eines Planeten Rechnung zu tragen. Gelegentlich scheint er aber auch an die *anima motrix* als beständigem Antrieb gedacht zu haben. Sonst ist sein Bruch mit Kepler (und Aristoteles) vollständiger. Borelli er-

kannte insbesondere, und demonstrierte es mit einem Gedankenmodell, das in Bild 49 dargestellt ist, daß kein Anstoß wie der einer *anima motrix* einen Planeten auf einer geschlossenen Bahn bewegen könnte. Außer es wirkte eine andere Kraft, um die Planeten geradlinig zur Sonne zu ziehen, würde nach Borelli jeder von ihnen auf einer geraden Linie tangential zu seiner Bahn wegfliegen und das Sonnensystem vollständig verlassen. Um stabile Bahnen zu erhalten, führte Borelli daher eine zweite Kraft ein, die den



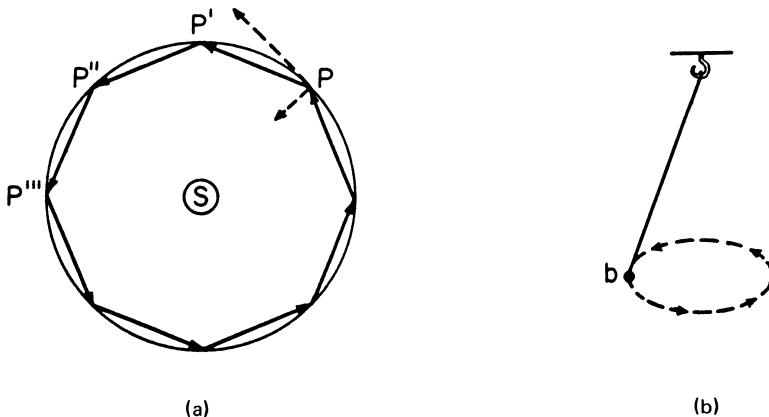
**Bild 49** Borellis Planetentheorie. (a) zeigt sein Modell für die Planetenbewegung, in dem ein Kork C durch den rotierenden Arm DD durch die Schale AA geführt wird. Wenn sich der Arm schnell dreht, bewegt sich der Kork auf einer Spiralfahrt unter dem dominierenden Einfluß seiner Trägheit zum Rand der Schale. Dreht sich der Arm langsam, kommt der Kork auf einer Spirale zum Mittelpunkt der Schale, da die geringfügige zentrifugale Tendenz (auf Grund der langsamen Drehung des Armes) durch die Anziehung zwischen den in C und P befestigten Magneten überwunden wird. Bei einer entsprechenden Geschwindigkeit gleichen sich die zentrifugale und die zentripetale Tendenz aus, die Bahn des Korken wird ein Kreis, die grundlegende kopernikanische Bahn. (b) zeigt Borellis Ableitung der Ellipsenbahn. Bewegt sich der Planet auf dem strichlierten Kreis, gleicht die zentrifugale Tendenz auf Grund der *anima motrix* die Tendenz des Planeten aus, in die Sonne zu stürzen, die Bahn ist daher ein Kreis. Wird statt dessen der Planet auf die dicke Kurve an die Stelle 1 gesetzt, wird seine Bewegung langsamer erfolgen, da durch den größeren Sonnenabstand die *anima motrix* schwächer ist. Daraus würde der Planet auf der dicken Linie der Sonne näher kommen und den strichlierten Kreis in 2 kreuzen; in 3 hätte er genug Geschwindigkeit durch die *anima motrix*, um die Einwärtsbewegung zu beenden; der Planet setzt dann seine Bewegung nach 1 fort. Borelli behauptete, daß die entstehende Bahn eine Ellipse wäre.

davonlaufenden Planeten zurück zur Sonne zog. In seinem Modell benützte Borelli Magnete, um diese Kraft zu simulieren; am Himmel ersetzte er die Kraft durch eine natürliche Tendenz aller Planeten, zur zentralen Sonne zu fallen, und zeigte damit den immer noch anhaltenden Einfluß aristotelischer Vorstellungen.

Borellis Vorstellung vom Sonnensystem wurde in einem Buch 1666 veröffentlicht, im selben Jahr zeigte Robert Hooke die volle Parallelität zwischen den Himmelsbewegungen und denen einer irdischen Maschine. Hooke war stark von Descartes beeinflußt, als er mit einer vollständigen Analyse der kräftefreien Bewegung und der Identität von irdischen und himmlischen Gesetzen begann. Dadurch konnte er sowohl die *anima motrix* als auch die letzten Reste von natürlichen Bewegungstendenzen eliminieren. Ein bewegter Planet sollte nach seiner Meinung seine Bewegung geradlinig durch den Raum fortsetzen, da uns die Sinne sagen, daß ihn nichts stößt oder zieht. Da jedoch die Bewegung nicht geradlinig ist, sondern statt dessen in einer glatten geschlossenen Kurve um die Sonne führt, muß der unmittelbare Sinneseindruck täuschen. Es muß eine zusätzliche Kraft zwischen der Sonne und jedem Planeten wirken. Nach Hooke sollte eine solche Kraft die Planeten von ihren geraden Bahnen zur Sonne lenken, dies ist alles, was ihre kopernikanischen Bahnen erfordern.

Hookes intuitive Vorstellung einer Planetenbewegung ist in Bild 50a dargestellt, allerdings wesentlich weiter ausgearbeitet, als man bei Hooke selbst finden kann. Der ausgezogene Kreis (es könnte auch eine Ellipse sein) ist die Bahn des Planeten. Der Planet wird in  $P$  angenommen, wo er sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Wenn es keine Kraft zwischen der Sonne und dem Planeten gäbe, dann sollte der Planet geradlinig entlang der strichlierten Linie tangential zur Bahn davonfliegen und seine Geschwindigkeit beibehalten. Doch wenn der Planet in  $P$  plötzlich hart zur Sonne gestoßen wird, dann wird er (siehe Bild 46) eine gleichzeitige Bewegung zur Sonne beginnen, die durch die kurze strichlierte radiale Linie in Bild 50a angedeutet ist. Das Resultat beider Bewegungen wird eine neue Bewegung entlang des dicken Pfeiles im Diagramm sein, die die tatsächliche Bahn in  $P'$  trifft. Wird der Planet in  $P'$  wiederum zur Sonne gestoßen, dann beginnt er sich entlang des zweiten dicken Pfeiles zu bewegen, nach  $P''$  und so weiter.

Diese Folge von Stößen bewegt den Planeten aber nicht auf einer glatten Bahnkurve. Statt dessen bewegt sich der Planet auf einem Vieleck. Die Seiten des Vieleckes approximieren die Planetenbahn, und diese Approximation kann beliebig verbessert werden. Man nehme an, daß die Größe der



**Bild 50** Planetentheorie nach Hooke (a) und sein Modellversuch (b). In (a) erhält der Planet in jedem der Punkte  $P, P', \dots$  einen plötzlichen Stoß zur Sonne. Jeder Stoß ändert die Bewegungsrichtung des Planeten, so daß er sich auf dem Umfang eines Vielecks bewegt. Mit der Zunahme der Punkte, an denen der Planet einen Stoß erhält, nimmt die Seitenzahl des Vielecks zu. Im Grenzfall beständiger Stöße erhält man einen Kreis. Eine physikalische Demonstration der Kreisbewegung erhält man mit dem in (b) skizzierten Apparat. Wenn man dem Kugelchen keinen seitlichen Stoß versetzt, wird es durch sein Gewicht zum Mittelpunkt des strichlierten Kreises zurückgezogen. Wird ihm jedoch ein horizontaler Stoß senkrecht zum Faden erteilt, kann das Gewicht die Bahn lediglich zu einer Kurve verformen. Ist der Stoß von der richtigen Größe, kann man eine Kreis- oder Ellipsenbahn erreichen.

in  $P, P', P'', \dots$  ausgeführten Stöße so reduziert wird, daß der Planet in jedem dieser Punkte weniger abgelenkt wird, und daher seine gekrümmte Bahn früher trifft. Man nehme ferner an, daß zur ursprünglichen Reihe von Stößen mit verringriger Stärke weitere Stöße in den Punkten zwischen  $P$  und  $P'$ ,  $P'$  und  $P'' \dots$  dazukommen, wo immer der Planet nun die Bahn trifft. Die entstehende Bewegung wird weiterhin ein Vieleck beschreiben und nicht eine Ellipse oder einen Kreis, doch die Annäherung an den Kreis wird besser sein. Die Approximation wird noch besser, wenn die einzelnen Stöße weiter an Stärke verringert, an Zahl vermehrt werden. Wenn schließlich die Einzelstöße unendlich klein und unendlich zahlreich geworden sind, wird der Planet in jedem Punkt seiner Bahn zur Sonne gelenkt und, wenn die ablenkende Kraft

stets die richtige Stärke hat, wird die entstehende Kurve gerade die erhoffte Kreis- oder Ellipsenbahn sein.

Dies war Hookes Hypothese, sie blieb ziemlich vage. Hooke wußte auch nicht, wie er die Größe einer Kraft zur Größe der hervorgerufenen Ablenkung in Beziehung setzen könnte, und er wußte nicht, wie er aus einer kontinuierlichen Reihe von Ablenkungen eine Ellipse erhalten sollte. Er konnte auch nicht zeigen, daß diese Hypothese gut war. Dies blieb Newton überlassen. Hooke konnte allerdings seiner Idee eine konkrete und verständliche Form geben, indem er ein Modell konstruierte, das Bewegungen wie die Planetenbewegungen unter dem Einfluß einer einzigen zur Mitte gerichteten Kraft zeigte. 1666 schloß er die Vorlesung, deren Inhalt wir gerade angedeutet haben, indem er seinen Kollegen an der Royal Society ein sogenanntes kónisches Pendel (Bild 50b) zeigte, bei dem eine schwere Pendelkugel so an einem Draht aufgehängt war, daß sie sich in jede Richtung bewegen konnte. Wenn das Kückchen geringfügig aus seiner niedrigsten Position herausgezogen wurde, war die einzige auf die Kugel ausgeübte Kraft zur Ruhelage des Pendels gerichtet. Wurde die Kugel nun ausgelassen, schwang sie in einer Ebene wie ein gewöhnliches Pendel hin und her. Wurde jedoch der Kugel, nachdem sie aus der Ruhelage gezogen worden war, ein starker horizontaler Stoß senkrecht zur Richtung zur Ruhelage erteilt, dann schwang sie nicht durch ihren tiefsten Punkt zurück, sondern bewegte sich in einer horizontalen Ebene und durchlief dabei eine kontinuierliche Bahn, wie die eines Planeten. Mit der richtigen Geschwindigkeit angestoßen drehte sich die Kugel in einem horizontalen Kreis. Mit geringfügig anderen Anfangsgeschwindigkeiten bewegte sie sich in einer ellipsen-ähnlichen Bahn. Die nach innen gerichtete Kraft konnte das Kückchen nicht zum Mittelpunkt ziehen, sie lenkte die Bewegung nur in Richtung auf den Mittelpunkt und führte so zu einer kontinuierlichen Kurve. Eine einzige zum Zentrum gerichtete Kraft hatte im Labor eine geschlossene Bahn von der gewünschten Gestalt gegeben. Hooke sagte, daß eine ähnliche Kraft am Himmel denselben Effekt haben müsse.

Hookes Modell machte seine undeutlich ausgedrückte Theorie klar und glaubwürdig, doch es hat daneben auch noch eine andere Bedeutung. Uns bietet das Modell eine wichtige Illustration der ungeheuren und fruchtbaren Verwandlung, die das physikalische Problem der Planeten unter dem Einfluß zuerst der kopernikanischen Lehre allein, dann gemeinsam mit der Korpuskeltheorie erfahren hatte. In Hookes Werk wurde die Erklärung der Planetenbewegung noch viel mehr als bei Kepler und Borelli ein Problem der angewandten Mechanik, im Prinzip mit den irdischen Problemen des Pendels und des Wurfgeschosses identisch. Irdische Experimente geben direkten

Aufschluß über den Himmel, und Himmelsbeobachtungen liefern Information, die sogleich auf der Erde anwendbar ist. Der Zusammenbruch der Trennung Erde – Himmel, der von *De Revolutionibus* eingeleitet und durch die korpuskulare Anschauung erleichtert wurde, ist schließlich vollständig. Kristalline Sphären und andere spezielle Himmelsmechanismen wurden verbannt und durch einen Mechanismus irdischer Art ersetzt. Dieser Mechanismus hatte bewiesen, daß er so gut wie die Sphären des Aristoteles funktionierte.

### *Gravitation und das korpuskulare Universum*

Ein anderes brennendes Problem, das sich aufgrund von Kopernikus' Werk stellte, spielte bei der Entwicklung des neuen Universums eine wesentliche Rolle: Warum fallen schwere Körper zur Oberfläche der bewegten Erde, unabhängig davon, wo sich die Erde im Raum befindet? Obwohl Philosophen gesagt haben, Wissenschaftler sollten nicht solche Fragen stellen – Fragen, die mit „Warum“ beginnen – so wurden sie doch im 17. Jahrhundert gestellt. Descartes, zum Beispiel, gab auf diese spezielle Frage eine Antwort: Freie Körper werden durch den Anstoß von Luftkorpuskeln im Erdwirbel zur Erde getrieben, und diese Antwort wurde allgemein bis nach Newtons Tod geglaubt. Eine andere Lösung war jedoch von früheren Kopernikanern entwickelt worden. Schwere Körper werden zur Erde gezogen, weil ein besonderes anziehendes Prinzip zwischen allen Teilen der Materie wirkt. Sobald diese Annahme modifiziert war, um zumindest einige wesentliche Annahmen der Korpuskeltheorie zu erfüllen, triumphierte die auf dem Prinzip der Anziehung beruhende Antwort über die reine korpuskulare Erklärung von Descartes und seinen Nachfolgern. Zu Ende des Jahrhunderts hatte jenes anziehende Prinzip, das wir heute Schwerkraft nennen, den Schlüssel zu den meisten Bewegungen auf der Erde und allen am Himmel geliefert.

Wie die meisten Vorstellungen, die im 17. Jahrhundert im Schwange waren, hat die Schwerkraft Vorläufer, die bis zur Antike reichen. Einige von Platos Vorläufern hatten zum Beispiel geglaubt, daß ähnliche Substanzen sich anziehen müßten. Doch außer bei der Erforschung der Elektrizität und des Magnetismus fanden diese Prinzipien der Anziehung wenig konkrete Anwendungen, bis die Vorstellung vom Planeten Erde sie wieder zum Leben erweckte. Der noch unerklärte Zusammenhang zwischen diesen zwei offensichtlich verschiedenen Vorstellungen, Schwerkraft und Planet Erde, erscheint bereits in aller Deutlichkeit in einer Passage, die wir aus Oresmes

Kommentar zu Aristoteles' *Über die Himmel* (S. 114) zitiert haben. Nach Oresme könnte es viele Erden im Raum geben, doch auch in diesem Fall müßten die Steine zur Erde fallen, weil sich Materie in natürlicher Weise gegenseitig anzieht und nicht weil sie sich am geometrischen Mittelpunkt des Universums ansammeln möchte.

Im ersten Buch von *De Revolutionibus* hatte ein ähnliches Bedürfnis zu einer Vorstellung wie bei Oresme geführt. „Ich wenigstens bin der Ansicht“, sagte Kopernikus, „daß die Schwere nichts anderes ist als ein gewisses natürliches Streben der Teile, ... damit sie sich in Form einer Kugel ... zusammenschließen.“ (siehe Seite 159). Auch Kepler benützte die Idee einer Anziehung zwischen der Erde und ihren Teilen. Er schlug sogar vor, daß dasselbe Prinzip wechselseitig zwischen der Erde und dem Mond wirken sollte. Nur bei der Betrachtung von Körpern außerhalb des Systems Erde-Mond fühlte Kepler das Bedürfnis nach besonderen Himmelskräften wie der *anima motrix*. Bis Descartes' Erklärung des Gewichts aufgrund der Korpuskeltheorie 1644 veröffentlicht worden war, erklärten die meisten Koperikaner den Fall von Steinen in ähnlicher Weise wie Kepler. Entweder gab es ein besonderes anziehendes Prinzip wie den Magnetismus, mit dessen Hilfe die Erde Steine anzieht und umgekehrt, oder die Steine besaßen eine innere Tendenz, sich zum physikalischen Mittelpunkt der Erde hinzubewegen.

Nach der Mitte des 17. Jahrhunderts wurden diese kopernikanischen Ansichten über den Fall von Steinen rasch auf die neuen Probleme angewandt, die sich durch den Erfolg der neuen Auffassung über die Bewegung ergaben. Zuerst Descartes, dann Borelli, Hooke, Huyghens und Newton, alle erkannten, daß zum Durchlaufen einer geschlossenen Bahn um die Sonne ein Planet beständig in Richtung Sonne „fallen“ müsse, und auf diese Weise seine geradlinige Bewegung zu einer Kurve würde. Als die Notwendigkeit einer Erklärung dieses „Fallens“ erkannt war, adaptierte jeder Koperikaner eine Variante seiner Erklärung des Fallens auf der Erde für die Himmelsgesetze. Descartes' Planeten wurden zur Sonne durch einen korpuskularen Stoß bewegt; Borellis Planeten hatten eine natürliche Tendenz, sich zur Sonne zu bewegen, und bei Hooke wurden sie durch gegenseitige Anziehung zur Sonne gezogen.

Hooke jedoch und Newton unternahmen ungefähr zur gleichen Zeit einen weiteren ungeheuer folgenschweren Schritt. Vermutlich durch Descartes' Idee geleitet, daß derselbe Mechanismus das Fallen auf der Erde und im Himmel bestimmt, schlugen sie vor, daß die Kraft, die die Planeten zur Sonne und den Mond zur Erde zieht, dieselbe Anziehung durch die Schwerkraft ist, die den Fall von Steinen und Äpfeln verursacht. Wir werden vermut-

lich niemals wissen, welcher der beiden zuerst zu dieser Ansicht gelangte. Hooke war zumindest der erste, der dies öffentlich verkündete; seine Aussage aus dem Jahre 1674 ist immer noch als klare Beschreibung einer Vision lesenswert, die dann in Newtons quantitativer und korpuskularer Formulierung die wissenschaftliche Phantasie des 18. und 19. Jahrhunderts geleitet hat. Hooke schrieb:

„[Eines Tages] werde ich ein Weltsystem erklären, das sich in vielen Einzelheiten von allen bisher bekannten unterscheidet und den bekannten Gesetzen der mechanischen Bewegungen voll entspricht. Dieses System hängt von drei Annahmen ab: erstens daß alle Himmelskörper eine anziehende oder Gravitationskraft in Richtung auf ihre eigenen Mittelpunkte haben, wodurch sie nicht nur ihre eigenen Teile anziehen und vor dem Davonfliegen bewahren, wie wir es auf der Erde beobachten können, sondern durch die sie auch die anderen Himmelskörper anziehen, die innerhalb der Sphäre ihrer Aktivität sind. Folglich haben nicht nur Sonne und Mond einen Einfluß auf die Erde und ihre Bahn, wie die Erde auch auf sie, sondern auch Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn üben aufgrund ihrer anziehenden Kräfte beträchtlichen Einfluß auf die Bewegung der Erde aus, wie auch in derselben Weise die entsprechende Anziehungs kraft der Erde jede ihrer Bewegungen beeinflußt. Die zweite Annahme lautet: Daß alle Körper, die in eine einfache Bewegung versetzt werden, sich solange geradlinig vorwärts bewegen, bis sie durch eine andere Kraft abgelenkt und zu einer Bewegung auf etwa einem Kreis, einer Ellipse oder einer anderen komplizierteren Kurve gezwungen werden. Die dritte Annahme ist: daß diese anziehenden Kräfte umso stärker wirken, je näher der Körper, auf den sie wirken, ihren Kraftzentren ist. Ich habe noch nicht experimentell überprüft, wie diese Beziehung genau lautet; doch wenn diese Vorstellung vollkommen ausgearbeitet ist, wie sie es verdient, wird sie dem Astronomen eine wichtige Hilfe bei der Rückführung aller Himmelsbewegungen auf ein bestimmtes Gesetz sein, ohne das Astronomie zweifellos niemals mehr betrieben werden wird.“<sup>1</sup>

Hookes erste zwei Annahmen sind wesentliche Grundlagen des neuen Universums. Trägheit und eine einzige Anziehungskraft, die Schwerkraft, bestimmen sowohl Himmelsbewegungen als auch die Bewegungen irdischer Projektilen. Stillschweigend werden Planeten und Satelliten zu irdischen

Projektilen, ähnlich einer Kanonenkugel, die mit hinreichend großer Geschwindigkeit abgefeuert wurde, so daß sie niemals zur Erde fällt, sondern statt dessen die Erde unaufhörlich umkreist. Newton selbst brachte dieses Bild in seinem *System of the World* und machte es bekannter (Bild 51). Doch die Bemerkungen von Hooke bieten etwas mehr als nur die begrifflichen Grundlagen. Die gerade zitierte Passage verdeutlicht zwei Hauptprobleme, die gelöst werden mußten, bevor das neue Universum vollständig sein konnte. Wie hängt die Gravitationskraft vom Abstand der sich anziehenden Körper ab? Wie kann eine Kenntnis dieses Anziehungsgesetzes zur Vorhersage irdischer und himmlischer Bewegungen verwendet werden?

Zu diesen Problemen konnte Hooke nichts beitragen. Er war nicht Mathematiker genug, um das Anziehungsgesetz aus der Keplerschen Beschreibung der Planetenbahnen abzuleiten; die Instrumente, die er auf die Spitze der St. Pauls Kathedrale und in die Tiefe von Bergwerken brachte, waren zu unempfindlich, um die geringe Veränderung der Schwerkraft in der Nähe der Erdoberfläche zu entdecken. Doch Hooke war nicht der einzige Wissenschaftler, der auf diesem Gebiet arbeitete. Obwohl es weder er noch seine Zeitgenossen wußten, hatte Isaak Newton (1642–1727) unabhängig von Hooke bereits einen wichtigen Teil von dessen qualitativen Vorstellungen abgeleitet. Wenn seine eigenen Zeitangaben über seine Entdeckung verlässlich sind, wußte Newton, wie er Hookes Gravitationsgesetz bestimmten konnte, bereits acht Jahre, bevor obige Passage geschrieben wurde.

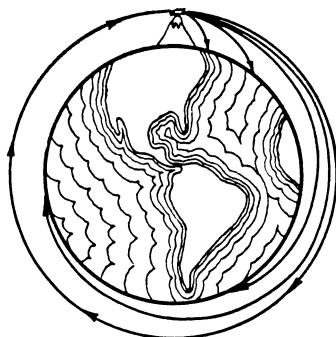


Bild 51

Newton's Darstellung einer Kanonenkugel als Satellit. Bei Vergrößerung der Kugelgeschwindigkeit nimmt die Länge ihrer Flugbahn zu, so daß sie bei hinreichend großer Geschwindigkeit die Erde unaufhörlich auf einer angenähernten Kreisbahn umkreist.

Als sich Newton um 1666 dem Problem zuwandte, konnte er die Geschwindigkeit berechnen, mit der ein Planet zur Sonne fallen muß, oder der Mond zur Erde, damit er auf einer stabilen Kreisbahn bleibt. Nachdem er entdeckt hatte, wie diese mathematische Fallgeschwindigkeit mit der Planetengeschwindigkeit und mit dem Radius seiner Kreisbahn zusammenhang, konnte Newton zwei ungeheuer wichtige physikalische Folgerungen ableiten. Wenn die Geschwindigkeiten der Planeten und ihre Bahnradien zueinander durch das dritte Keplersche Gesetz in Beziehung standen, dann mußte die Anziehung, die die Planeten zur Sonne zog, umgekehrt mit dem Quadrat des Abstandes von der Sonne abnehmen. Ein Planet, der von der Sonne doppelt so weit entfernt wäre, würde nur ein Viertel der Anziehungskraft brauchen, um mit seiner beobachteten Geschwindigkeit auf seiner Kreisbahn zu bleiben. Newtons zweite Entdeckung war gleichermaßen weitreichend. Dasselbe Gesetz des inversen Abstandsquadrats, das die Anziehung zwischen der Sonne und den Planeten bestimmte, würde nach seinen Entdeckungen genauso gut mit den unterschiedlichen Geschwindigkeiten übereinstimmen, mit denen der weit entfernte Mond und ein Stein nahe der Erdoberfläche zur Erde fallen. Dreizehn Jahre später, nachdem er durch eine Kontroverse mit Hooke zu dem Problem zurückgekommen worden war, verallgemeinerte er seine Resultate und zeigte, daß das Gesetz vom inversen Abstandsquadrat sowohl die elliptischen Bahnen des ersten Keplerschen Gesetzes als auch die Geschwindigkeitsveränderungen nach dem zweiten Keplerschen Gesetz erklärt.

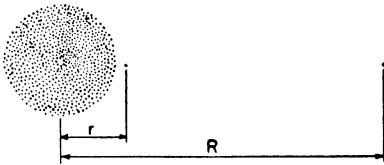
Diese mathematischen Ableitungen waren in der Geschichte der Wissenschaft ohne Vorbild. Sie übertreffen alle anderen Errungenschaften, die aus der neuen von Kopernikus eingeführten Sicht stammen. Es würde den Rahmen unserer elementaren Abhandlung sprengen, wollten wir sie im Detail beschreiben. Mit Newtons Gravitationsgesetz und seinen mathematischen Verfahren konnte zum erstenmal die Gestalt und die Geschwindigkeit von irdischen und himmlischen Bahnen mit vollendeter Genauigkeit berechnet werden. Die Ähnlichkeit einer Kanonenkugel, der Erde, des Mondes und von Planeten wurde nun nicht in einer Vision, sondern durch Zahlen und Messung offenkundig. Mit dieser Errungenschaft erreichte die Wissenschaft des 17. Jahrhunderts ihren Höhepunkt. Doch seltsam genug, damit war die kopernikanische Revolution noch immer nicht zu Ende. Trotz der umfassenden Bedeutung des Konzeptes der Schwerkraft waren weder Newton noch seine Zeitgenossen damit zufrieden. Um 1670 bot die korpuskulare Anschaungsweise den metaphysischen Hintergrund für nahezu die gesamte Forschung, das Konzept der Schwerkraft verletzte die korpuskularen Anschauungen in zwei

wichtigen Punkten. Ein weiteres halbes Jahrhundert von Forschung und Diskussion wurden zur Lösung gebraucht. Im neuen Universum, das schließlich zutage trat, waren sowohl korpuskulare Anschauung als auch Newtons Konzept der Gravitation einmal mehr verändert worden.

Newton, dessen Festhalten an korpuskularen Ansichten vielfach in seinen Briefen und Notizheften verbürgt ist, war sich der metaphysischen Schwäche seines Arbeitskonzeptes der Gravitation bewußt. Dieses Bewußtsein erklärt wahrscheinlich teilweise die Verzögerung, mit der die Resultate seiner frühen Untersuchungen zur Himmelsphysik veröffentlicht wurden. Die *Principia* erschienen erst, als Newton 1685 einen der offensichtlichen Konflikte zwischen der Gravitation und der korpuskularen Anschauung gelöst hatte, und nachdem er viel nutzlose Mühe verwendet hatte, den anderen Konflikt zu lösen.

Der erste Konflikt zwischen korpuskularen Ansichten und Newtons früher Gravitationstheorie zeigte sich in der Rechnung von 1666, die die Erdanziehung auf den entfernten Mond und einen nahen Stein verglich. Durch Vergleich der Fallgeschwindigkeit des Steins mit der des Mondes schloß Newton, daß die Erdanziehung außerhalb ihrer Oberfläche umgekehrt mit dem Quadrat ihres Abstandes zwischen der betrachteten Masse und *dem Erdmittelpunkt* variierte. Die Vorstellung war einfach und entsprach dem Experiment. Weiters galt sie in bester Weise für das gesamte Sonnensystem. Doch entsprach sie nicht der Korpuskeltheorie. Nach der Ansicht ihrer Anhänger kann die Erdanziehung auf ein außerhalb der Erde befindliches Korpuskel nur durch Addition aller Anziehungen erhalten werden, die jedes einzelne Korpuskel innerhalb der Erde auf das einzelne Korpuskel außerhalb ausübt (Bild 52). Wenn das äußere Korpuskel sehr weit von der Erde entfernt ist, ist die Addition leicht. In diesem Fall ist es von jedem Korpuskel in der Erde ungefähr gleich weit entfernt. Jedes Erdkorpuskel übt daher unabhängig von seinem Platz dieselbe Kraft auf das äußere Korpuskel aus. Die totale Kraft muß daher praktisch dieselbe sein, als wenn alle Erdkorpuskeln im Erdmittelpunkt konzentriert wären. Wenn daher die Anziehung der einzelnen Teilchen durch das Newtonsche Gesetz bestimmt ist, muß die Anziehung großer ausgedehnter Körper in großen Abständen vom selben Gesetz bestimmt werden.

Die Addition mikroskopischer Kräfte ist jedoch dann nicht so einfach, wenn das äußere Teilchen der Erdoberfläche nahe ist. In diesem Fall erscheint es höchst unwahrscheinlich, daß sich wiederum ein Gesetz des inversen quadratischen Abstands für die Gesamtkraft ergibt. In der Nähe der Erdoberfläche (Bild 52) ist das äußere Teilchen den nahen Erdkorpuskeln



**Bild 52 Korpuskulare Erklärung des Gesetzes vom Quadrat des Abstands.** Ist Gravitation eine Anziehung zwischen Teilchen, dann muß die gesamte Anziehung der Erde auf ein Teilchen außerhalb der Erde genau die Summe der Anziehungen zwischen den Erdkorpuskeln und dem äußeren Teilchen sein. Es ist keineswegs klar, daß diese Anziehung in einfacher Weise vom Abstand abhängt. Newton konnte jedoch zeigen, daß auch die gesamte Anziehung umgekehrt proportional dem Quadrat des Abstands des Teilchens vom Erdmittelpunkt ist, wenn die Anziehung zwischen den einzelnen Korpuskeln invers zum Quadrat ihres gegenseitigen Abstands ist.

millionenfach näher als denen auf der anderen Seite der Erde. Die benachbarten Korpuskeln üben daher eine wesentlich stärkere Kraft aus als die weiter entfernten. Offensichtlich werden sie fast die gesamte Kraft ausüben, die gesamte Anziehung wird extrem rasch zunehmen, wenn das äußere Teilchen der Erdoberfläche nahe kommt. Der Abstand zum *Erdmittelpunkt* scheint bei der Berechnung der Gesamtkraft auf etwa einen Apfel nahezu irrelevant. Newton konnte jedoch zeigen, daß dies nicht der Fall ist. 1685 bewies er, daß die Erdkorpuskeln unabhängig vom Abstand zum äußeren Korpuskel so behandelt werden können, als ob sie alle im Erdmittelpunkt vereinigt wären. Diese überraschende Entdeckung, die schließlich die Gravitation in die einzelnen Korpuskeln verpflanzte, war das Vorspiel und vielleicht auch die Voraussetzung für die Veröffentlichung der *Principia*. Schließlich konnte noch bewiesen werden, daß Keplers Gesetz und die Bewegung eines Projektils als Resultat einer natürlichen Anziehung zwischen den fundamentalen Korpuskeln erklärt werden können, aus denen die Weltmaschine konstruiert worden war.

Doch nicht einmal diese korpuskulare Vorstellung der Gravitation befriedigte Newton. (Allerdings befriedigte sie bis zum 18. Jahrhundert nur sehr wenige Wissenschaftler.) Den meisten Anhängern der Korpuskeltheorie im 17. Jahrhundert schien die Gravitation als natürliches anziehendes Prinzip viel zu sehr einer aristotelischen „Bewegungstendenz“ ähnlich, die sie einmütig ablehnten. Das große Verdienst von Descartes' System war seine vollständige Elimination all solcher „okkulten Qualitäten“ gewesen. Descartes'

Korpuskeln waren vollständig neutral gewesen. Gewicht war als Resultat von Stoß erklärt worden. Die Vorstellung eines eingebauten anziehenden Prinzips, das in der Ferne wirkte, schien ein Rückgriff auf die mystischen „Sympathien“ und „Potenzen“ zu sein, deretwegen die mittelalterliche Wissenschaft lächerlich geworden war. Newton selbst stimmte damit völlig überein. Er versuchte wiederholt, eine mechanische Erklärung für die Anziehung zu entdecken, und, obwohl er schließlich gezwungen war, sein Versagen einzugestehen, glaubte er weiterhin, daß irgend jemand anderer Erfolg haben würde, daß es „nicht unmöglich wäre, [die Ursache der Gravitation] zu entdecken“.<sup>2</sup> Immer wieder bestand er darauf, daß Gravitation nicht in der Materie verankert sei. In seinem wissenschaftlichen Testament am Ende seines Buches *Opticks* verkündete er: „Uns zu sagen, daß jede Gattung von Dingen mit einer verborgenen spezifischen Qualität [wie der Gravitation] ausgestattet ist, aufgrund deren sie wirkt und sichtbare Effekte hervorruft, bedeutet, uns nichts zu sagen.“<sup>3</sup>

Ich glaube, man kann, ohne Newtons wissenschaftliche Intentionen falsch darzustellen, behaupten, daß er eigentlich wie Descartes ein Werk über die *Prinzipien der Philosophie* schreiben wollte, aber nur durch sein Unvermögen, die Gravitation zu erklären, gezwungen war, sich auf die *Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie* zu beschränken. Ähnlichkeit und Unterschied der Titel der Werke von Newton und Descartes sind bezeichnend. Newton scheint sein Hauptwerk *Principia* als unvollständig angesehen zu haben. Es enthielt nur eine mathematische Beschreibung der Gravitation. Im Gegensatz zu Descartes' *Principia Philosophiae* gab es nicht einmal vor, die Mechanismen des Universums zu erklären. Es gab keine Erklärung für die Gravitation. Doch die Wissenschaft des 20. Jahrhunderts hat Newtons Ahnungen bestätigt – Gravitation kann ohne Rückgriff auf ein natürliches Anziehungsprinzip, das aus der Ferne wirkt, erklärt werden; nur wenige von Newtons Zeitgenossen und Nachfolgern waren willens, seine feinen Unterscheidungen zur Kenntnis zu nehmen. Entweder verwarfene sie die ganze Idee der Gravitation als Rückkehr zum aristotelischen Weltbild, oder sie akzeptierten die Vorstellung und glaubten, daß Newton die Gravitation als innere Eigenschaft der Materie bewiesen hätte.

Der folgende Kampf war heftig. Es dauerte 40 Jahre, bevor sogar an britischen Universitäten die Newtonsche Physik die cartesische verdrängt hatte. Selbst im 18. Jahrhundert suchten immer noch einige Physiker eine mechanisch-korpuskulare Erklärung der Schwerkraft. Wurde auch keine solche Erklärung gefunden, so machte in der Zwischenzeit der Einfluß der *Principia* die Schwerkraft zu einem festen Bestandteil der Wissenschaft. Sie

wurde daher langsam akzeptiert und wurde trotz Newtons gegenteiliger Ansicht zu einer inneren Eigenschaft der kleinsten Bestandteile der Materie.

Als Folge davon wurde die korpuskulare Philosophie umgeformt und die Suche nach Kräften begann. Zu Beginn der *Principia* hatte Newton gesagt:

Ich bin aus vielen Gründen geneigt anzunehmen, daß ... [alle Naturscheinungen] von bestimmten Kräften abhängen, durch die die Teilchen von Körpern aufgrund bisher unbekannter Ursachen entweder wechselseitig gegeneinander gestoßen werden und in regulären Körpern zusammenhängen, oder auseinandergetrieben von einander wegstreben<sup>4</sup>.

Und gegen das Ende seiner *Opticks* schrieb er nach einer langen Reihe von Fragen zu den Resultaten korpuskularer Wirkung:

Nachdem ich alle diese Dinge untersucht habe, scheint es mir wahrscheinlich, daß Gott am Anfang die Materie in festen, massiven, harten, undurchdringlichen, beweglichen Teilchen von solchen Größen und Gestalten und Proportionen geschaffen hat, wie sie für den ihnen zuge dachten Zweck am besten entsprechen ... Und damit die Natur bestehen kann, sind die Änderungen der körperlichen Dinge nur in den verschiedenen Trennungen, Neuzusammenfügungen und Bewegungen dieser permanenten Teilchen enthalten ... Mir scheint ferner, daß diese Teilchen nicht nur eine *Vis inertiae* [Trägheitskraft] besitzen und als natürliches Ergebnis dieser Kraft passiven Bewegungsgesetzen unterworfen sind, sondern daß sie auch durch gewisse aktive Prinzipien bewegt werden, wie die Gravitation und jene Kraft, die die [chemische] Fermentation und den Zusammenhalt von Körpern verursacht.<sup>5</sup>

Mit diesen Voraussetzungen hat Newton mit noch nie dagewesener Genauigkeit die meisten bekannten Erscheinungen der Optik und alle bekannten Erscheinungen der Himmels- und der irdischen Mechanik unter Einschluß der Gezeiten und der Vorrückung der Äquinoktien erklärt. Von diesem Ausgangspunkt aus suchten seine Nachfolger die zusätzlichen Kraftgesetze zu entdecken, die zur Beschreibung der restlichen Naturscheinungen erforderlich waren: Wärme, Elektrizität, Magnetismus, Kohäsion und schließlich die chemische Bindung. Schließlich war das zusammenbrechende aristotelische Universum durch ein neues umfassendes und geschlossenes Weltbild ersetzt, ein neues Kapitel in dem sich immer weiter entwickelnden Naturverständnis des Menschen hatte begonnen.

## *Das neue Gedankengebäude*

Die Konstruktion von Newtons korpuskularer Weltmaschine vervollständigte die Umwälzung der Vorstellungen, die Kopernikus eineinhalb Jahrhunderte zuvor begonnen hatte. In diesem neuen Universum waren die von Kopernikus aufgeworfenen Fragen endlich gelöst, die kopernikanische Astronomie wurde zum ersten Mal in physikalischer und kosmologischer Hinsicht glaubwürdig, und die Beziehung der Erde zu den anderen Körpern im Universum war wiederum definiert. Die Menschen wußten nun, warum ein in den Raum gefeuertes Projektil zu dem Punkt zurückkehren würde, von dem es abgeschossen wurde, obwohl sie jetzt wußten, daß der Schuß nicht völlig senkrecht abgefeuert werden durfte. Erst als durch die Verbreitung und Aufnahme dieser neuen Vorstellungen die kopernikanische Lehre glaubwürdig wurde, verschwand die letzte bedeutende Opposition gegen die Vorstellung vom Planeten Erde. Newtons Universum war jedoch nicht bloß ein Rahmen für die kopernikanische Planetentheorie. Weit wichtiger war es als neue Möglichkeit, die Natur, den Menschen und Gott zu betrachten – eine neue wissenschaftliche und kosmologische Perspektive, die im 18. und 19. Jahrhundert immer wieder die Wissenschaft bereicherte und religiöse und politische Philosophie mitgestaltete.

Dieselben Newtonschen Prinzipien, die durch die Ableitung und Erklärung der Keplerschen Gesetze die astronomische Revolution abschlossen, lieferten der Astronomie viele wichtige neue Forschungsmethoden: Als verbesserte Teleskopbeobachtungen zeigten, daß die Planeten nicht völlig den Keplerschen Gesetzen gehorchen, erlaubte es die Newtonsche Physik, die geringfügigen Abweichungen der Planeten von ihren fundamentalen elliptischen Bahnen zu erklären und zu berechnen. Wie Newtons Ableitung gezeigt hatte, gilt Keplers Gesetz nur dann streng, wenn die Sonne als einzige eine anziehende Kraft auf jeden Planeten ausübt. Doch die Planeten ziehen sich auch gegenseitig an, besonders wenn sie sich nahe sind, und diese zusätzliche Anziehung stört ihre fundamentalen Bahnen und ändert ihre Geschwindigkeiten. Im 18. Jahrhundert konnten die Astronomen mit Hilfe mathematischer Verfeinerungen von Newtons Werk diese Abweichungen mit großer Genauigkeit vorhersagen, im 19. Jahrhundert führte die Umkehrung dieser Methode zu einem der größten Triumphen der Astronomie. 1846 sagten unabhängig voneinander Leverrier in Frankreich und Adams in England die Existenz und die Bahn eines bisher unbekannten Planeten voraus, den sie für die Ursache von unerklärten Unregelmäßigkeiten in der Bahn des Planeten Uranus hielten. Als das Fernrohr auf den Himmel gerichtet wurde, wurde der neue

Planet Neptun, schwach sichtbar, innerhalb eines Grades von der vorhergesagten Stelle entdeckt.

Man könnte fast endlos Beispiele für die Fruchtbarkeit von Newtons Vorstellungen in der Astronomie geben, doch war die Astronomie nicht die einzige betroffene Wissenschaft. Um nur eines von vielen Beispielen zu nennen, bedenken wir den Einfluß von Newtons Werk auf die chemische Experimentiertechnik im 18. Jahrhundert. Trotz Newtons deutlich geäußerter Ansicht glaubten die meisten seiner Nachfolger, daß Gravitation, und daher auch Gewicht, Eigenschaften der Materie wären. Dadurch erlangte das Gewicht eine neue Bedeutung in der Wissenschaft. Zum ersten Mal wurde es ein allgemein anerkanntes Maß für den Betrag an Materie. Die Waage wurde daher ein wichtiges chemisches Instrument. Nur die Waage konnte dem Chemiker sagen, wieviel Materie in einer chemischen Reaktion verwickelt war, wieviel Materie entstand. Seit dem Altertum hatten die Chemiker geglaubt, daß der Betrag an Materie in chemischen Reaktionen erhalten war, doch hatte es kein allgemein anerkanntes Maß dieses „Betrages an Materie“ gegeben.

Im aristotelischen und sogar noch im cartesischen Denken hielt man Gewicht ähnlich der Farbe oder der Härte für ein sekundäres Merkmal der Materie, eines das durch chemische Reaktionen verändert werden könnte. Daß man begann, chemische Reaktionen zu „wägen“ und zu bestimmen, ob Materie verloren wurde oder aus einer unerwarteten Quelle während solcher Reaktionen hinzugefügt wurde, war daher zum Teil ein Ergebnis der Newtonschen Lehre. Dieses neue Hilfsmittel war eine wichtige Wurzel der Umwälzung im chemischen Denken, deren Hauptvertreter der Franzose Lavoisier gegen Ende des 18. Jahrhunderts war.

Man müßte ein ganzes Buch der ausführlichen Beschreibung dieser zwei Beispiele, der Entdeckung des Neptun und der neuen Bedeutung des Gewichtes, verwenden, und die Diskussion der Auswirkung des neuen Universums auf die Wissenschaft wäre immer noch unvollständig. In dem Weltbild, das rund um das neue Universum entstand, wurde auch das nichtwissenschaftliche Denken verändert. Im unendlichen und vielfach bewohnten Universum, wie es sich die Wissenschaftler und Philosophen vorstellten, wurde die Lokalisierung des Paradieses am Himmel und der Hölle tief in der Erde zu bloßen Metaphern, und was einst konkrete geographische Bedeutung hatte, wurde nun zu Symbolen. Gleichzeitig veränderte die Vorstellung eines Universums, das aus Atomen bestand, die sich auf ewig nach gottgegebenen Gesetzen bewegten, die Vorstellung vieler Menschen von der Gottheit selbst. In dem als Uhrwerk verstandenen Universum schien Gott häufig nur der Uhrmacher zu sein, das Wesen, das die atomaren Teile geformt hatte, ihre Bewegungsgesetze

aufgestellt hatte, sie in Schwung gebracht hatte und sie dann sich selbst überlassen hatte. Der Deismus, eine verfeinerte Version dieser Ansicht, war ein wichtiger Bestandteil des Denkens an der Wende vom 17. zum 18. Jahrhundert. Mit seiner immer größeren Verbreitung nahm der Glaube an Wunder ab, denn Wunder waren eine Aufhebung der mechanischen Gesetze und ein direkter Eingriff durch Gott und seine Engel in irdische Affären. Zum Ende des 18. Jahrhunderts sahen immer mehr Menschen, Wissenschaftler und Nichtwissenschaftler, keine Notwendigkeit, die Existenz Gottes anzunehmen.

Andere Auswirkungen der neuen Wissenschaft können in der politischen Philosophie des 18. und 19. Jahrhunderts entdeckt werden. Erst kürzlich haben einige Autoren auf die interessanten Parallelen zwischen der Vorstellung eines mechanisch funktionierenden Sonnensystems aus dem 17. Jahrhundert und der einer reibungslos ablaufenden Gesellschaft aus dem 18. Jahrhundert hingewiesen. Das System der Kontrollen und Gleichgewichte, das in die Verfassung der Vereinigten Staaten aufgenommen wurde, sollte der neuen amerikanischen Gesellschaft dieselbe Stabilität gegenüber zerstörerischen Kräften geben, die die genaue Kompensation von Trägheitskräften und Gravitationsanziehung dem Newtonschen Sonnensystem gegeben hatte. In gleicher Weise mag der feste Glaube des 18. Jahrhunderts, mit dem die Eigenschaften einer guten Gesellschaft aus den angeborenen Merkmalen des einzelnen Menschen abgeleitet wurden, zum Teil in den korpuskularen Anschauungen des 17. Jahrhunderts begründet sein. Im Denken des 18. und 19. Jahrhunderts kommt das Individuum immer wieder als das Atom vor, aus dem der Mechanismus, nämlich die Gesellschaft besteht. In den Eingangsparagraphen der Unabhängigkeitserklärung leitet Jefferson das Recht zur Revolution aus den gottgegebenen oder unabdingbaren Rechten des sozialen Atoms, des Menschen, ab und seine Ableitung scheint diejenige widerzuspiegeln, in der Newton ein Jahrhundert zuvor das Funktionieren der Natur aus gottgegebenen oder angeborenen Eigenschaften der einzelnen physikalischen Atome abgeleitet hatte.

Selbst diese wenigen ungleichartigen und nicht vollausgearbeiteten Beispiele zeigen, daß mit der Schöpfung des Newtonschen Universums unsere Geschichte einen vollen Kreis durchlaufen hat. Was das aristotelische Universum für die geozentrische Astronomie getan hatte, das bedeutete das Newtonsche Universum für die kopernikanische Astronomie. Jedes war eine Weltanschauung, die die Astronomie mit anderen Wissenschaften und mit dem nichtwissenschaftlichen Denken verknüpfte. Jedes war eine Möglichkeit, Wissen zu ordnen, zu bewerten und zu vermehren; jedes dominierte die Wissenschaft und Philosophie eines Zeitalters. Nachdem wir diesen Kreis von

Weltbild zu Weltbild durchlaufen haben, verstehen wir endlich, wie er von Kopernikus' astronomischer Neueinführung abhängt. Die Vorstellung vom Planeten Erde war der erste erfolgreiche Bruch mit einem wesentlichen Element der antiken Weltsicht. Obwohl nur als astronomische Reform beabsichtigt, hatte sie eine zerstörerische Wirkung, die nur in einem neuen Gedankengebäude beendet werden konnte. Kopernikus selbst trug zu diesem Gebäude nichts bei. Seine eigene Vorstellung vom Universum stand der aristotelischen näher als der Newtons. Doch die neuen Probleme und Anregungen, die sich aus seiner Entdeckung ableiteten, sind in der Entwicklung des neuen Universums die wichtigsten Marksteine.

Die Bedeutung der kopernikanischen Revolution erschöpft sich jedoch nicht in ihrem Beitrag zur Geschichte. Sie illustriert den fortgesetzten Kreisprozeß, durch den Wissen wächst, dadurch hat die kopernikanische Revolution eine tiefere Bedeutung. Die letzten zweieinhalb Jahrhunderte haben gezeigt, daß die neue Vorstellung vom Universum ein wesentlich wirkungsvollereres intellektuelles Werkzeug war als die aristotelischen und ptolemäischen Vorstellungen. Die wissenschaftliche Kosmologie des 17. Jahrhunderts und die ihr zugrunde liegenden Konzepte von Raum, Kraft und Materie bestimmten die Bewegungen im Himmel und auf der Erde mit einer in der Antike nie geträumten Genauigkeit. Zusätzlich leiteten sie viele neue und ungeheuer ergiebige Untersuchungen, die eine Vielzahl bisher unerwarteter Naturerscheinungen enthüllten und Ordnung in Erfahrungsgebieten zeigte, die bisher dem Menschen durch das antike Weltbild verschlossen geblieben waren. Dies sind permanente Errungenschaften. Solange die Tradition abendländischer Wissenschaft besteht, werden die Wissenschaftler die Erscheinungen erklären können, die zuerst durch die Newtonschen Vorstellungen aufgeklärt wurden, genauso wie Newton die weniger zahlreichen Phänomene erklären konnte, die bereits Aristoteles und Ptolemäus erklärt hatte. So schreitet die Wissenschaft fort: Jedes neue Weltbild umfaßt die Erscheinungen, die von seinem Vorgänger erklärt wurden und fügt neue hinzu.

Wenn auch die Errungenschaften von Kopernikus und Newton permanent sind, ihre Vorstellungen sind es nicht. Mit dem Fortschritt der Wissenschaft werden immer wieder Konzepte aufgehoben und ersetzt, Newtons Vorstellungen scheinen heute keine Ausnahme zu bilden. Wie im aristotelischen Bild zuvor entwickelten sich im Newtonschen Probleme – diesmal im Bereich der Physik – die mit dem bestehenden Weltbild nicht mehr in Einklang gebracht werden konnten. Seit einem halben Jahrhundert stehen wir mitten in der resultierenden Umwälzung der Vorstellungen, eine Umwälzung, die wiederum die Vorstellung des Wissenschaftlers, wenn auch noch nicht

des Laien, über Raum, Materie, Kraft und die Struktur des Universums verändert. Weil die Newtonschen Vorstellungen immer noch eine einfache Zusammenfassung einer großen Menge an Information bilden, werden sie noch benutzt. In zunehmendem Maß werden sie jedoch nur mehr wegen ihrer Ökonomie verwendet, so wie das antike Zwei-Kugel-Universum noch vom modernen Seefahrer und Vermesser verwendet wird. Sie sind noch immer eine nützliche Gedächtnissstütze, doch verlieren sie ihre Bedeutung als verlässlichem Führer ins Unbekannte.

Daher erweist sich Newtons Universum nicht endgültiger als seine Vorgänger, obwohl es wesentlich wirkungsvoller ist. Auch ist seine Geschichte, betrachtet als eines von vielen Kapiteln in der Entwicklung menschlichen Denkens, in seiner Struktur nicht sehr von der des geozentrischen Universums verschieden, das von Kopernikus und Newton zerstört wurde. Dieses Buch ist nur ein langes Kapitel einer sich immer weiter fortsetzenden Geschichte.

# Technischer Anhang

## 1 Korrektur der Sonnenzeit

In den zentralen Kapiteln dieses Buches haben wir angenommen, daß die Zeit, die die Sterne für einen vollständigen Umlauf ihrer Tageskreise brauchen, stets genau 4 Minuten (oder etwas genauer 3 Minuten 56 Sekunden) kürzer ist als der Sonnentag, wenn dieser als die Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden lokalen Mittagen definiert wird. Wie wir jedoch in einer Fußnote zu Kapitel 1 hingewiesen haben, ist dies nicht ganz richtig. Wenn die Intervalle zwischen aufeinanderfolgenden lokalen Mittagen vollkommen regelmäßig sind, dann müssen sich die Sterne mit ungleichmäßiger Geschwindigkeit bewegen. Wenn umgekehrt die Sterne aufeinander folgende Tageskreise in gleichen Zeitintervallen vollenden, dann müssen die Längen aufeinanderfolgender Sonnentage variieren. Diese Tatsache wurde in der Antike spätestens zur Zeit des Ptolemäus erkannt. Um sie zu verstehen, wollen wir wie die Menschen der Antike annehmen, daß die scheinbare Bewegung der Sterne vollkommen gleichmäßig ist, so daß die Sterne eine fundamentale Zeitskala liefern. Wir werden dann zwei verschiedene Gründe sehen, warum die Intervalle zwischen den lokalen Mittagen verschieden lang sein müssen.

Die erste Ursache der Ungleichmäßigkeit der Sonnenzeit ist die Veränderlichkeit der Geschwindigkeit, mit der sich die Sonne durch die Tierkreiszeichen zu bewegen scheint. Wie wir in Kapitel 2 gesehen haben, bewegt sich die Sonne auf der Ekliptik vom Herbst- zum Frühlingsäquinoktium schneller als auf der zweiten Hälfte ihrer Bahn. Daher scheint sie in ihrem täglichen Wettlauf mit den Sternen im Winter mehr hinter ihnen zurückzubleiben als im Sommer, so daß die Sonne, wenn die Zeit mittels der Sterne gemessen wird, im Winter länger braucht, ihre maximale Tageshöhe zu erreichen, als im Sommer. Es folgt daraus, daß der Sonnentag zur Wintersonnenwende am längsten, zur Sommersonnenwende am kürzesten sein sollte. Dies wäre auch der Fall, wenn es daneben nicht eine weitere Ungleichmäßigkeit gäbe.

Die zweite Ursache der Veränderlichkeit des wahren Sonnentages ist der Winkel, unter dem die Ekliptik den Äquator auf der Himmelskugel schneidet. Um diesen Effekt zu verstehen, sollten wir einen Blick auf Bild 13 im ersten Kapitel werfen und uns vorstellen, daß im gleichen Abstand Längenkreise gezogen werden, wie sie auf jedem Erdglobus zu finden sind. Der Einfachheit halber wollen wir zusätzlich annehmen, daß die Bewegung der

Sonne auf der Ekliptik vollständig gleichmäßig ist und ein Grad pro Tag entlang des Großkreises beträgt. Es zeigt sich dann, daß durch die Neigung der Ekliptik gegen den Äquator die gesamte *ostwärts* gerichtete Bewegung der Sonne von Tag zu Tag variiert. In der Nähe der Sonnenwenden ist die scheinbare Bewegung der Sonne gegenüber den Sternen nahezu parallel zum Himmelsäquator. Sie bewegt sich zusätzlich auf einem Teil der Kugel, wo die Längenkreise einander etwas näher als am Äquator sind. Dadurch beträgt die gesamte Bewegung der Sonne etwas mehr als ein Grad himmlischer Länge pro Tag, die Himmelskugel muß sich daher in westlicher Richtung um etwas mehr als 361 Grad drehen, um die Sonne von einem zum nächsten lokalen Mittag zu bringen. An den Äquinoktien ist die Situation völlig anders. Die Längenkreise haben auf der Kugel ihren maximalen Abstand, außerdem ist die Sonnenbewegung nach Nordosten oder Südosten gerichtet, die Gesamtbewegung der Sonne beträgt daher weniger als ein Grad pro Tag. Daher muß die Himmelskugel um knapp 361 Grad rotieren, um die Sonne zu ihrem nächsten Höchststand zu bringen. Für sich betrachtet, macht dieser Effekt den wahren Sonnentag an den Sonnenwenden am längsten, an den Äquinoktien am kürzesten.

Um diesen beiden Unregelmäßigkeiten Rechnung zu tragen, haben die modernen Zivilisationen eine Zeitskala angenommen, die mittlere Sonnenzeit, deren Zeiteinheit die mittlere Länge des wahren Sonnentages ist. Auf dieser Skala bewegen sich die Sterne nach Definition vollkommen regelmäßig und vollenden ihre Tagesumläufe in genau 23 Stunden 56 Minuten 4,091 Sekunden. Doch macht die Skala, die die Sterne gleichmäßig laufen läßt, die Sonne ungleichmäßig. Zum Beispiel tritt der Sonnenhöchststand äußerst selten zum lokalen Mittag nach mittlerer Sonnenzeit ein. Sonnenuhren messen als einzige Instrumente die wahre Sonnenzeit, ihre Angabe stimmt also nicht mit der von unseren Uhren oder den Zeitsignalen im Radio bestimmten Zeit überein. Im Dezember und Jänner, wenn beide oben diskutierten Effekte den wahren Sonnentag verkürzen, ist das Intervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Höchstständen der Sonne fast genau eine halbe Minute kürzer als der mittlere Sonnentag. Außerdem ist der Effekt dieser kleinen Diskrepanz kumulativ – viele Tage hinter einander verläuft die wahre Sonnenzeit langsamer als die mittlere, so daß zu einer bestimmten Jahreszeit die Sonne ihren Höchststand fast 20 Minuten vor dem Mittag nach der mittleren Sonnenzeit erreicht. Zu anderen Jahreszeiten verstreicht die wahre Sonnenzeit schneller als die mittlere, über das Jahr gleichen sich die Effekte aus. Wenn man von der Sonnenuhr eine genaue Zeitangabe der mittleren Sonnenzeit erhalten möchte,

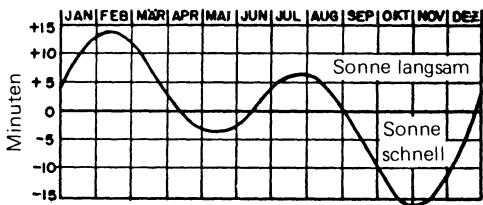


Bild 53

Darstellung der Zeitgleichung, die die jährliche Variation der Differenz zwischen mittlerer und wahrer Sonnenzeit angibt.

muß man sie unter Verwendung einer Tabelle oder eines Diagrammes wie in Bild 53 korrigieren.

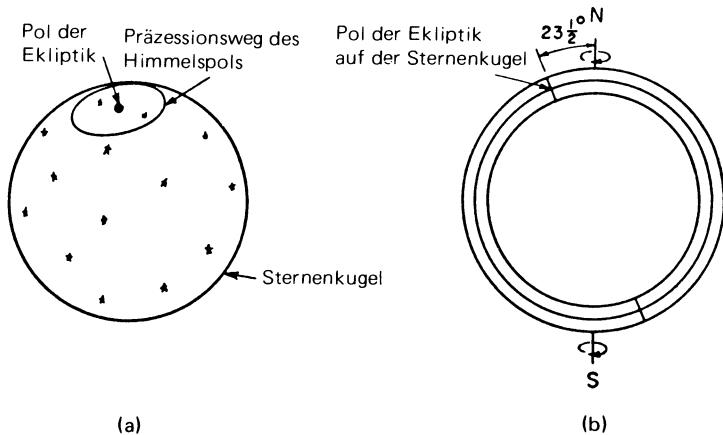
Die vorangegangene Diskussion benutzt die scheinbare Bewegung der Sterne als Zeitstandard. Klärerweise ist diese Wahl völlig willkürlich. Man könnte genausogut die scheinbare Bewegung der Sonne als unseren Zeitstandard wählen, die Sterne würden sich dann nach dieser Zeitskala unregelmäßig bewegen. Jedoch wäre die Wahl der Sonne als Standard der Gleichmäßigkeit für Wissenschaft und Alltagsleben äußerst unbequem. Man müßte das Diagramm von Bild 53 statt auf Sonnenuhren auf alle anderen Uhren anwenden. Die Erdrotation würde sich mit einer immer wieder verändernden Geschwindigkeit abspielen. Die Wahl der Sterne als Standard vermeidet diese Unannehmlichkeiten und entspricht allen praktischen und den meisten wissenschaftlichen Anforderungen.

Und doch hat sie sich für die Wissenschaft als nicht vollständig adäquat herausgestellt: Die in Newtons Bewegungsgesetzen versteckt enthaltene Zeitskala stimmt nicht völlig mit dem Sternenstandard überein. Aus Newtons Gesetzen, wie man sie heute versteht, kann man zeigen, daß sich die Erdrotation aufgrund der Gezeitenreibung allmählich verlangsamt. Entweder müßte man die Newtonschen Gesetze oder den Standard anpassen. Überlegungen wissenschaftlicher Zweckmäßigkeit legen die Suche nach einem neuen Standard nahe. Für die Praxis hat allerdings der theoretische Mangel des Sternenstandards keine Bedeutung. Umso mehr Bedeutung hat er für die Wissenschaft, daher haben die Wissenschaftler die Suche nach einer neuen Uhr, die mit der Zeitskala einer wissenschaftlichen Theorie besser als die Himmelsmaschine selbst übereinstimmt, aufgenommen. (Anmerkung des Übersetzers: Die neue Zeitskala wird mit Hilfe der Eigenschaften bestimmter Atome definiert).

## 2 Das Vorrücken der Äquinoktien

Eine zweite Vereinfachung in unserem Buch war die Vernachlässigung der Präzession der Äquinoktien. Dieser kurz in Kapitel 1 erwähnte Effekt führt zu einer langsamen Bewegung des Himmelspoles gegenüber den Sternen. Würden wir uns nur für Beobachtungen ohne Instrumente im Lauf des Lebens eines einzigen Astronomen interessieren, unsere Vereinfachung wäre durchaus angebracht: Beobachtungen ohne Instrument können diese Ungenauigkeit nur dann zeigen, wenn sie zu weit verschiedenen Zeitpunkten gemacht werden. Beobachtungen etwa, die zwei Jahrhunderte auseinander liegen, zeigen bereits, daß sich der Himmelpol, um den sich die Sterne bewegen, langsam mit einer Geschwindigkeit von etwas mehr als 0,5 Grad pro Jahrhundert gegenüber den Sternen bewegt, während die Sterne selbst ihre relative Lage beibehalten. Beobachtungen, die sich über wesentlich längere Zeitschnitte erstrecken, enthüllen das Bild dieser vorrückenden Bewegung: Während die Jahrhunderte verstreichen, bewegt sich der Himmelpol langsam auf einem Kreis und vollendet eine Umdrehung in 26 000 Jahren. Der Mittelpunkt dieses Kreises ist der Pol der Ekliptik – der Punkt, an dem ein Durchmesser senkrecht zur Ebene der Ekliptik die Himmelskugel schneidet, der Radius des Kreises ist genau 23 1/2 Grad, derselbe Winkel, unter dem der Himmelsäquator die Ekliptik auf der Sternenkugel schneidet (Bild 54a).

Die Präzessionsbewegung scheint erstmalig vom hellenistischen Astronomen Hipparch im zweiten vorchristlichen Jahrhundert erkannt worden zu sein, und wurde von etlichen nachfolgenden Astronomen, unter ihnen Ptolemäus diskutiert. Die meisten moslemischen Nachfolger des Ptolemäus beschrieben ebenfalls diesen Effekt und fügten dem antiken System eine neunte Kugel hinzu, um ihn physikalisch zu erklären. Ihre beliebteste Erklärung wird in Bild 54b gezeigt, die die drei äußersten Sphären zeigt: N und S sind Himmelsnord- und Südpol, die äußere Kugel rotiert um sie in westlicher Richtung einmal in 23 Stunden 56 Minuten, genauso, wie die Sternensphäre im alten System rotiert hatte. Die nächste Sphäre, in der Zeichnung die mittlere, trägt die Sterne und ist mit der äußersten durch eine Achse verbunden, die durch die Pole der Ekliptik auf der Sternenkugel und durch zwei Punkte 23 1/2 Grad von den Polen der äußeren Sphäre entfernt geht. Diese neue Sternensphäre wird von der äußersten Sphäre einmal täglich herumgedreht (dies trägt der täglichen Sternenbewegung Rechnung). Zusätzlich hat sie eine eigene langsame Bewegung, eine Umdrehung alle 26 000 Jahre, die langsam die Beziehungen zwischen den einzelnen Sternen und den Himmelspolen verändert. Die innerste der drei Sphären ist die Sphäre des Saturn, sie ist dick



**Bild 54 Die Präzession der Äquinoktien.** (a) zeigt den Kreis auf der Himmelskugel, auf dem sich der Himmelspol einmal in 26 000 Jahren herum bewegt. Der Mittelpunkt des Kreises ist der Pol der Ekliptik, alle Punkte des Kreises sind genau  $23\frac{1}{2}$  Grad vom Mittelpunkt entfernt. (b) zeigt, wie die Araber die Präzession mit einer neunten Sphäre, der äußersten in der Zeichnung, erklärten. Diese neunte Kugel dreht sich einmal in 23 Stunden 56 Minuten wie früher die achte Sphäre. Die achte Sphäre mit den Sternen dreht sich einmal in 26 000 Jahren, wodurch sie die Position des Himmelspols gegenüber den Sternen langsam verändert. Innerhalb der achten Kugel befindet sich die Saturnsphäre, usw. wie im alten System.

gezeichnet, um den epizyklischen Komponenten der Saturnbewegungen Platz zu geben. Durch eine Achse durch die Pole der Ekliptik mit der Sternenkugel verbunden beschreibt diese dicke Sphäre die mittleren Kreisbewegungen des Saturn gegenüber den Sternen.

Innerhalb des antiken und mittelalterlichen astronomischen Denkens scheint diese Erklärung der Präzession mit Hilfe einer 9. Sphäre einfach und natürlich. Tatsächlich kann man sie gut mit Kopernikus' Erklärung vergleichen, einer langsamen kegelförmigen Bewegung der Erdachse, die im Lauf von 26 000 Jahren auf alle Punkte eines Kreises vom Radius  $23\frac{1}{2}$  Grad um den Pol der Ekliptik gerichtet ist. Bis Newton die Präzession als physikalische Konsequenz der Gravitationsanziehung des Mondes auf den äquatorialen Wulst der Erde erklärte, mußten die Astronomen in der Nachfolge von Ptolemäus und Kopernikus eine zusätzliche und physikalisch überflüssige Bewe-

gung annehmen, um den Effekt zu erklären\*). Die Präzession hat daher keine logische Bedeutung für den Übergang vom geozentrischen zum heliozentrischen Universum.

In historischer Sicht spielte jedoch das Problem der Erklärung der Präzession eine wichtige Rolle am Beginn der kopernikanischen Revolution. Sie half mit, die ptolemäische Astronomie als Monster erscheinen zu lassen. Die Konsequenzen der Präzession für die Beobachtungen sind sogar dann äußerst klein, wenn sich die Beobachtungen über einige Jahrhunderte erstrecken, ein kleiner Fehler in den Daten kann daher die Beschreibung der Gesamterscheinung radikal verändern. Hipparch und Ptolemäus beschrieben die Präzession in einer Weise, die qualitativ der in Bild 54 dargestellten äquivalent ist, doch viele ihrer Zeitgenossen leugneten die Existenz des Effektes vollständig oder beschrieben ihn ganz anders. Besonders in der islamischen Welt gab es viele unterschiedliche Beschreibungsweisen der Präzession. Über ihre Geschwindigkeit bestand keine Einheitlichkeit — tatsächlich glaubten viele Astronomen, daß sie variierte. Zusätzlich gab es eine wichtige Schule, die der Meinung war, daß sich auch die Richtung der Präzession periodisch änderte, ein Trepidation genannter Effekt. Man brauchte Brahes Beobachtungen, bevor die Astronomen die wahre Einfachheit des Phänomens erkennen konnten. Kopernikus selbst hatte die Situation nicht verbessert. Er fügte seinem System zusätzliche Kreise hinzu, um die Änderung der Präzessionsrate und andere nicht vorhandene Effekte zu beschreiben. Obwohl also Kopernikus die Beschreibung der Präzession nicht verbesserte, interessierte er sich doch sehr dafür und verlieh damit der astronomischen Reform einen wichtigen Anstoß. Zu seiner Zeit war eine richtige Beschreibung der Präzession die Hauptvoraussetzung für das brennendste Problem der praktischen Astronomie, der Reform des julianischen Kalenders.

Um den Effekt der Präzession auf den Kalender zu sehen, kehren wir noch einmal zu Bild 54 zurück. Die Zeichnung zeigt, wie die Position der Ekliptik auf der Sternensphäre ein für alle Mal festgelegt ist. Obwohl die

---

\* ) Kopernikus selbst brauchte keine zusätzliche Bewegung zur Beschreibung der Präzession, weil er sie bereits in einem anderen Zusammenhang eingeführt hatte. Er benützte eine jährliche konische Bewegung, um die Erdachse das Jahr hindurch parallel zu erhalten (Bild 31b), er konnte daher die Präzession erklären, indem er dieser konischen Bewegung eine Periode gab, die ganz geringfügig kürzer war als ein Jahr. Seine Nachfolger dachten jedoch, daß bereits die Bahnbewegung die Erdachse ständig parallel erhalten würde, daher benötigten sie eine zusätzliche konische Bewegung mit einer Periode von 26 000 Jahren, um die Veränderung der Lage des Himmelspoles zu erklären.

Veränderung der Lage des Himmelspols die Ekliptik nicht beeinflußt, ändert sie die Lage des Himmelsäquators und daher der Äquinoktien, der Punkte, an denen sich Ekliptik und Himmelsäquator schneiden. Im Laufe der Präzessionsperiode von 26 000 Jahren, bewegen sich die Äquinoktien langsam und gleichmäßig mit einer Geschwindigkeit von etwa 1 1/2 Grad pro Jahrhundert um die Ekliptik. Daher stimmt die Zeitdauer, die die Sonne für einen einmaligen Umlauf um die Ekliptik (das siderische oder Sternenjahr) braucht, nicht völlig mit der Zeit überein, die die Sonne auf der Ekliptik von einem Frühlings- zum nächsten Frühlingsäquinoktium braucht (das tropische Jahr). Letzteres, das etwa 20 Minuten kürzer als das erstere ist, ist wesentlich schwieriger zu messen, weil es die Sonnenbewegung nicht auf einen Fixstern, sondern auf einen bewegten, nicht reellen Punkt bezieht. Jedoch ist das tropische Jahr das Jahr der Jahreszeiten, man muß es genau messen, bevor man einen genauen langfristigen Kalender entwerfen kann. Kopernikus' Interesse am Kalender führte ihn daher zu einer ernsthaften Untersuchung der Präzession und zu einem tiefen Wissen jenes Aspektes der Astronomie, über den die ptolemäischen Astronomen am wenigsten übereinstimmten. Darauf bezieht sich auch seine Bemerkung, daß „die Mathematiker... nicht einmal die konstante Länge des Kreises der Jahreszeiten erklären oder beobachten können“ (S. 139), und es ist diese Bemerkung, die an der Spitze seiner Motive für die Erneuerung steht.

### *3 Mondphasen und Verfinsterungen*

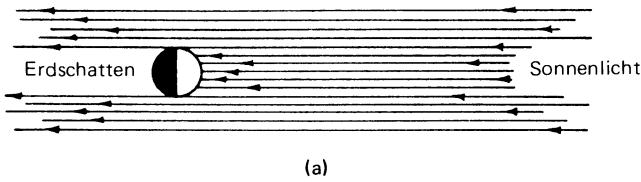
Weil die antike Erklärung der Mondphasen auch heute noch gilt, spielte sie bei der kopernikanischen Revolution keine Rolle und konnte daher in den früheren Kapiteln dieses Buches außer Betracht bleiben. Doch spielen die Mondphasen bei den antiken Messungen der Dimensionen des Universums eine direkte Rolle: wie wir immer wieder bemerkt haben, ließen diese Messungen das antike Zwei-Kugel-Universum Wissenschaftlern und Laien konkret und real erscheinen. Außerdem bietet die antike Erklärung der Phasen zusammen mit den Verfinsterungen eine wichtige zusätzliche Illustration der wissenschaftlichen Qualität des antiken Weltbildes.

Die uns interessierende Erklärung war in Griechenland zu Ende des 4. vorchristlichen Jahrhunderts gut bekannt, sie mag schon wesentlich früher entstanden sein. Mit der Durchsetzung des Zwei-Kugel-Universums kam die erweiterte, aber schlechter dokumentierte Annahme, daß alle himmlischen Wanderer Kugelform hätten. Teilweise leitete sich diese Annahme aus der

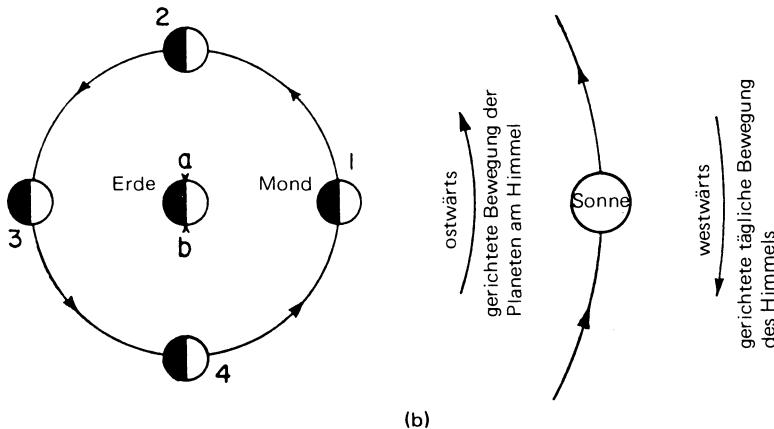
Analogie zur sphärischen Gestalt der Erde und des Himmels ab, teilweise aus der Vorstellung der Vollkommenheit einer sphärischen Gestalt und ihrer natürlichen Rolle für den vollkommenen Himmel. Direktere, jedoch unvollständige Evidenz boten die beobachteten Bilder von Sonne und Mond. Wenn der Mond eine Kugel ist, beleuchtet die entfernte Sonne nur eine Hälfte seiner Oberfläche (Bild 55a), der Bruchteil dieser beleuchteten Halbkugel, der einem Beobachter sichtbar ist, wird von seiner Position abhängen. Ein Beobachter auf der Sonne wird stets die vollständige Halbkugel sehen, ein Beobachter auf der Erde wird nichts von der beleuchteten Halbkugel sehen, wenn der Mond zwischen ihm und der Sonne steht. Es folgt daraus, daß der einem irdischen Beobachter sichtbare Teil der Mondoberfläche von der relativen Lage von Sonne, Mond und Erde abhängen muß.

In Bild 55b sind vier verschiedene relative Positionen von Sonne und Mond zu vier Zeiten in gleichem Abstand im Laufe eines Mondmonats gezeigt. In der Abbildung sind geozentrische Sonnen- und Mondbahnen in der Ebene der Ekliptik dargestellt, dies spielt jedoch keine Rolle, da nur die relativen Positionen bei der Diskussion der Mondphasen wichtig sind. Eine westwärts gerichtete Drehung des gesamten Diagramms mit Ausnahme der Erde beschreibt die tägliche Bewegung von Sonne und Mond, so daß ein Beobachter in *a* die Sonne gerade untergehen, einer in *b* gerade aufgehen sieht. Nur die ostwärts gerichtete Bahnbewegung von Sonne und Mond erfolgt bezüglich der Zeichnung. Wenn der Mond in Position 1 steht, geht er mit der Sonne zusammen auf, doch kann man ihn von der Erde aus kaum sehen, da ihr seine dunkle Seite zugewandt ist. Dies ist die Stellung des Neumondes. Etwas mehr als eine Woche später hat die rasche Bahnbewegung des Mondes ihn 90 Grad östlich zur langsam bewegten Sonne gebracht, wo er sich nun relativ zur Sonne in Position 2 befindet. Er geht nun zu Mittag auf und ist dem Zenit zu Sonnenuntergang nahe. Nur eine Hälfte der Scheibe ist von der Erde aus deutlich zu sehen, so daß dies die Stellung des ersten Viertels ist. Nach etwa einer weiteren Woche ist der Mond voll und geht auf, während die Sonne untergeht (Position 3). Das 3. Viertel zeigt sich an der Position 4 und entspricht dem Mond, der um Mitternacht aufgeht und zu Sonnenaufgang dem Zenit nahe ist.

Das bei der Beschreibung der Mondphasen verwendete Diagramm kann auch für die Erklärung der Verfinsterungen herangezogen werden: Während sich der Mond von Position 2 nach Position 4 bewegt, kann er durch den Erdschatten treten, wobei er sich verfinstert. Wenn der Mond immer in der Ekliptik wäre, würde er jedesmal bei Erreichen der Position 3 verfinstert, doch wandert er beständig nach Norden und nach Süden. Vollmond, Erde



(a)



(b)

**Bild 55** Die bereits in der Antike übliche Erklärung der Mondphasen. (a) zeigt, daß nur eine Hälfte der Oberfläche einer Kugel von der weit entfernten Sonne beleuchtet wird. (b) zeigt den Teil der beleuchteten Halbkugel, der einem irdischen Beobachter bei verschiedenen relativen Positionen von Sonne, Erde und Mond sichtbar ist. Position 1 = Neumond, Position 2 = zunehmender Halbmond, Position 3 = Vollmond, Position 4 = abnehmender Halbmond.

und Sonne liegen selten auf einer geraden Linie. Der Vollmond muß nahe der Ekliptik liegen, damit eine Mondesfinsternis eintreten kann, dies kann nicht häufiger als zweimal im Jahr geschehen, selten so oft. Sonnenfinsternisse kommen zustande, wenn der Mond in Position 1 seinen Schatten auf die Erde wirft, dies geschieht relativ häufig, mindestens zweimal im Jahr. Trotzdem sieht man Sonnenfinsternisse äußerst selten. Der Mondschatten auf der Erde ist äußerst klein, ein Beobachter muß jedoch im Schatten sein, um die Verfinsterung zu sehen. Außerdem schneidet der Mond selten mehr als einen kleinen Bruchteil von der Sonnenscheibe ab.

## 4 Antike Messungen des Universums

Eine der interessantesten technischen Anwendungen der antiken Astronomie war ihre Verwendung zur Bestimmung kosmologischer Abstände, die nicht direkt, also nicht mit gewöhnlichen Maßstäben gemessen werden konnten. Diese Abstandsmessungen zeigen die Fruchtbarkeit des Weltbildes mit größerer Deutlichkeit als die meisten anderen Anwendungen, weil die mathematischen Hilfsmittel, die dabei verwendet werden, alle physikalische Bedeutung verlieren, wenn sich nicht gewisse wesentliche Elemente des Weltbilds bewahrheiten. Zum Beispiel scheinen sich die Sterne in täglichen Kreisen zu bewegen, unabhängig ob die Erde eine flache Scheibe oder eine Kugel ist, und Verfahren zur Beschreibung dieser offensichtlichen Bewegung sind daher immer brauchbar. Doch wenn die Erde tatsächlich eine Kugel ist, dann muß sie einen Umfang haben, den man aus den Himmelsbeobachtungen, die wir weiter unten diskutieren werden, bestimmen kann.

Der erste Hinweis auf Messungen des Erdumfanges erscheint in den Schriften des Aristoteles, so daß solche Messungen vermutlich bereits um die Mitte des 4. vorchristlichen Jahrhunderts unternommen wurden. Doch kennen wir nur die Resultate dieser frühesten Messungen, nicht die verwendeten Methoden; die erste Messung, über die wir eine relativ vollständige Beschreibung aus zweiter Hand besitzen, ist die des Eratosthenes, des Bibliothekars der großen Manuskriptsammlung in Alexandria, im 3. vorchristlichen Jahrhundert. Eratosthenes maß den Winkel  $\alpha$  (Bild 56) zwischen den Strahlen der Mittagssonne und einem senkrechten Gnomon in Alexandria,  $A$ , an einem Tag, an dem die Mittagssonne in Syene,  $S$ , einer anderen ägyptischen Stadt, die 5 000 Stadien genau südlich von Alexandria lag, im Zenit stand. Dieser Winkel wurde zu einem fünfzigstel eines vollen Kreises (oder  $7 \frac{1}{5}$  Grad) gefunden. Da man alle Strahlen von der sehr weit entfernten Sonne, die auf die Erdoberfläche auftreffen, als parallel betrachten kann, ist der Winkel  $\alpha$ ,

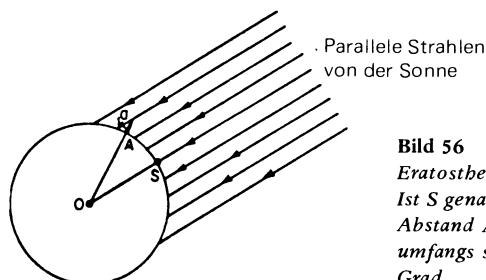
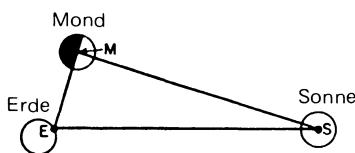


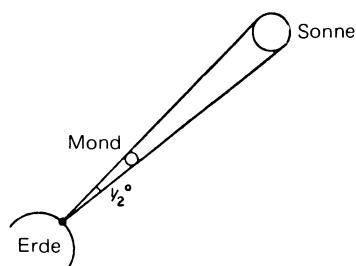
Bild 56  
Eratosthenes' Messung des Erdumfanges.  
Ist  $S$  genau südlich von  $A$ , dann muß der  
Abstand  $AS$  derselbe Bruchteil des Erd-  
umfangs sein wie der Winkel  $\alpha$  von 360  
Grad.

der die Zenitdistanz der Sonne in Alexandria angibt, gleich dem Winkel  $AOS$ , der zwischen  $S$  und  $A$  im Erdmittelpunkt  $O$  gebildet wird. Daher ist der Abstand von Alexandria nach Syene ein fünfzigstel des Erdumfanges, der gesamte Umfang muß das Fünfzigfache der Distanz von Alexandria nach Syene sein, das heißt 250 000 Stadien. Heute glaubt man, daß Eratosthenes' Ergebnis etwa um 5 % kleiner ist als das moderner Messungen. Doch weiß man dies leider nicht genau. Die Länge der von Eratosthenes verwendeten Längeneinheit ist unbekannt. Man kann die bekannte Lage von Alexandria und Syene nicht zur Definition dieser Einheit verwenden, weil sowohl die Zahl „5 000“ als auch das „1/50“ deutlich gerundete Zahlen sind, die den Bericht leichter lesbar machen sollten.

Die zweite Gruppe von Messungen wurde im zweiten vorchristlichen Jahrhundert von Aristarch aus Samos unternommen, der heute wegen seiner Vorwegnahme des kopernikanischen Systems besser bekannt ist. Er schätzte den Abstand und die Größe von Sonne und Mond mit Hilfe des Winkels  $MES$  der von den Mittelpunkten von Sonne und Mond auf der Erde gebildet wurde, wenn der Mond exakt ein Halbmond war (Bild 57). Da der Mond nur dann ein Halbmond sein kann, wenn der Winkel  $EMS$  zwischen Erde und Sonne, vom Mond aus gesehen, genau ein rechter ist, muß die Größe des Winkels  $MES$  die Gestalt des rechtwinkeligen Dreiecks vollständig bestimmen, dessen Ecken von Mond, Erde und Sonne gebildet werden. Aristarchs Messungen ergaben den Winkel  $MES$  zu  $87^\circ$ , dies entspricht einem Dreieck, in dem sich die Seiten  $ES$  und  $EM$  im Verhältnis 19 zu 1 verhalten. Entsprechend stellte er fest, daß die Sonne von der Erde 19mal so weit entfernt ist wie der Mond, und da der Mond und die Sonne der Erde gleich groß erscheinen, war sie 19mal so groß wie der Mond (Bild 58).



**Bild 57** Aristarchs Messung der relativen Abstände der Erde von Mond und Sonne. Ist der Mond exakt halb, muß der Winkel  $EMS$  genau 90 Grad betragen. Daher bestimmt die Messung des Winkels  $MES$  das Verhältnis von  $EM$  zu  $ES$ , also der Entfernung  $Erde - Mond$  und  $Erde - Sonne$ .



**Bild 58** Die große, aber weit entfernte Sonne und der kleine, aber nahe Mond sind von der Erde in gleicher Winkelgröße sichtbar.

Moderne Messungen mit völlig anderen Techniken und der Hilfe von Teleskopen ergeben, daß das von Aristarch bestimmte Verhältnis um mehr als einen Faktor 20 zu klein war, daß das Verhältnis  $ES$  zu  $EM$  nahezu  $400 : 1$  beträgt. Diese Diskrepanz kommt von der Messung des Winkels  $MES$ , welcher tatsächlich  $89^\circ 51'$  und nicht  $87^\circ$  beträgt. In der Praxis ist diese Messung äußerst schwierig, besonders mit den Instrumenten, die Aristarch zur Verfügung standen. Man kann die genauen Mittelpunkte von Sonne und Mond nur schwer bestimmen, weiters ist es schwierig, sicher festzustellen, wann der Mond *genau* halb ist. Angesichts dieser Probleme scheint Aristarch den kleinsten Winkel gewählt zu haben, der mit seinen unsicheren Beobachtungen verträglich war, vermutlich um das Verhältnis glaubwürdig zu halten. Ähnliche Überlegungen müssen seine Nachfolger motiviert haben, denn trotz beträchtlicher Verbesserungen blieben die Abschätzungen der relativen Distanzen zu Sonne und Mond in der Antike und im Mittelalter stets zu klein.

Die soeben beschriebenen Messungen liefern nur das Verhältnis von Distanzen, doch durch ein äußerst geistreiches Argument konnte sie Aristarch in absolute Zahlen umwandeln, er konnte den Durchmesser und den Abstand zu Sonne und Mond in Stadien angeben. Seine Resultate wurden aus Beobachtungen einer Mondesfinsternis maximaler Dauer bestimmt, bei der der Mond völlig auf der Ekliptik lag, und daher genau durch den Mittelpunkt des Erdschattens ging. Zuerst maß er die Zeit, die zwischen dem Eintritt des Mondrandes in den Schatten und der totalen Bedeckung des Mondes lag. Dann verglich er sie mit der Zeitspanne, die der Mond total verfinstert war, und fand, daß beide Zeiten gleich waren. Er schloß daraus, daß die Breite des Erdschattens in der Region, wo er vom Mond durchquert wurde, etwa doppelt so groß wie der Durchmesser des Mondes selbst ist.

Bild 59 zeigt die Stellung der Himmelskörper, die Aristarch analysierte. Im Diagramm wird der Mond unmittelbar nach seinem völligen Eintritt in den Erdschatten gezeigt. Der Monddurchmesser ist  $d$  (eine Unbekannte), der Durchmesser des Erdschattens beim Mond ist daher  $2d$ . Der Erddurchmesser  $D$  ist aus der Messung des Erdumfanges von Eratosthenes in Stadien bekannt. Der Abstand des Mondes von der Erde ist  $R$ , wiederum eine zu bestimmende Unbekannte. Da schließlich Sonnendurchmesser und Sonnenabstand von der Erde genau 19mal so groß sind wie beim Mond, ist der Durchmesser der Sonnenscheibe gerade  $19d$ , ihr Abstand von der Erde genau  $19R$ . Daher muß Aristarch noch  $d$  und  $R$  mittels des Erddurchmessers  $D$  bestimmen, dessen Größe in Stadien bereits bestimmt worden war.

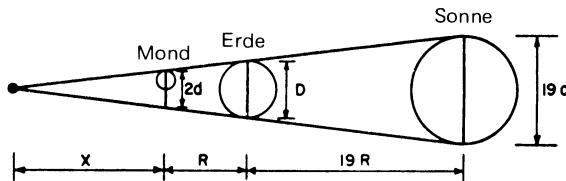


Bild 59 Aristarchs Konstruktion zur Berechnung der absoluten Entfernungen zu Sonne und Mond unter Benutzung von Beobachtungen bei einer Mondesfinsternis

Das Diagramm zeigt sogleich drei ähnliche Dreiecke, deren Basen die Längen  $2d$ ,  $D$  und  $19d$  haben, deren Höhen  $x$ ,  $x + R$  und  $x + 20R$  sind. (Tatsächlich sind die Basen der drei Dreiecke etwas kürzer als die Durchmesser, mit denen wir sie gleichgesetzt haben, doch wenn die Dreiecke äußerst spitzwinkelig sind – wie es der Fall ist –, hat diese Diskrepanz kaum einen Einfluß.) Das Verhältnis von Höhe zur Basis des kleinsten Dreieckes muß dasselbe sein wie beim größten Dreieck, oder

$$\frac{x}{2d} = \frac{x + 20R}{19d}$$

Indem man beide Seiten der Gleichung mit  $38d$  multipliziert, erhält man eine neue Gleichung  $19x = 2x + 40R$ , so daß  $x = 40R/17$ . In anderen Worten, der Erdschatten erstreckt sich hinter den Mond auf einer Länge von etwa  $2\frac{1}{3}$  der Distanz von der Erde zum Mond.

Durch den Vergleich des kleinsten Dreieckes mit dem mittleren ergibt sich eine weitere Gleichung, aus der  $d$  bestimmt werden kann. Der erste Vergleich ergibt

$$\frac{x}{2d} = \frac{x + R}{D}.$$

Indem wir  $x = 40R/17$  einsetzen und beide Seiten mit  $17/R$  multiplizieren, erhalten wir

$$\frac{20}{d} = \frac{40 + 17}{D}.$$

Aus der letzten Gleichung ergibt sich  $d = 20D/57 = 0,35D$ , das heißt, der Durchmesser des Mondes ist knapp größer als  $1/3$  des Erddurchmessers und da der Sonnendurchmesser genau 19mal so groß wie der Monddurchmesser ist, muß der Sonnendurchmesser  $6\frac{2}{3}$  des Erddurchmessers betragen.

Da der Durchmesser  $D$  der Erde bekannt ist, ergeben sich die tatsächlichen Größen von Sonne und Mond aus der obigen Rechnung. Ihre Abstände können durch eine kleine weitere Rechnung bestimmt werden. Da Sonne und Mond der Erde einen Winkel von  $0,5^\circ$  bieten, könnte jeder 720mal auf den Umfang eines vollen Kreises mit dem Mittelpunkt in der Erde gesetzt werden. Der Abstand Mond – Erde muß daher der Radius eines Kreises sein, dessen Umfang das 720fache des Monddurchmessers, den wir jetzt kennen, beträgt, der Sonnenabstand muß nochmals 19mal so groß sein. Da der Umfang eines Kreises das  $2\pi$ -fache des Radius ist, muß die Entfernung des Mondes von der Erde etwas mehr als 40 Erddurchmesser und die Distanz zur Sonne etwa 764 Erddurchmesser betragen.

Die bei diesen Rechnungen verwendeten Methoden sind brilliant, sie zeigen Großleistungen griechischer Wissenschaft, doch sind die numerischen Resultate, besonders für die Sonne, ungenau, weil der ursprüngliche Fehler bei der Bestimmung des Winkelabstandes von Sonne und Halbmond hier eingeht. Moderne Messungen geben den Monddurchmesser zu etwas mehr als  $1/4$  des Erddurchmessers, seine Distanz zu ungefähr 30 Erddurchmessern, beide Resultate sind nicht weit von den durch Aristarch bestimten Werten entfernt. Doch der Sonnendurchmesser ergibt sich heute zu fast 110 Erddurchmessern, die Sonnenentfernung zu fast 12 000 Erddurchmessern, viel mehr, als Aristarch vermutete. Obwohl in der Antike zahlreiche Verbesserungen an Aristarchs Methode vorgenommen wurden und die Möglichkeit eines wesentlichen Fehlers in der gemessenen Distanz zur Sonne oft erkannt wurde, blieben alle antiken und mittelalterlichen Schätzungen dieser wichtigen Größe bei weitem zu klein.

Weil die Aristarchsche Methode nur von den relativen Positionen von Erde, Mond und Sonne abhängt, kann sie mit gleicher Genauigkeit oder Ungenauigkeit im ptolemäischen und kopernikanischen Universum angewandt werden. Die antiken Bestimmungen astronomischer Ausdehnungen konnten daher in der kopernikanischen Revolution keine direkte Rolle spielen. Sie spielten jedoch eine indirekte, indem sie das ptolemäische System untermauerten. Die Möglichkeit, astronomische Messungen zu machen, zeigte die große Bedeutung des aristotelisch-ptolemäischen Universums. Außerdem ließen die Resultate der Messungen die antike Kosmologie richtig erscheinen, indem sie seine Struktur konkret bestimmten. Darüber hinaus lieferte die Messung

des Mondabstandes einen astronomischen Maßstab, der im Mittelalter ein indirektes Maß für die Größe des gesamten Universums abgab.

Wie wir bereits in Kapitel 3 beschrieben haben, nahmen die mittelalterlichen Kosmologen oft an, daß jede kristalline Schale gerade dick genug wäre, um den Epizykel ihres Planeten zu enthalten, und daß die Schalen insgesamt so angeordnet wären, daß sie den gesamten Raum erfüllten. Mit diesen Hypothesen konnten die mathematischen Astronomen die relativen Größen und Dicken dieser Schalen bestimmen. Sie wurden darauf in Erddurchmesser, Stadien oder Meilen umgewandelt, indem die Aristarchische Methode zur Bestimmung des Abstandes zur Mondsphäre verwendet wurde. Ein typischer Satz für die sich daraus ergebenden kosmologischen Abmessungen wurde an der geeigneten Stelle bereits erwähnt. Er zeigt, in welchem Detail das Universum von vorkopernikanischen Wissenschaftlern erforscht und verstanden wurde.

# Anmerkungen

## Kapitel 1. Das antike Zwei-Sphären-Universum

1. Sir Thomas L. Heath, *Greek Astronomy*, Library of Greek Thought (London: Dent, 1932), S. 5–7.
2. Plato, *Timaios* in *Sämtliche Werke*, hrsg. W. F. Otto, E. Grassi, G. Plamböck (Hamburg, Rowohlt, 1959), V, 157.

## Kapitel 2. Das Planetenproblem

1. Vitruvius, *The Ten Books on Architecture*, übers. von M. H. Morgan (Cambridge, Harvard University Press, 1926), S. 261–262.
2. Sir Thomas L. Heath, *Aristarchus of Samos* (Oxford: Clarendon Press, 1913), S. 140.

## Kapitel 3. Das Zwei-Kugel-Universum im aristotelischen Denken

1. Aristoteles, *Über den Himmel* in *Die Lehrschriften*, hrsg. u. übers. von P. Gohlke (Paderborn, Schöningh, 1958) 279a 6–17.
2. Ibid., 296b 8–298a 13.
3. Sir Thomas L. Heath, *Greek Astronomy*, Library of Greek Thought (London: Dent, 1932), S. 147–148.
4. Aristoteles, *Über den Himmel*, 310b 2–5.
5. Aristoteles, *Physics*, übers. v. P. H. Wickstead und F. M. Cornford, The Loeb Classical Library (Cambridge: Harvard University Press, 1929), I, 331. (213a 31–34).
6. Aristoteles, *Über den Himmel*, 270b 1–24.
7. Jean Piaget, *The Childs Conception of Physical Causality*, übers. v. Marjorie Gabain (London: Kegan Paul, Trench, Trubner, 1930), S. 110–111.
8. Heinz Werner, *Comparative Psychology of Mental Development* (Chicago, Follet, 1948), S. 171–172.
9. Aristoteles, *Physica*, übers. v. R. P. Hardie und R. K. Gaye, in *The Works of Aristotle*, II (Oxford: Clarendon Press, 1930), 208b 8–22.

## Kapitel 4. Der Wandel der Tradition: Von Aristoteles zu Kopernikus

1. St. Augustinus, *Works*, hrsg. v. Marcus Dods (Edinburgh: Clark, 1871–1877), IX, 180–181.
2. Thomas von Aquin, *Commentaria in libros Aristotelis de caelo et mundo*, in *Sancti Thomae Aquinatis ... Opera Omnia*, III (Rom: S. C. de Propaganda Fide, 1886), S. 24, übers. v. T. S. K.
3. St. Thomas Aquinas, *The „Summa Theologica“*, I, Fragen L–LXXIV, übers. v. Fathers of the English Dominican Province, 2. Aufl. (London: Burns Oates & Washbourne, 1922), S. 225.
4. Aquinas, *Summa Theologica*, III, Fragen XXVII–LIX, (London: Washbourne, 1914), S. 425, 433. Zitiert mit Erlaubnis des Verlags und von Benziger Brothers, Inc., New York.
5. Charles H. Grandgent, *Discourses on Dante* (Cambridge: Harvard University Press, 1924), S. 93.
6. Dante, *The Banquet*, übers. v. Katherine Hillard (London: Routledge and Kegan Paul, 1889), S. 65–66.
7. Ibid., S. 69, 79–80.

8. Nicole Oresme, *Le livre du ciel et du monde*, hrsg. v. A. D. Menut und A. J. Denomy, in *Mediaeval Studies*, III–V (Toronto: Pontifical Institute of Mediaeval Studies, 1941–43), IV, 243. (Dt. in S. Sambursky, *Der Weg der Physik* (Zürich, Artemis-Verlag, 1957) S. 218).
9. Ibid., IV, S. 272.
10. Ibid., IV, S. 273.
11. Jean Buridan, *Quaestiones super octo libros physicorum* (Paris 1509), Buch VIII, 12. Frage. (S. a. Marshall Clagett, *The Science of the Middle Ages* (Madison, Wisc., 1959)).
12. Ibid.
13. *Mediaeval Studies*, IV, 171.
14. Alfred North Whitehead, *Science and the Modern World* (New York: MacMillan, 1925) (Dt.: *Wissenschaft und Moderne Welt*, übers. G. Tschiedel und F. Bondy (Zürich: Morgarten, 1949)).
15. Zitiert von John Herman Randall, Jr., *The Making of the Modern Mind*, 2. Aufl. (Boston: Houghton Mifflin, 1940), S. 213.
16. Sir Thomas L. Heath, *A History of Greek Mathematics* (Oxford: Clarendon Press, 1921), I, 284.
17. Zitiert von Edward W. Strong, *Procedures and Metaphysics* (Berkeley: University of California Press, 1936), S. 43, aus Thomas Taylor, *The Philosophical and Mathematical Commentaries of Proclus in the First Book of Euclid's Elements* (London, I (1788), II (1789)).
18. Marsilio Ficino, *Liber de Sole*, in *Marsilius Ficinus Florentini ... Opera* (Basel: Henric Petrina, 1576), I, 966. Übers. v. T. S. K.
19. Zitiert und übers. v. Edwin A. Burtt, *The Metaphysical Foundations of Modern Physical Science*, 2. Ausg. (New York: Harcourt, Brace, 1932), S. 48, aus dem Fragment einer frühen Disputation Keplers.

## Kapitel 5. Kopernikus' Neuerung

1. Alle Zitate in Kapitel 5 sind aus der Vorrede und Buch I von Kopernikus' *De Revolutionibus Orbium Caelestium* (1543). (Die deutsche Übersetzung ist der zweisprachigen Ausgabe *Über die Kreisbewegungen der Weltkörper*, hrsg. G. Klaus (Berlin, Akademie-Verlag, 1959) entnommen; Anm. d. Übers.).

## Kapitel 6. Die Aufnahme der kopernikanischen Astronomie

1. Zitiert von Francis R. Johnson, *Astronomical Thought in Renaissance England* (Baltimore: John Hopkins Press, 1937), S. 207.
2. Ibid., S. 188–189, aus der Übersetzung (1605) durch Joshua Sylvester.
3. Übers. und zitiert von Dorothy Stimson, *The Gradual Acceptance of the Copernican Theory of the Universe* (New York, 1917), S. 46–47, aus Bodin's *Universae Naturae Theatrum* (Frankfurt, 1597).
4. Übers. und zitiert von Andrew D. White, *A History of the Warfare of Science with Theology in Christendom* (New York: Appleton, 1896), I, 126.
5. Ibid., S. 126–127, aus Melanchthon's *Initia Doctrinae Physicae*.
6. Ibid., S. 127.
7. John Donne, „Ignatius, his Conclave“ in *Complete Poetry and Selected Prose of John Donne*, hrsg. v. John Hayward (Bloomsbury: Nonesuch Press, 1929), S. 365.
8. Ibid., S. 202.
9. John Milton, *Paradise Lost*, I, Zeile 26.
10. Nicole Oresme, *Le livre du ciel et du monde*, in *Mediaeval Studies*, IV, 276.

- Übers. und zitiert von James Brodrick, *The Life and Work of Blessed Robert Francis Cardinal Bellarmine*, S. J. (London: Burns Oates and Washbourne, 1928), II, 359.

### Kapitel 7. Das neue Universum

- Robert Hooke, *An Attempt to Prove the Motion of the Earth from Observations* (London: John Martyn, 1674), wieder abgedruckt in R. T. Gunther, *Early Science in Oxford*, VIII (Oxford: Privatdruck, 1931), S. 27–28.
- Newton, *Opticks*, 4. Ausg. (1730) (New York: Dover, 1952), S. 401.
- Ibid.
- Newton, *Mathematical Principles of Natural Philosophy*, hrsg. v. Florian Cajori (Berkeley: University of California Press, 1946), S. XVIII.
- Newton, *Opticks*, S. 400–401.

# Bibliographische Anmerkungen

## *Einleitung*

Die folgenden Anmerkungen zeigen einerseits, bei welchen Quellen ich in tiefer Schuld stehe, und andererseits gewähren sie einen geeigneten Zugang in die umfangreiche wissenschaftliche Literatur, die sich mit der Geschichte der Astronomie und verwandter Gebiete vor 1700 beschäftigt. Die Diskussion beschränkt sich hauptsächlich auf Bücher, die leicht in englischer Sprache erhältlich sind. Aufsätze, Monographien und Studien in anderen Sprachen werden mit wenigen Ausnahmen nur dann erwähnt, wenn sie wesentlich zu meinem Verständnis der kopernikanischen Revolution beigetragen haben oder wenn sie in den unten angeführten hauptsächlichen bibliographischen Quellen (wie zahlreiche neuere Studien) nicht angeführt werden. Einige weniger wichtige Quellen, die ich in der Liste der Anmerkungen angeführt habe, sind unten nicht mehr erwähnt.

Umfangreiche Bibliographien für einige Teile des Buches findet man in M. R. Cohen und I. E. Drabkin, *A Source Book of Greek Science* (New York, 1948); E. J. Dijksterhuis, *De Mechanisering van het Wereldbeeld* (Amsterdam, 1950); F. Russo, *Histoire des sciences et des techniques: bibliographie* (Paris, 1954); und George Sarton, *A Guide to the History of Science* (Waltham, Mass., 1952). Ausführliche Bibliographien zu einigen Themen findet man ferner bei George Sarton, *Introduction to the History of Science* (Baltimore, 1927–1947) und in den jährlichen Bibliographien in der Zeitschrift *Isis*. Viele unten in anderem Zusammenhang zitierten Bücher enthalten ebenfalls nützliche Bibliographien. Besonders die neueren Werke erweisen sich als besonders brauchbar, vor allem A. C. Crombie, *Augustine to Galileo* (Cambridge, Mass., 1952) (Dt.: *Von Augustinus zu Galilei*, übers. H. Hoffmann und H. Pleus (Köln, 1964)) und A. R. Hall, *The Scientific Revolution, 1500–1800* (London, 1954).

Alle allgemeinen Darstellungen der Geschichte der Naturwissenschaft diskutieren die von uns betrachtete Periode und viele in diesem Buch behandelten Probleme, doch nur das Buch von Herbert Butterfield, *The Origins of Modern Science, 1300–1800* (London, 1949) hatte wesentlichen Einfluß auf die Struktur dieses Buches. Marshall Clagett, *Greek Science in Antiquity* (New York, 1955) und Hall, *Scientific Revolution* (s. oben) bieten äußerst nützliche Hintergrundinformation über die betreffenden Zeiträume, beide wurden mir erst zugänglich, als mein Manuskript nahezu vollendet war. Das

Buch von Dijksterhuis, *Mechanisering* (Dt.: *Die Mechanisierung des Weltbildes* (Berlin, 1956)) ist ebenfalls sehr zu empfehlen.

Bertrand Russell, *A History of Western Philosophy* (New York, 1945) (Dt.: *Philosophie des Abendlandes*, übers. E. Fischer-Wernecke und R. Gillischewski (Frankfurt/M., 1950) und W. Windelband, *Lehrbuch der Geschichte der Philosophie* (Tübingen, 1957, 15. erg. Aufl.) habe ich nützliche Allgemeininformation zur Entwicklung der Philosophie entnommen. Die folgenden Bücher habe ich so oft zu Rate gezogen, daß ich sie unten nur bei jenen Teilen erwähne, in denen ich ihren Darstellungen eng gefolgt bin: J. L. E. Dreyer, *A History of Astronomy from Thales to Kepler* (New York, 2. Aufl., 1953); Lynn Thorndike, *A History of Magic and Experimental Science* (New York, 1923–1941, 6 Bde.); und Sarton, *Introduction* (s. o.). Zu besonderen Themen habe ich Pierre Duhem, *Le système du monde* (Paris, 1913–1954, 6 Bde.) herangezogen.

## Kapitel 1 und 2

R. H. Baker, *Astronomy* (New York, 1950, 5. Aufl.) ist eine ausgewogene Quelle für die technischen Details der Astronomie.

George Sarton, *A History of Science: Ancient Science through the Golden Age of Greece* (Cambridge, Mass., 1952) gibt einen Überblick über die Astronomie Ägyptens, Mesopotamiens und des Hellenismus im Rahmen der antiken Wissenschaft und Kultur. O. Neugebauer, *The Exact Sciences in Antiquity* (Princeton, 1952) gibt eine genauere Einführung in die Astronomie Ägyptens und Babyloniens, wenn auch seine Auswahl einigen Lesern ein falsches Bild der wichtigen Rolle der hellenistischen astronomischen Tradition geben wird. Neugebauer's zweite Auflage (Providence, R. I., 1957) enthält in einem Anhang eine äußerst nützliche Beschreibung der in Ptolemäus' *Almagest* dargestellten astronomischen Geräte. Sir Thomas L. Heath, *Aristarchus of Samos* (Oxford, 1913), ist die Standardquelle für die griechische Astronomie bis zum 3. Jahrhundert v. Chr. In den Kapiteln 7–9 von Dreyer, *History* (s. o.), wird die griechische Astronomie von Apollonius bis Ptolemäus diskutiert.

Zahlreiche Auszüge aus antiken astronomischen Schriften findet man bei Sir Thomas L. Heath, *Greek Astronomy* (London, 1932) und bei Cohen und Drabkin, *Source Book* (s. o.). Andere relevante Passagen sind in Plato, *Timaeus*, in *The Dialogues of Plato*, hrsg. v. Benjamin Jowett (London, 1892, 3. Aufl.), und Vitruvius, *The Ten Books on Architecture*, übers. M. H. Morgan

(Cambridge, Mass., 1926) enthalten, obwohl die letztgenannte Übersetzung durch mangelnde Kenntnis astronomischer Theorien und Fakten leidet. Ptolemäus, *The Almagest*, wurde kürzlich von R. Catesby Taliaferro in *Great Books of the Western World*, Bd. XVI (Chicago, 1952) übersetzt. Ausführliche Untersuchungen werden jedoch weiterhin die Standardausgabe, *Syntaxis mathematica*, hrsg. v. J. L. Heiberg (Leipzig, 1898–1903, 2 Bde.) zu Rate ziehen.

Ausführliche Information über antike Kalender ist in zahlreichen der oben genannten Sekundärquellen enthalten. Detailliertere Studien stellen F. H. Colson, *The Week* (Cambridge, Mass., 1926) und R. A. Parker, *The Calendars of Ancient Egypt* (Chicago, 1950) dar. Stonehenge als primitives Observatorium wird von Sir Norman Lockyer, *Stonehenge and Other British Stone Monuments Astronomically Considered* (London, 2. Aufl., 1909) diskutiert; s. a. Jacquetta Hawkes, „Stonehenge“, *Scientific American* CLXXXVIII (Juni 1953), S. 25–31; F. Hoyle, *From Stonehenge to Modern Cosmology* (W. H. Freeman, San Francisco, 1972). Zur Rolle des Himmels im ursprünglichen kosmologischen Denken siehe Henri Frankfort *et al.*, *The Intellectual Adventure of Ancient Man* (Chicago, 1946), und Heinz Werner, *The Comparative Psychology of Mental Development* (Chicago, 1948).

### Kapitel 3

Die hauptsächlichen Quellen für dieses Kapitel sind Aristoteles' Schriften über die physikalischen Wissenschaften, besonders seine *Physik*, *Metaphysik*, *Über den Himmel*, *Meteorologie* und *Über Werden und Vergehen*. Die Anmerkungen in Sir W. D. Ross, *Aristotle's Physics* (Oxford, 1936) sind besonders nützlich.

John Burnet, *Early Greek Philosophy* (London, 1920, 3. Aufl.); Theodor Gomperz, *Griechische Denker* (Leipzig, 1922–1930, 4. Aufl., 3 Bde.); und Kathleen Freeman, *The Pre-Socratic Philosophers* (Oxford, 1946) erlauben es, Aristoteles' Denken in die Tradition seiner Vorgänger einzurodnen. Sir W. D. Ross, *Aristotle* (London, 1937, 3. Aufl.) und Werner Jäger, *Aristoteles: Grundlegung einer Geschichte seiner Entwicklung* (Berlin, 1955, 2. Aufl.) sind wichtige biographische Studien. F. M. Cornford, *The Laws of Motion in Ancient Thought* (Cambridge, Eng., 1931) behandelt einige besondere Probleme dieses Kapitels in beispielhafter Weise.

Die nach-ptolemaischen Berechnungen der kosmologischen Dimensionen auf der Grundlage des Prinzips der Vollständigkeit werden von Edward

Rosen, „A Full Universe“, *Scientific Monthly* LXIII (1946) S. 213–217, und in den Kapiteln VIII und XI von Dreyer's *History* diskutiert. Die Evidenz für das Experiment zu Pisa wird von Lane Cooper, *Aristotle, Galileo, and the Leaning Tower of Pisa* (Ithaca, 1935) analysiert, doch sollte man zusätzlich die unten für Kapitel 4 und 7 zitierten Diskussionen von Galileis Gesetzen beachten. Ursprüngliche Auffassungen von Raum und Bewegung werden von Werner (s. oben, Kapitel 1) und in den zahlreichen Werken von Jean Piaget, besonders in *The Child's Perception of the World*, übers. v. Joan and Andrew Tomlinson (London, 1929), *The Child's Perception of the Physical Causality*, übers. v. Marjorie Gabain (London, 1930) und *Les notions de mouvement et de vitesse chez l'enfant* (Paris, 1946) behandelt.

#### Kapitel 4

Die wichtigsten Aspekte des Übergangs von der hellenischen zur hellenistischen Naturwissenschaft werden von George Sarton, *Ancient Science and Modern Civilization* (Lincoln, Neb., 1954) beschrieben. Wesentlich ausführlicher ist jedoch die Darstellung in *Introduction* vom selben Autor (s. oben).

Henry Osborn Taylor, *The Mediaeval Mind* (Cambridge, Mass., 4. Aufl., 1925) diskutiert die frühchristliche Ablehnung der heidnischen Wissenschaft; Dreyer, *History* (s. o.), gibt wichtige Beispiele in dieser Hinsicht für die Astronomie. Wichtige Quellen erster Hand sind Augustinus' *Confessiones* und *Enchiridion in Works*, hrsg. v. Marcus Dods (Edinburgh, 1871–1877).

Meine Darstellung der Versöhnung der aristotelischen Astronomie mit der biblischen Geschichte leitet sich aus St. Thomas Aquinas, *The „Summa Theologica“*, übers. v. Brothers of the English Dominican Province (London, 1913–1925, 22 Bde.) und aus den *Commentaria* zu Aristoteles physikalischen Abhandlungen in den Bänden II und III von St. Thomas Aquinas, *Opera Omnia* (Rom, 1882–1906, 12 Bde.) ab. Das Ergebnis dieser Versöhnung zeigt sich in Dante, *The Banquet*, übers. v. Katherine Hillard (London, 1889), und *Divina Commedia* (zahlreiche Übersetzungen). Die Auswirkungen auf das Denken des Mittelalters und der Renaissance werden von Charles H. Grandgent, *Discourses on Dante* (Cambridge, Mass., 1924) und von S. L. Bethell, *The Cultural Revolution of The Seventeenth Century* (London, 1951) dargestellt.

Die Astronomie Arabiens und des mittelalterlichen Europa werden behandelt von Dreyer, *History*; von Duhem, *Le système*; von Sarton, *Introduction* (alle s. o. unter Einleitung); und von Lynn Thorndike, *Science and*

*Thought in the Fifteenth Century* (New York, 1929). Thorndike meint, daß frühere Forscher den Anfang einer höheren astronomischen Tradition in Europa zu spät ansetzen, doch wenigstens in Hinblick auf das Planetenproblem finde ich seine Evidenz nicht überzeugend. Zusätzliche wertvolle Information findet man bei Derek J. Price (Hrsg.), *Equatorie of the Planetis* (Cambridge, England, 1955).

A. C. Crombie, *Augustine to Galileo* (s. o., Einleitung), gibt den besten Überblick über die mittelalterliche Wissenschaft hinsichtlich Material und Bibliographie. Zahlreichen Spezialstudien verdanke ich Material, besonders Carl Boyer, *The Concepts of Calculus* (Wakefield, Mass., 1949, 2. Aufl.); Marshall Clagett, *Giovanni Marliani and Late Medieval Physics* (New York, 1949), und „Some General Aspects of Physics in the Middle Ages“, *Isis* XXXIX (1948), 29–44; Alexandre Koyré, *Etudes Galiléennes* (Paris, 1939, 3 Bde.); Anneliese Maier, *Studien zur Naturphilosophie der Spätscholastik* (Rom, 1951–1955, 4 Bde.); und John Herman Randall, Jr., „The Development of Scientific Method in the School of Padua“, *Journal of the History of Ideas* I (1940), 177–206. Koyré und Randall geben besonders gute Beispiele für die Überführung scholastischer Ideen in die frühen Grundsteine moderner Naturwissenschaft. Originalquellen für das Studium scholastischer Theorien der Bewegung sind u. a. Thomas Bradwardine, *Tractatus de Proportionibus*, hrsg. und übers. v. H. Lamar Crosby, Jr. (Madison, Wis., 1955); Marshall Clagett, „Selections in Medieval Mechanics“ (Madison, Wis., als Manuskript vervielfältigt); Jean Buridan, *Quaestiones super libris quattour de caelo et mundo*, hrsg. v. Ernest A. Moody (Cambridge, Mass.: Mediaeval Academy of America, 1942); und Nicole Oresme, *Le livre du ciel et du monde*, hrsg. v. A. D. Menut und A. J. Donomy, *Mediaeval Studies* III–V (Toronto, 1941–1943).

Die Beziehung zwischen der Naturwissenschaft und verschiedenen sozialen, ökonomischen und intellektuellen Strömungen der Renaissance wird von John Herman Randall, Jr., *The Making of the Modern Mind* (Boston, 1940, verb. Aufl.), und von Myron P. Gilmore, *The World of Humanism, 1453–1517* (New York, 1952) besprochen. Neuplatonismus in der Antike und der Renaissance wird von Lynn Thorndike, *Magic and Experimental Science* (s. o., Einführung) und von Arthur O. Lovejoy, *The Great Chain of Being* (Cambridge, Mass., 1948) behandelt. Henry Osborn Taylor, *Thought and Expression in the Sixteenth Century* (New York, 1920, 2 Bde.) enthält ebenfalls eine Beschreibung des Neuplatonismus in der Renaissance. Platos Einstellung zur Mathematik wird von Sir Thomas L. Heath, *A History of Greek Mathematics* (Oxford, 1921, 2 Bde.) behandelt, ihre Auswirkungen

auf die Naturwissenschaft durch den Neuplatonismus werden unter vielfältigen Gesichtspunkten in den folgenden Werken beschrieben: Edwin Arthur Burtt, *The Metaphysical Foundations of Modern Physical Science* (New York, 1932); Alexandre Koyré, „Galileo and Plato“, *Journal of the History of Ideas* IV (1943), 400–428; und Edward Strong, *Procedures and Metaphysics* (Berkeley, Calif., 1936). Das letzte Werk betont in ausreichender Weise den mystischen und unwissenschaftlichen Grundton im neuplatonischen Denken, doch mag der dort gezogene Schluß zu weit gehen, daß kein derart irrationaler Standpunkt die Naturwissenschaften hätte befruchten können. Zum Neuplatonismus beachte man auch die unten bei Kapitel 6 zitierten Werke über Nikolaus von Cusa und Giordano Bruno.

## Kapitel 5

Kopernikus Leben und Werk werden gut in Angus Armitage, *Copernicus, The Founder of Modern Astronomy* (London, 1938), beschrieben, doch sollte man diese Darstellung durch die wesentlich ausführlichere von Ludwig Prowe, *Nicolaus Copernicus* (Berlin, 1883–1884, 2 Bde.) ergänzen. Kopernikus' astronomische Nebenwerke und Rheticus' *Narratio prima* sind mit einer ausgezeichneten Einführung und Anmerkungen in Edward Rosen, *Three Copernican Treatises* (New York, 1939) übersetzt. Die einzige vollständige Übersetzung von Kopernikus' Hauptwerk ins Englische ist Nicolaus Copernicus, *On the Revolutions of the Heavenly Spheres*, übers. v. Charles Glenn Wallis, in *Great Books of the Western World*, vol. XVI (Chicago, 1952). Jeder Benutzer dieser Übersetzung sollte zuerst die höchst kritische Besprechung durch O. Neugebauer in *Isis* XLVI (1955), 69–71, zu Rate ziehen. (Anm. d. Übers.: Kürzlich erschien eine Neuausgabe von *De Revolutionibus* mit einer englischen Übersetzung durch E. Rosen (Macmillan, 1972, 1978, 3 Bde.)) Eine nützliche Übersetzung der Vorrede und des ersten Buches von *De Revolutionibus* ins Englische durch John F. Dobson und Selig Brodetsky wurde als *Occasional Notes of the Royal Astronomical Society*, vol. II, no. 10 (London, 1947) veröffentlicht. Alexandre Koyré, *Copernic: Des Révolutions des Orbés Célestes* (Paris, 1934), bietet eine empfehlenswerte französische und lateinische Ausgabe des ersten Buches mit dem Vorwort und eine tief schürfende einleitende Betrachtung. Die Standardausgabe des vollständigen Textes ist Maximilian Curtze, *Nicolai Copernici Thorunensis: De revolutionibus orbium caelestium libri VI* (Thorn, 1873). Wichtige besondere Aspekte von Kopernikus' Astronomie werden von Dreyer, *History* (s. o., Einleitung), seine Physik und Kosmologie von

Edgar Zilsel, „Copernicus and Mechanics“, *Journal of the History of Ideas* I (1940), 113–118, diskutiert. (Anm. d. Übers.: Deutsche Ausgaben von Kopernikus’ Hauptwerk: *Werke*, hrsg. F. Kubach (München, 1944); *Über die Kreisbewegungen der Weltkörper*, hrsg. G. Klaus (Berlin, 1959)).

## Kapitel 6

Viel brauchbares Material über die Reaktionen auf Kopernikus im sechzehnten und siebzehnten Jahrhundert ist enthalten in: Francis Johnson, *Astronomical Thought in Renaissance England* (Baltimore, 1937); Grant McColley, „An early friend of the Copernican theory: Gemma Frisius“, *Isis* XXVI (1937), 322–325; Dorothy Stimson, *The Gradual Acceptance of the Copernican Theory of the Universe* (New York, 1917); Lynn Thorndike, *Magic and Experimental Science* (s. o., Einleitung), bes. Band V, Kap. 18, und Band VI, Kap. 31, 32; und Andrew D. White, *A History of the Warfare of Science with Theology in Christendom* (New York, 1896, 2 Bde.). Thorndike’s Material ist am reichsten und am besten ausgewogen, doch muß man es vorsichtig verwenden, da seine Aussagen gelegentlich auf elementaren Fehlern hinsichtlich der Beziehung der kopernikanischen zur ptolemäischen Astronomie basieren (z. B. der Satz, der die Seiten 424 und 425 in Band V verbindet).

Die umfassendste und neueste Darstellung von Galilei’s Konflikt mit der Kirche stellt Giorgio de Santillana, *The Crime of Galilei* (Chicago, 1955) dar. Ältere Darstellungen sind jedoch immer noch nützlich, besonders Karl von Gebler, *Galileo Galilei and the Roman Curia*, übers. von Mrs. George Sturge (London, 1879), und James Brodrick, S. J., *The Life and Work of Blessed Robert Francis Cardinal Bellarmine* (London, 1928, 2 Bde.).

Zu Tycho Brahe beachte man J. L. E. Dreyer, *Tycho Brahe* (Edinburgh, 1890), und seine *Opera Omnia*, hrsg. v. J. L. E. Dreyer (Hauniae, 1913–1929, 15 Bde.). Die oft unterschätzte Popularität des tychonischen Systems wurde von Grant McColley in „Nicolas Reymers and the Fourth System of the World“, *Popular Astronomy* XLVI (1938), 25–31, und in „The Astronomy of Paradise Lost“, *Studies in Philology* XXXIV (1937), 209–247, bestens dokumentiert.

Es gibt keine adäquate Studie von Keplers Leben und Werk auf Englisch, doch Carola Baumgardt, *Johannes Kepler: Life and Letters* (New York, 1951) enthält einige nützliche Zitate aus den Quellen. Das Standardwerk ist Max Caspar, *Johannes Kepler* (Stuttgart, 1948). Die relevanten Zitate muß

man in den ausgezeichneten zwölf Bänden der *Gesammelten Werke*, hrsg. v. Max Caspar (München, 1938–1955) nachlesen. R. H. Baker, *Astronomy* (s. o., Kap. 1) gibt eine moderne Ableitung der Keplerschen Gesetze. Über ihre Entwicklung ist viel in Dreyer, *History* (s. o., Einleitung), und in A. Wolf, *A History of Science, Technology, and Philosophy in the XVI and XVII Centuries*, rev. Ausg. durch Douglas McKie (London, 1950), enthalten. Weitere wichtige Studien zu Kepler werden unten bei Kapitel 7 genannt.

Galileis Teleskopbeobachtungen werden in vielen der oben erwähnten Untersuchungen diskutiert. Den besten Zugang bieten jedoch direkt Galileo Galilei, *Himmelsbote* und *Dialog der Hauptweltsysteme* in *Werke*, hrsg. H. Blumenberg (Frankfurt/M., 1965). Hinweise auf die immense Auswirkung des Teleskops auf die wissenschaftliche und nichtwissenschaftliche Phantasie bieten Marjorie Hope Nicolson, „A World in the Moon“, Smith College Studies in Modern Languages XVII, no. 2 (Northampton, Mass., 1936); Martha Ornstein, *The Role of Scientific Societies in the Seventeenth Century* (Chicago, 1938); teilweise *The Portable Elizabethan Reader*, hrsg. v. Hiram Haydn (New York, 1946); und Edward Rosen, *The Naming of the Telescope* (New York, 1947). Der Großteil von Galileos Werk überschreitet den Rahmen dieses Buches; einige weitere wichtige Studien sind jedoch unter Kapitel 4 und 7 zitiert.

## Kapitel 7

Vorkopernikanische und nachkopernikanische Ideen zur Unendlichkeit des Universums werden bei Francis R. Johnson und Sanford V. Larkey, „Thomas Digges, the Copernican System, and the Idea of the Infinity of the Universe“, *Huntington Library Bulletin* V (April 1934), 69–117, diskutiert; weiters bei Alexandre Koyré, „Le vide et l' espace infini au XIV siecle“, *Archives d'histoire doctrinale et littéraire du moyen age* XXIV (1949), 45–91; Lovejoy, *Great Chain* (s. o., Kap. 4); Grant McColley, „Nicolas Copernicus and an Infinite Universe“, *Popular Astronomy* XLIV (1936), 525–533, und „The Seventeenth-Century Doctrine of a Plurality of Worlds“, *Annals of Science* I (1936), 385–430. Die Beiträge von McColley sind besonders aufschlußreich, obwohl er die Evidenz für Kopernikus' Glauben an ein unendliches Universum zu hoch einschätzt. In Johnsons Artikel werden die wesentlichen Teile aus Digges' *Perfit Description* nachgedruckt. Andere wichtige Originalquellen sind Nicholas of Cusa, *Of Learned Ignorance*, übers. v. Germain Heron (London, 1950) und Auszüge aus *De ludo globi*, ausgewählt und

übersetzt von Maurice de Gandillac in *Oeuvres choisies de Nicolas de Cues* (Paris, 1942). (Dt.: *Schriften des Nikolaus von Cusa in deutscher Übersetzung*, hrsg. E. Hoffmann (Leipzig, 1936)) Siehe auch die kommentierte Übersetzung von Bruno's *On the Infinite Universe and Worlds* bei Dorothea Waley Singer, *Giordano Bruno, His Life and Thought* (New York, 1950). Noch lange wird die Standardquelle zu diesem Problem Alexandre Koyré, *From the Closed World to the Infinite Universe* (Baltimore, 1957) sein (Dt.: *Von der geschlossenen Welt zum unendlichen Universum*, übers. R. Dornbacher (Frankfurt/M., 1969)).

Trotz der umfangreichen Literatur scheint es noch immer eine empfindliche Lücke in unserem Wissen zu geben, wie sich das Konzept eines unendlichen Universums entwickelte. Von Brunos Tod im Jahre 1600 bis zur Veröffentlichung von Descartes' *Principia Philosophiae* 1644 scheint sich kein nur irgendwie prominenter Kopernikaner öffentlich zum unendlichen Universum geäußert zu haben. Nach Descartes scheint jedoch kein Kopernikaner diese Idee abgelehnt zu haben. Dieses Schweigen in der ersten Hälfte des siebzehnten Jahrhunderts ist verständlich, doch bleiben dadurch Entwicklung und Ausbreitung des Glaubens an die Unendlichkeit des Universums im Dunkeln.

Fredrick A. Lange, *Geschichte des Materialismus*, (Frankfurt/M., 1974, Neuausg.), und Kurt Lasswitz, *Geschichte der Atomistik* (Hamburg, 1926, 2 Bde., 2. Aufl.), enthalten viel Wichtiges zur Entwicklung des Atomismus seit der Antike. Atomismus im 17. Jahrhundert wird von Marie Boas, „The Establishment of the Mechanical Philosophy“, *Osiris X* (1952), 412–541, behandelt; in dieser Monographie findet sich auch eine gute Bibliographie zu diesem Thema. Wesentliche Spezialstudien zur Rolle des Atomismus für die Entwicklung der modernen Naturwissenschaft sind u. a.: Fulton H. Anderson, *The Philosophy of Francis Bacon* (Chicago, 1948); Marie Boas, „Boyle as a Theoretical Scientist“, *Isis XLI* (1950), 261–268; Thomas S. Kuhn, „Robert Boyle and Structural Chemistry in the Seventeenth Century“, *Isis XLIII* (1952), 12–36; und Paul Mouy, *Le développement de la physique Cartésienne* (Paris, 1934). Wichtige und repräsentative Quellen für die hauptsächlichen Lehrmeinungen im 17. Jahrhundert sind René Descartes, *Les principes de la philosophie* und *Le monde ou le traité de la lumière* in den Bänden IX und XI der *Oeuvres de Descartes*, hrsg. v. Charles Adam und Paul Tannery (Paris, 1904, 1909) (Dt.: *Die Prinzipien der Philosophie*, übers. A. Buchenau (Hamburg, 1965)), und Robert Boyle, *Origin of Qualities and Forms*, in Band II von *The Works*, hrsg. v. A. Millar (London, 1744).

Zu den Problemen, die die kopernikanische Theorie der irdischen Physik brachte, beachte man Alexandre Koyré, *Études Galiléennes* (Paris, 1939, 2 Bde.), „Galileo and the Scientific Revolution of the Seventeenth Century“, *Philosophical Review* LII (1943), 333–348, und besonders „A Documentary History of the Problem of Fall from Kepler to Newton“, *Transactions of the American Philosophical Society* (n. s.) XXXXV, no. 4 (1955), 329–395. Keplers Himmelsmechanik wird in den folgenden Werken diskutiert: Dreyer, *History* (s. o., Einleitung); Gerald Holton, „Johannes Kepler's Universe: Its Physics and Metaphysics“, *American Journal of Physics* XXIV (1956), 340–351; und bei Alexandre Koyré, „La gravitation universelle, de Kepler à Newton“, *Archives internationales d'histoire des sciences* XXX (1951), 638–653. Borellis System wird bei Angus Armitage, „Borelli's Hypothesis' and the Rise of Celestial Mechanics“, *Annals of Science* VI (1950), 268–282, und bei Alexandre Koyré, „La méchanique céleste de J. A. Borelli“, *Revue d'histoire des Sciences* V (1952), 101–138 beschrieben. Das Werk von Robert Hooke in seiner Beziehung zu Newton wird von Luise D. Patterson, „Hooke's Gravitation Theory and its Influence on Newton“, *Isis* XL (1949), 327–341, und XLI (1950), 32–45, und auf Grund neuen Materials von Alexandre Koyré, „An Unpublished Letter of Robert Hooke to Isaac Newton“, *Isis* XLIII (1952), 312–337, behandelt. Zahlreiche Dokumente, die Hooke's Werk illustrieren, findet man bei R. T. Gunther, *Early Science in Oxford*, (Oxford, 1920–1945, 14 Bde.), besonders in den Bänden VI und VIII.

Hinweise auf die reiche Literatur über Newton findet man in fast allen Werken, die in dem einleitenden Abschnitt dieser Anmerkungen erwähnt wurden. Soweit meine Darstellung neuartig ist, bezieht sie sich auf Newtons Atomismus und die davon abhängigen Grundlagen der *Principia*. Zum Teil leitet sich diese Darstellung von den folgenden Werken ab, beziehungsweise wird sie von ihnen gestützt: Florian Cajori, „Ce que Newton doit à Descartes“, *L'enseignement mathématique* XXV (1926), 7–11, und „Newton's Twenty Years' Delay in Announcing the Law of Gravitation“, in *Sir Isaac Newton*, hrsg. v. History of Science Society (Baltimore, 1928); A. R. Hall, „Sir Isaac Newton's Note-Book, 1661–65“, *Cambridge Historical Journal* IX (1950), 291–311; Thomas S. Kuhn, „Newton's '31st Query' and the Degradation of Gold“, *Isis* XLII (1951), 296–298, und „Preface to Newton's Optical Papers“, in *Isaac Newton's Papers and Letters on Natural Philosophy*, hrsg. v. I. B. Cohen (Cambridge, Mass., 1958); und S. I. Vavilov, „Newton and the Atomic Theory“, in *The Royal Society Newton Tercentenary Cele-*

brations (Cambridge, Eng., 1947). Das Quellmaterial ist enthalten in Sir Isaac Newton, *Mathematical Principles of Natural Philosophy*, hrsg. v. Florian Cajori (Berkeley, Calif., 1946), und *Opticks* (New York, 1952, Nachdruck).

### *Technischer Anhang*

R. H. Baker, *Astronomy* (s. o., Kapitel 1), diskutiert die Zeitgleichung, das Vorrücken der Äquinoktien, Verfinsterungen und Mondphasen in moderner Beschreibung. (Eine kurze Einführung in Deutsch bietet J. Hermann, *dtv-Atlas zur Astronomie* (München, 1973); A. d. Übers.) Heath, *Aristarchus* (s. o., Kapitel 1), und Dreyer, *History* (s. o., Einleitung), enthalten viel historische Information zu den erwähnten Themen außer der Zeitgleichung. Zu ihr beachte man A. Rome, „Le problème de l'équation du temps chez Ptolémée“, *Annales de la société scientifique de Bruxelles* (Serie 1) LIX (1939), 211–224. Dreyer und Heath behandeln auch die antiken Bestimmungen der astronomischen Dimensionen, zu diesem Thema s. a. Aubrey Diller, „The Ancient Measurements of the Earth“, *Isis* XL (1949), 6–12. Zusätzliche Details über die von den Arabern verfeinerte Beschreibung der Präzession findet man bei Francis J. Carmody, *Al-Bitruji: de motibus celorum* (Berkeley, Calif., 1952), und „Notes on Astronomical Works of Thabit b. Qurra“, *Isis* XLVI (1955), 235–242.

# Sachwortverzeichnis

- Abendstern, 49, 64, 227  
Absoluter Raum, s. aristotelischer Raum  
Adams, J. C., 264  
Äquant, 70–72  
Äquator, Himmels-, 33, 34, 37, 39, 162, 269–270;  
–, irdischer, 34, 37  
Äquinoktien, 9–10, 13, 26, 37–38, 66–71, 162, 163, 166, 269–270;  
–, Präzession, 15, 111, 114, 263, 272–275  
Äther, 78–81, 90–91  
Al Fargani, 80–81, 165  
Alpetragius, 181  
Amici, G.B., 139  
Anaximander, 27–28  
Anima motrix, 217–219, 233, 247–252  
Aphel, 218  
Apollonius, 60, 71–73  
Aristarch, 44, 145, 164, 279–283  
Aristoteles, 77, 104, 110–111;  
–, Kritik, 82, 105, 108, 114–123, 154–158, 212;  
–, Authorität, 77, 82, 94–97, 102, 110, 115, 117, 127  
Aristotelische Bewegungstheorie, 81, 83–86, 94–97, 118–119, 154, 246  
Aristotelische Kosmologie, 59, 78–82, 90–92, 108, 112  
Aristotelischer Raum, 78, 86–88, 96–97, 234  
Astrologie, 25, 50, 91–93, 97, 106, 210  
Astronomie, prähistorische, 9–11, 14, 48, 50;  
–, hellenische, 5, 28–29, 50, 52, 103–104;  
–, hellenistische, 66, 72, 104–105;  
–, moslemische, 72, 73, 101, 111, 272–274;  
–, mittelalterliche, 73, 111–113, 123–124;  
–, Renaissance, 68, 125–126  
Astronomische Tafeln, 101, 192, 200, 223  
Atomismus, 43, 203, 233, 235, 238–240  
Augustinus, 106, 128
- Bellarmino, Kardinal, 202, 229  
Beobachtungen, antike, 8, 13–14, 27  
Blundeville, Thomas, 191  
Bodin, Jean, 195  
Bonamico, F., 120  
Borelli, G. A., 250–252, 256  
Brahe, Tycho, 92, 214, 224;  
–, Rolle in der kopernikanischen Revolution, 205, 208–209;  
–, Beobachtungen, 165, 204, 205, 215–217  
Bruno, Giordano, 203, 224, 238–240, 246  
Buridan, Jean, 119–122, 124
- Callippus, 59, 79  
Calvin, 124, 196, 199–200  
Capella, Martinus, 182
- Dante, 111–114, 197, 199  
Deferent, 60–62  
Demokrit, s. Atomismus  
Descartes, René, 241–245, 250, 252, 255–256, 261  
Digges, Thomas, 191, 236–237  
Donne, John, 198–199, 230, 240  
Du Bartas, 194

- Einstein, Albert, 4, 98, 232
- Ekliptik, 22–26, 36–39, 47–49, 56–58, 162, 269;
- , Ebene, 54, 61–62, 64, 167;
  - , Pol, 272–274;
  - , *Schiefe*, 37, 269, 272
- Ellipse, 215–216, 229, 249, 251, 253–254
- Empyreische Sphäre, 111–112
- Entdeckungsreisen, 42, 125, 149
- Entfernung, im Winkelmaß, 15, 20, 23, 26, 224;
- , astronomische, 55, 80–91, 165, 205, 278–282, S. a. Größe des Universums
- Epikur, s. Atomismus
- Epizykel, 60, 62, 67–69, 73
- Epizykel-Deferent, 60–65, 67, 73–74, 76, 79. S. a. ptolemäisches System
- Eratosthenes, 278
- Erde, Größe und Gestalt, 30–31, 55, 80, 84–85, 148, 278–279
- Eudoxus, s. homozentrische Sphären
- Exzenter, 70–72. S. a. ptolemäisches System
- Ficino, Marsilio, 130
- Finsternisse, 28, 31, 50, 55, 92, 275–277, 280
- Foscarini, P. A., 202
- Fracastoro, G., 139
- Galilei, 127, 176, 203, 234;
- und kopernik. Revolution, 226–230;
  - , Bewegungstheorie, 94, 117–118, 122, 241–242, 247;
  - , Teleskopbeobachtungen, 202, 223–229, 232
- Gegenreformation, 202–203
- Gewicht, 245, 255, 262, 265
- Gilbert, William, 248
- Gravitation, 255–263, 265
- Größe des Universums, 80, 89, 132, 165, 185, 205;
- , endliche, 42, 88–89, 160, 234;
  - , unendliche, 42, 88–89, 145, 162, 197, 203, 224, 235–240, 250
- Heraklid, 44, 74, 85, 143, 152, 162, 206
- Himmelsmechanik, 52, 78–79, 88, 104, 114, 121–122, 217–220, 243–245, 246–254, 257–263
- Hipparch, 60, 72–74, 272–274
- Homozentrische Sphären, 56–60, 78–79, 139
- Hooke, Robert, 250–259
- Humanismus, 127–131
- Huyghens, Christian, 245, 256
- Impetustheorie, 118–122, 241–242
- Impuls, 122, 242
- Jahr, 12, 48, 275
- Jahreszeiten, 11–12, 25, 275
- John of Holywood, 124, 193
- Kalender, 8–12, 47–48, 125–126, 200, 274
- Katholische Kirche, und Astronomie, 93, 105–111, 201;
- , und kopernikanische Lehre, 105, 192, 195–199, 226
- Kepler, 93, 127, 129, 191, 208–209, 212–215, 228–230, 234, 246–250, 256;
- , Gesetze, 215–220, 229, 247, 259, 261, 264;
  - , Neuplatonismus, 131, 213, 217–222, 247
- Kometen, 46, 211, 247
- Konjunktion, 50, 183
- Kopernikanische Astronomie, 135, 145, 152, 160–179, 183–185, 213–217, 273;
- , als Rechenmethode, 192, 200, 229;
  - , Harmonien, 142, 176–186, 188;

- , Vergleich mit der ptolemäischen, 74, 167, 169–170, 173–179, 183, 186, 227;
- , Aufnahme, 131, 175, 187, 190–193, 205, 213, 226, 230–231;
- , Vergleich mit der tychonischen Astronomie, 206–209
- Kopernikanische Kosmologie, 42, 93, 146–160, 224, 226, 234–235;
- , Vorläufer, 43, 115–116, 142, 145, 152, 236–240;
- , Physik, 85–86, 114–122, 154–160, 233, 241, 245–247, 255–257, 264–265;
- , Aufnahme, 187, 191, 194–205, 212, 226–231, 240–241;
- , und Religion, 91, 130–131, 195–203, 265–266
- Kopernikanische Revolution, 1–4, 42, 176, 186–189, 231, 265–268;
- , Ursachen, 8, 12, 46, 51, 55, 74–76, 82, 99, 104, 124–133, 140–141, 274
- Kopernikus, Nikolaus, 72, 129;
  - , und der Kalender, 12, 125–126, 143, 275;
  - , Commentariolus, 138, 175;
  - , Konservatismus, 32, 59, 82, 89, 135, 146, 151, 160, 168, 187, 246;
  - , De Revolutionibus, 59, 139, 142–145, 147–160, 175, 181–191, 197, 200;
  - , und Äquanten, 69–70, 72, 140;
  - , Motive, 126, 138–140, 142, 146, 187, 275;
  - , und Neuplatonismus, 129, 131, 142, 184–186, 204
- Korpuskulare Anschauung, 240–245, 250, 255, 260–263. S. a. Atomismus
- Kosmas, 107
- Kosmologie, Aufgaben, 6–7, 40;
  - , Beziehung zur Astronomie, 5–8, 25–28, 103, 113;
  - , primitive, 4–8, 28;
  - , griechische, 27–30, 43–44;
  - , mittelalterliche, 40, 44, 55;
- , christliche, 91, 107–110, 112–114, 198–200. S. a. Aristotelische Kosmologie; Kopernikanische Kosmologie
- Kristalline Sphären, 78–82, 88, 209, 283
- Lactantius, 108, 144, 199
- Leukipp, S. Atomismus
- Leverrier, U. J. J., 264
- Lukrez, s. Atomismus
- Luther, Martin, 124, 195–196
- Mästlin, Michael, 191, 213
- Magnetismus, 248–249
- Mars, 50, 174, 215
- Melanchthon, Philipp, 196, 200
- Milton, John, 7, 198–199
- Mond, 47, 54, 224;
  - , Phasen, 275–277
- Morgenstern, 49, 64
- Müller, Johannes, 124, 126
- Neunte Sphäre, 111, 272
- Neuplatonismus, 128–132, 201, 203, 234, 236–238
- Newton, Isaac, 188, 250, 256–263, 265, 273
- Newtonsche Dynamik, 122, 259, 271
- Newtonscher Raum, 263
- Newtonsches Universum, 1, 98, 234, 245, 263–264, 266–268
- Niketas, 142
- Nikolaus von Cusa, 145, 201, 236–238
- Novara, D. M. de, 129
- Novae, 210–212
- Opposition der Planeten, 50, 182, 185
- Oresme, Nicole, 114–116, 120–121, 124, 159, 161–162, 201, 256
- Osiander, Andreas, 192, 200
- Parallaxe, 162–165, 166–168, 205–208, 211
- Paul III, Papst, 137, 144
- Perihel, 218–219

- Petrarch, 127
- Peuerbach, Georg, 124
- Philoponus, John, 119
- Planeten, 46;
- , scheinbare Bewegung, 46–51;
  - , tägliche Bewegung, 46–47, 53–65;
  - , frühe Theorien, 7, 27–28, 43–44;
  - , innere, 44, 49–50, 53–54, 64–66, 170–171, 177, 179–180, 183, 206–208;
  - , Ordnung, 53–54, 176–178, 181–185;
  - , Perioden, 48, 171, 178;
  - , Problem, 8, 51–52, 55, 66, 72–74, 93, 136, 176, 205, 214–216;
  - , äußere, 50, 170–171, 177, 183;
  - , Veränderlichkeit der Helligkeit, 50, 59, 62, 171
- Plato, 30–31, 51, 56, 78, 96, 128, 181
- Pol, Himmels-, 16–23, 32–34, 37, 56, 272–275;
- , irdischer, 34, 37
- Proclus, 129–130
- Ptolemäisches System, 7, 66–72, 82, 140, 213;
- , Niedergang, 226–231
- Ptolemäus, 50, 54, 71–72, 79, 92, 99, 103, 125, 181, 272–274;
- , und aristotelische Wissenschaft, 85;
  - , Kritik, 69–70, 155;
  - , kristalline Sphären, 79, 104;
  - , Almagest, 72, 85, 92, 101, 123;
  - , Tetrabiblos, 92
- Pythagoreer, 43, 128, 143
- Reformation, 124, 199–200
- Reguläre Körper, 221–223
- Reinhold, Erasmus, 192, 200
- Renaissance, 124–128;
- , des zwölften Jhdts., 101
- Rheticus, 138, 191, 200
- Rückläufige Bewegung, 48–49;
- , bei homozentrischen Sphären, 57–59;
  - , in Epizykel-Deferentensystemen, 61–65;
  - , im kopernikanischen System, 153, 169–172
- Schaltjahr, 11–12
- Scholastik, 101–105, 122, 235
- Sonne, 21, 46; jährliche und tägliche Bewegung, 21–25, 36–38;
- , scheinbare Bewegung, 8–13, 269, 271;
  - , unregelmäßige Bewegung, 66–67, 269–271;
  - , im Zwei-Sphärenuniversum, 35–38
- Sonnenflecken, 225
- Sonnentag, mittlerer, 270;
- , wahrer, 9, 269–270
- Sonnenverehrung, 11, 129–131. S. a.
- Astrologie
- Sonnenwenden, 9–10, 13, 25–26, 37–38, 67–70, 167, 270
- Sternbilder, 13–16;
- , Großer Wagen, 13–16, 21, 210;
  - , Tierkreis, 25, 92, 269
- Sterne, scheinbare Bewegung, 13–22, 25, 32, 256, 269, 272;
- , Zirkumpolar-, 6, 19, 21–22, 32–34
- Sternensphäre, 29, 32–39, 52–57, 61, 234–238, 270;
- , tägliche Bewegung, 29, 35–36
- Sternkarten, 21–25
- Stonehenge, 11
- Sublunare Region, 81–82; S. a. aristotelische Kosmologie
- Superlunare Region, 79, 88, 90–91
- Symmetrie, 30–32, 129, 185
- Tageskreise, 18, 29, 33, 37, 272
- Teleskop, 202, 223–229, 264
- Theorie, s. Weltbilder
- Thomas von Aquin, 108–111
- Trennung Himmel-Erde, 44, 90–92, 93, 121–122, 210–211, 225, 240, 255
- Trägheitsbewegung, 241–243, 250, 256–258
- Tychonisches System, 74, 205–209, 217, 226, 230
- Universitäten, 101, 127

- Vacuum, 42, 78, 87–89, 239–241, 243
- Venus, 64;  
–, Phasen, 226–227
- Vielfalt der Welten, 43, 78, 88–89, 145,  
203, 225, 238–240, 243–245
- Vitruv, 53
- Weltbilder, Rolle, 40, 74–76, 82;  
–, Ökonomie, 37, 74, 76, 89, 172, 217,  
230, 268;
- , Nutzen, 41–42, 54, 65–66, 76, 212,  
217, 264–265, 267, 278, 282;  
–, und Beobachtungen, 25–26, 38;  
–, psychologische Funktion, 40–41,  
104, 112
- Whitehead, A. N., 123
- Wirbelkosmologie, 243–245
- Wissenschaftliche Revolution, 2, 231,  
233–234, 264–265
- Wissenschaftliche Revolutionen, 3–4, 93,  
134–135, 188, 232–233, 266–268;  
–, Struktur, 75
- Zeitgleichung, 270
- Zeitmessung, 9, 269–271. S. a. Kalender
- Zwei-Sphärenuniversum, 25–39, 55,  
74–76, 275;  
–, Argumente, 29–35, 83–86, 108;  
–, Planeten und Sterne im, 32–34,  
51–54