

I. Roshanski

# WISSENSCHAFTEN IN DER ANTIKE



Thales von Milet  
Pythagoras  
Hippokrates  
Platon  
Aristoteles  
Euklid  
Archimedes  
Ptolemaios

Ī. Roshanski

# **WISSENSCHAFTEN IN DER ANTIKE**

**Verlag MIR Moskau  
Urania-Verlag  
Leipzig • Jena • Berlin**

**Titel der Originalausgabe:**

И. Д. Рожанский, Античная паука

Aus dem Russischen von Lew Zybatow, Leipzig

Wissenschaftliche Bearbeitung von Dr. Dietrich Ehlers, Berlin

**Rožanskij, Ivan Dmitrijevič:**

Wissenschaften in der Antike/I. D. Roshanski.

/Aus d. Russ. von Lew Zybatow. Wiss. Bearb. von Dietrich

Ehlers/. — 1. Aufl. — Moskau: Verlag Mir; Leipzig;

Jena; Berlin: Urania-Verlag, 1986. — 200 S.

Antičnaja nauka /dt./

NE: Verf.: EST

Gemeinschaftsausgabe des Verlages MIR Moskau

und des Urania-Verlages Leipzig · Jena · Berlin

Alle Rechte an dieser deutschsprachigen Ausgabe bei

Verlag MIR Moskau und Urania-Verlag Leipzig · Jena · Berlin

© Издательство «Наука», Москва 1980

Verlag MIR Moskau und Urania-Verlag Leipzig · Jena · Berlin

1. Auflage

VLN 212-475/125/86 · LSV 023 9

Lektoren: Ulrike Pondorf/Arkadi Lewin

Einband: Christoph Neunhöffer, Markkleeberg

Satz und Druck: UdSSR

Best.-Nr.: 654 093 4

00980

# INHALT

## **Einleitung 7**

## **Die Quellen der frühgriechischen Wissenschaft 20**

### **Die frühgriechische Naturlehre 37**

Was bedeutet »Natur«? 37

Die Schule von Milet 38

Die Pythagoreer 43

Heraklit und die Eleaten 48

Die nachparmenideische Wissenschaft 53

Leukipp und Demokrit 60

Einzelne Wissensgebiete im 6./5. Jahrhundert v. u. Z. 66

### **Die Epoche von Platon und Aristoteles 84**

Allgemeine Lage am Ende des 5. Jahrhunderts v. u. Z. 84

Platon und sein Weltbild 86

Eudoxos — Vorbote der Wissenschaft eines neuen Typs 94

Aristoteles 102

Die peripatetische Schule 114

### **Der Hellenismus 118**

Die wichtigsten philosophischen Lehren 120

Geographie 124

Mathematik 128

Astronomie 141

Mechanik 152

Optik 160

Biologie und Medizin 162

### **Die Wissenschaft in der römischen Kaiserzeit 165**

Geographie 167

Mathematik 171

Astronomie 176

Mechanik 181

Optik 184

Biologie und Medizin 186

**Nachwort 192**

**Literatur 195**

**Personenregister 197**



## EINLEITUNG

Wer sich mit der Geschichte der antiken Wissenschaft beschäftigen möchte, sollte zuerst nach dem Sinn der Wortverbindung »antike Wissenschaft« fragen. Was ist Wissenschaft überhaupt? Wodurch unterscheidet sie sich von anderen Formen materieller und geistiger Tätigkeit: vom Handwerk, von den Künsten oder von der Religion? Kommt der kulturell-historischen Erscheinung, die wir antike Wissenschaft nennen, eigentlich schon Wissenschaftlichkeit zu? Wenn ja, entstand Wissenschaft erstmalig in Griechenland, oder gab es Wissenschaft schon in Ländern mit älterer Kultur (Ägypten, Mesopotamien)? Trifft die erste Annahme zu, was waren die »vorwissenschaftlichen« Quellen der griechischen Wissenschaft? Gilt aber die zweite Annahme, in welchem Verhältnis stand dann die griechische zur orientalischen Wissenschaft? Und schließlich, gibt es wesentliche Unterschiede zwischen der antiken und der modernen Wissenschaft?

Über den Begriff der Wissenschaft selbst gibt es unter den Wissenschaftswissenschaftlern ziemlich große Meinungsverschiedenheiten. Zwei Auffassungen, die in gewisser Weise Extreme sind, sollen hier genannt werden. Nach der einen kam Wissenschaft erst im Europa des 16./17. Jahrhunderts auf, also in jener Periode großer geistiger Umwälzungen, in der Gelehrte wie Galilei, Kepler, Descartes und Newton wirkten. In dieser Zeit erlebte nicht nur die mathematische Naturbetrachtung einen gewaltigen Aufschwung, sondern es gewann vor allem das Experiment als Erkenntnismittel entscheidend an Boden. Und mit dem Experiment hat sich die eigentliche wissenschaftliche Methode entwickelt. Die antiken Denker, da noch ohne Experiment, hätten dagegen ihre Spekulationen keiner wirklichen Überprüfung unterziehen können. Eine Ausnahme sei die Mathematik, die keines Experimentes bedarf. Eine wissenschaftliche Naturforschung

habe es jedoch im Altertum nicht gegeben; allenfalls schwache Ansätze der späteren Wissenschaftszweige, die vorschnell zufällige Beobachtungen und praktische Erfahrungen verallgemeinert hätten. Die alten kosmologischen Konzeptionen könnten keinesfalls als Wissenschaft anerkannt werden, bestenfalls als Naturphilosophie. Dieser Terminus hat aber in den Ohren der Vertreter der sogenannten exakten Naturwissenschaft einen deutlich negativen Beiklang.

Die gegenteilige Auffassung grenzt Wissenschaft überhaupt nicht derart ein. Als Wissenschaft dürfe bereits ein beliebiges Quantum an Wissen gelten, das sich auf die Wirklichkeit bezieht. Demnach beginnt Mathematik mit den ersten, elementaren Rechenoperationen, die Astronomie mit den ersten Himmelsbeobachtungen, und das Vorhandensein einiger Kenntnisse über die Tier- und Pflanzenwelt lasse sich schon als Schritt zur Zoologie und Botanik verstehen. Weder die griechische noch irgendeine andere Zivilisation könnte also für sich beanspruchen, Wiege der Wissenschaft zu sein, da ihre Ursprünge in der Urgesellschaft zu suchen wären.

Dieser zweite, extrem weitgefaßte Wissenschaftsbegriff macht Wissenschaft zu einer Art außerhistorischen Erscheinung. Denn jedes Handwerk, ob es nun mit Metallverarbeitung, Töpferei oder Ackerbau und Viehzucht zu tun hat, setzt nicht nur rein manuelle Fertigkeiten, sondern zugleich beträchtliche Naturkenntnisse voraus. Das gilt schon für die ältesten Arten der menschlichen Tätigkeit wie Jagd und Fischfang. Um bei der Jagd erfolgreich sein zu können, muß man die Wildwechsel, das typische Verhalten der Tiere in Gefahrensituationen und vieles andere genau kennen. Zweifellos besaßen die Jäger der Urzeit nicht nur schlechthin solche Kenntnisse, sondern sie dürften darin jedem »zivilisierten« Menschen überlegen gewesen sein. Diese Annahme wird auch durch die Ergebnisse der modernen Anthropologie gestützt. So weist Claude Lévi-Strauss (geb. 1908 Brüssel; franz. Ethnologe, Soziologe) auf einen urgemeinschaftlich lebenden Stamm auf den Philippinen hin, dessen Sprache Wörter zur Bezeichnung von 461 Tierarten, darunter 60 Fischarten, 85 Mollusken usw., enthält. Die Vertreter dieses Stammes verfügen offenbar über beachtliche zoologische Kenntnisse. Besitzen sie aber deshalb schon eine biologische Wissenschaft? Die beiden skizzierten Wissenschaftsauffas-

sungen sind gewiß Extreme, und ein angemessener Standpunkt muß irgendwo dazwischenliegen. Ohne weitere Umschweife wollen wir wesentliche Merkmale nennen, die der Wissenschaft zukommen müssen, um diesen Namen zu verdienen.

1. Wissenschaft ist nicht eine Summe irgendwelcher Kenntnisse, sondern vielmehr eine spezifische Tätigkeit zur Gewinnung neuen Wissens. Sie setzt vor allem eine gewisse Gemeinschaft oder Gruppe von Menschen voraus, die sie betreibt. Noch vor nicht allzulanger Zeit waren nur die Wissenschaftler selbst zugleich Träger des bereits vorhandenen als auch Schöpfer des neuen Wissens. Gegenwärtig ist am Wissenserwerb ein ganzes Berufsspektrum beteiligt; dazu gehören die Leiter wissenschaftlicher Kollektive, Institute und Laboratorien, die wissenschaftlichen Mitarbeiter, ferner Ingenieure, Techniker, Laboranten, Programmierer usw. Zum anderen bedarf diese Tätigkeit bestimmter Mittel; dazu zählen nicht nur solche Mittel wie Meßinstrumente und experimentelle Anlagen, sondern auch die Gesamtheit der Forschungsmethoden. Und schließlich muß die Möglichkeit gegeben sein, das alte und das neue Wissen auf geeignete Weise vor dem Verlust zu schützen, und das bedeutet vor allem, über eine entwickelte Schriftsprache zu verfügen. In einer Gesellschaft ohne Schriftsprache ist Wissenschaft undenkbar. Bis in die jüngste Zeit wurden wissenschaftliche Informationen hauptsächlich in Büchern, Artikeln und anderen schriftlichen Dokumenten festgehalten. Gegenwärtig werden die seit alters existierenden Formen der Informationsfixierung durch neue ergänzt: Fotografie, Tonbandaufnahmen, elektronische Datenverarbeitung etc.

Hieraus folgt, daß man jenen Zivilisationen, in denen Wissen zwar fixiert und weitergegeben, aber nicht eigentlich weiterentwickelt wurde, keine Wissenschaft zuschreiben kann. Ein Beispiel dafür ist das alte Ägypten. Die für die Bewahrung des Wissens verantwortliche soziale Schicht bildeten hier die Priester; in ihrem Kreis wurden Kenntnisse ohne wesentliche Veränderungen von Generation zu Generation überliefert. Die Entwicklung des Wissens gehörte wohl nicht zu ihren wichtigsten Aufgaben. Dies entspricht auch den Berichten über den Charakter des Unterrichts, der im alten Ägypten auf die Aneignung gewisser Verfahren und Regeln hinauslief. Dabei wurde überhaupt nicht gefragt,

auf welche Art und Weise diese Verfahren und Regeln gewonnen wurden und ob man sie nicht durch bessere ersetzen könnte. Und wenn sich im Laufe der Jahrhunderte trotzdem das Wissen allmählich erweiterte, so geschah dies höchstwahrscheinlich spontan und trug nicht den Charakter einer zielgerichteten Tätigkeit.

Dynamischer war in dieser Hinsicht die babylonische Zivilisation. So erreichten die Babylonier im ersten Jahrtausend v. u. Z. Beachtliches beim Beobachten des Himmels. Die von ihnen im Laufe vieler Jahrhunderte auf Tontafeln sorgfältig registrierten Daten ermöglichten den Sternkundigen, bestimmte Ereignisse wie die Mondfinsternisse vorauszusagen. Auf diesen Fortschritt wies besonders Otto Neugebauer (geb. 1899), der unter Benutzung der modernen mathematischen Schreibweise die schwierigen babylonischen Berechnungsmethoden entschlüsselt und beschrieben hat, ausdrücklich hin.

Jedoch stehen die von den Babyloniern erreichten Erfolge in keinem Verhältnis zu der ungewöhnlich intensiven intellektuellen Tätigkeit der Griechen seit dem 6. Jahrhundert v. u. Z. Es genügt schon zu bedenken, daß die Entwicklung der Astronomie von Thales bis Eudoxos, der Mathematik von Pythagoras bis Euklid und der Naturforschung von Anaximander bis Aristoteles und Theophrast nur knapp drei Jahrhunderte beanspruchte. Dies erscheint um so erstaunlicher in Anbetracht der bescheidenen Mittel, die den Griechen zu Gebote standen. Aber weniger in der Sammlung und Sichtung, sondern in der geistigen Verarbeitung des empirischen Materials bestand die damals beispiellose Leistung der griechischen Denker. Daß sie dabei zu spekulativen Schlußfolgerungen gelangten, die weder bestätigt noch bewiesen werden konnten, tut den Leistungen der griechischen Denker keinesfalls Abbruch.

2. Ein zweites Merkmal der Wissenschaft, früher sprach man von »reiner« Wissenschaft, besteht in ihrer Eigenwertigkeit. Sie zielt auf die Erkenntnis um der Erkenntnis willen oder auf die Erkenntnis der Wahrheit ab. Wissenschaftliche Tätigkeit in diesem Sinne strebt also nicht primär oder gar ausschließlich die Lösung praktischer Aufgaben an; andernfalls hörte sie auf, Wissenschaft zu sein. Dem widerspricht keineswegs der Umstand, daß große wissenschaftliche Entdeckungen oft auch große praktische Bedeutung gewinnen, wenn ein bestimmtes gesellschaftliches Be-

dürfnis vorhanden ist. Heute haben Physik, Chemie, Biologie, Geologie usw. eine derartige Bedeutung erlangt, daß es schwerfällt, sie als »reine« Wissenschaften zu bezeichnen. Deshalb zieht man bereits innerhalb der Wissenschaft die Grenze zwischen Grundlagenforschung und angewandter Forschung. In ihrem Verhältnis dominiert die Grundlagenforschung, obwohl auch die angewandte Forschung zu Ergebnissen mit grundlegender Bedeutung gelangen kann. Gelegentlich überschneiden sich ihre Untersuchungsfelder und unterscheiden sich im wesentlichen nur durch die Aufgabenstellung, wie dies etwa bei der Thermodynamik und der Kälte- bzw. Wärmetechnik, der Kernphysik und der Reaktortechnik der Fall ist.

Wenn wir zum Beispiel auf die babylonische Astronomie zurückblicken, erscheint sie in modernerer Terminologie als Spezialdisziplin praktischen Wissens, da sie rein praktische Ziele verfolgte. Die babylonischen Sterndeuter und Astrologen interessierten sich am wenigsten für die Beschaffenheit des Universums, für die wahre im Gegensatz zur sichtbaren Bewegung der Planeten, für die Ursachen der Sonnen- und Mondfinsternisse usw. So zu fragen, lag ihnen wohl überhaupt fern. Ihre Aufgabe war die Prognose solcher Erscheinungen, die damals als günstig oder unheilrohrend für Mensch und Staat galten. Deshalb wäre die babylonische Astronomie, ungeachtet ihrer unzähligen Beobachtungen und komplizierten Berechnungsmethoden, nicht treffend als Wissenschaft zu bezeichnen.

Ein völlig anderes Bild ergibt sich für Griechenland. Ohne über solche detaillierten astronomischen Kenntnisse wie die Babylonier zu verfügen, fragten die griechischen Denker von Anfang an nach der Struktur der Welt als Einheit und Ganzheit. Dieser Frage gingen sie nicht aus primär praktischen, sondern aus intellektuellen Beweggründen nach. Ihre Versuche umfassender Welterklärung führten zunächst zu rein spekulativ gewonnenen Modellen des Kosmos, die uns heute zwar phantastisch erscheinen mögen, aber die Eigentümlichkeit aller späteren Naturwissenschaften, im und durch das Modell die Naturerscheinungen durchsichtig oder verständlich zu machen, bereits besaßen. Ein ähnliches Bild bot die Mathematik. Weder Babylonier noch Ägypter unterschieden zwischen exakten und Näherungslösungen. Jede für die Praxis brauchbare Lösung wurde anerkannt. Im Gegensatz dazu suchten die Griechen nach

strengen, logisch einwandfreien Lösungen der mathematischen Probleme. Das Ergebnis ihrer Bemühungen war eine axiomatisch-deduktiv aufgebaute Mathematik, die den Charakter der ganzen nachfolgenden Mathematik bestimmt hat. Die orientalische Mathematik hatte es nicht einmal in ihren höchsten Leistungen, die für die Griechen lange unerreichbar blieben, vermocht, sich der Deduktionsmethode zu nähern.

Also ist die griechische Wissenschaft von Anfang an durch ihren theoretischen Charakter, durch ihr Streben nach Erkenntnis geprägt und nicht durch die Absicht eventueller praktischer Nutzung im Bereich der Produktion. Diese reine Erkenntnisintention wirkte in der Anfangsphase ohne Zweifel nicht nur weltanschaulich progressiv, sondern auch stimulierend für die Entwicklung des wissenschaftlichen Denkens.

3. Ein drittes Merkmal ist der rationale Charakter der Wissenschaft. Heute scheint diese Forderung selbstverständlich, aber man sollte nicht vergessen, daß es zunächst die Mythologie, die Magie, den Glauben an übernatürliche Kräfte zurückzudrängen galt. Erinnern wir uns Homers »Ilias«, in der fast alle Taten, Lösungen und selbst innere Motive der Helden vom Eingreifen der Götter bestimmt sind. Vom Mythos zur rationalen Erklärung oder, wie man sagt, vom »Mythos zum Logos« voranzuschreiten, war eine geistig-kulturelle Errungenschaft ersten Ranges.

Dieser Übergang war ein längerer Prozeß, der sich nicht überall und in gleicher Weise vollzog. So beruhte zum Beispiel die babylonische Astronomie, obwohl methodisch durchaus rational, auf dem Glauben an eine irrationale Verbindung zwischen den Konstellationen am Himmel und den menschlichen Schicksalen. Dieser Glaube scheint tiefe Wurzeln zu haben, davon zeugt auch die Zählbarkeit der Astrologie, der noch heute manche Menschen etwas abgewinnen können. Im Zeitalter der Kernspaltung betreibt wohl kaum noch jemand ernstlich Alchimie, aber der Glaube, daß verschiedene Edelsteine und Halbedelsteine wohlthuende oder verderbliche Eigenschaften haben, lebt noch fort. Dieser alte Aberglaube hat die ersten Schritte der Mineralogie begleitet.

Später werden wir noch sehen, daß sich die ersten griechischen Denker besonders intensiv mit den Mythen über die Entstehung der Welt auseinandersetzten. Bei der Auf-

stellung ihrer kosmogonischen Konzeption haben die frühen griechischen Denker diese Mythen umgearbeitet, sie von den hergebrachten Motivierungen und Gestalten gereinigt, ohne jedoch ihre innere Struktur anzutasten. In ihren Theorien vom Ursprung der Welt ging es den Vorsokratikern von Anaximander bis Demokrit vorrangig um die Begründung eines neuen, rationalen Weltverständnisses. Daneben entstanden aber auch Konzeptionen, die ausgiebig mythologische Metaphern oder Gleichnisse verwendeten. Dazu zählen die wunderlichen Kosmogonien des Pherekydes aus Syros und der Orphiker. Das Hauptverdienst der frühen griechischen Wissenschaft bestand in der Bekämpfung derartiger Kosmogonien im mythologischen Gewand. So sah dies auch Aristoteles, der eine scharfe Grenze zwischen den »Theologen« wie Pherekydes und den »Physiologen« oder »Physikern« wie Anaximander zog.

Diese rationale Sicht trifft man bei den Griechen nicht nur auf dem Gebiet der Kosmogonie an. Herodot in seinem Geschichtswerk und Hippokrates in der Schrift »Über Luft-, Wasser- und Ortsverhältnisse« hielten die Besonderheiten der Völker durch das Klima bedingt. Sehr aussagekräftig ist auch die Schrift »Von der heiligen Krankheit«, deren Verfasser die entschiedene Meinung vertrat, daß auch für die Geisteskrankheiten keine übernatürlichen Ursachen verantwortlich zu machen seien. In diesem Zusammenhang kann auch auf die Ethik des Sokrates verwiesen werden, die von der Erlernbarkeit des guten und gerechten Handelns ausging.

Es ist bezeichnend, daß der Niedergang der antiken Wissenschaft in der römischen Kaiserzeit mit deutlichen anti-rationalen Tendenzen verbunden war. In den philosophischen Lehren der Neupythagoreer und Neuplatoniker spielen wieder Zahlenmystik und Offenbarungsdenken eine größere Rolle. Vom Orient her kommen Astrologie, Alchimie und Magie. So verlor die Wissenschaft allmählich ihren rationalen Charakter, und insofern negierte sie sich selbst als Wissenschaft.

4. Ein weiteres Wesensmerkmal der Wissenschaft ist schließlich ihr systematischer Charakter. Isoliertes, zusammenhangloses Wissen, mag es auch auf ein bestimmtes Gebiet der Realität bezogen sein, ergibt bei weitem noch nicht Wissenschaft. Auch diesem Kriterium werden weder die babylonische Arithmetik noch die ägyptische Geometrie ge-

recht, die sich in der Sammlung heuristischer Verfahren oder Regeln zur Lösung einzelner Aufgaben erschöpften. Dabei fällt nicht ins Gewicht, daß einige Aufgaben hinreichend kompliziert waren (so zum Beispiel die Entwicklung von numerischen Methoden zur Lösung algebraischer Gleichungen zweiten und dritten Grades bei den Babyloniern) und in einer bestimmten Etappe alles überragten, was auf diesem Gebiet anderen Völkern, darunter auch den Griechen, bekannt war. In den Lehrbüchern zur Geschichte der Mathematik pflegt man die in den Keilschrifttexten gefundenen Aufgaben in moderner mathematischer Terminologie und Schreibweise wiederzugeben. Dadurch erscheinen sie in einer Form und einer inneren Geschlossenheit, die über das tatsächlich erreichte mathematische Niveau ein völlig falsches Bild vermitteln. Um der Spezifik der babylonischen Arithmetik auf den Grund zu kommen, empfiehlt es sich, eine ihrer Aufgaben in der Originalformulierung zu betrachten und sie mit denselben Mitteln zu lösen, die damals zur Verfügung standen.

Der griechischen Mathematik ging es dagegen um strenge Beweisführung und um das Formulieren allgemeingültiger Sätze. Bereits gegen Ende des 5. Jahrhunderts v. u. Z. schrieb der Mathematiker Hippokrates von Chios ein Buch, in dem grundlegende Sätze der Planimetrie deduktiv abgeleitet worden sind. Den Höhepunkt dieser Entwicklung erreichten Euklids »Elemente«, die auch in den folgenden zwei Jahrtausenden als das Ideal wissenschaftlicher Strenge galten. In diesem Werk erhielt das mathematische Wissen jener Zeit die Form eines logisch in sich geschlossenen Systems von Axiomen, Postulaten und Theoremen. Noch Newton nahm sich beim Verfassen seiner »Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie« Euklids »Elemente« zum Vorbild. Bis in die jüngste Zeit lehrte man die Geometrie in den Schulen nach Euklid, was zum Teil noch heute so gehalten wird.

Ähnlich verhält es sich mit der Astronomie. Die babylonischen Sterndeuter beobachteten die Bewegungen am Himmel, entdeckten ihre Periodizität und leiteten daraus Prognosen des Eintretens bestimmter astronomischer Erscheinungen ab. In gewissem Sinne entsprach die babylonische Astronomie modernen positivistischen Idealen. Aber obwohl gerade die Systeme das Vergängliche an der Wissenschaft sind, ist und bleibt doch die Suche nach immer neuen Sy-

stemen ein wesentlicher Charakterzug wissenschaftlichen Denkens. Und in dieser Hinsicht hat die griechische Astronomie die babylonische sehr schnell überboten.

Allein schon die Idee des Kosmos als eines in sich geschlossenen, harmonischen Ganzen war eine wichtige begriffliche Voraussetzung für die systematische Verarbeitung verschiedenartigster empirischer Daten. In der Anfangsperiode der griechischen Wissenschaft waren diese Erkenntnisse noch sehr mager und ungenau. Als die griechischen Astronomen die Bewegungen des Mondes, der Sonne und der fünf Planeten zu registrieren begannen, führte sie der Kosmosbegriff bis zu jenen rein geometrischen Modellen der Planetenbewegung, deren erster namhafter Schöpfer Eudoxos von Knidos gewesen ist. Durch diese Modelle wurden verschiedene astronomische Daten erst in einen sinnvollen Zusammenhang gebracht.

Das trifft besonders auch auf die Biologie zu, denn im Orient hatte das Studium der belebten Natur eine ausschließlich praktische Funktion und diente etwa dem Zweck des Wahrsagens oder der Zubereitung von Heilmitteln. Als Begründer der Biologie als Wissenschaft, insbesondere der Zoologie, gilt mit Recht Aristoteles, und nicht nur, weil in seinen biologischen Schriften wie der »Tiergeschichte« ein umfangreiches Material über Hunderte von Tierarten zusammengetragen ist, sondern weil Aristoteles durch seine Klassifizierungsprinzipien und die Annahme der »Stufenfolge« Pflanze, Tier, Mensch dieses Material in ein wissenschaftliches System gebracht hatte.

Hieraus ergibt sich, daß die griechische Wissenschaft, und nur sie, alle genannten Wesensmerkmale der Wissenschaftlichkeit aufwies. Wenn es sich eingebürgert hat, von ägyptischer oder babylonischer Wissenschaft zu sprechen, ist dies nach unserem Wissenschaftsbegriff ungerechtfertigt. Wir sind freilich noch nicht auf die geistig-kulturellen Fortschritte der östlichen Länder Indien und China eingegangen, jedoch kann uns der Leser aufs Wort glauben, daß von einer indischen oder chinesischen Wissenschaft zu Recht nicht die Rede sein kann, jedenfalls nicht für die Zeit der Entstehung und Entwicklung der Wissenschaft in Griechenland.

Das oben Gesagte bedeutet bei weitem keine Abwertung oder Unterschätzung der Völker des Nahen und Fernen Ostens, deren Errungenschaften unbestritten bleiben. Die

Geschichte der Weltwissenschaft kann ohne ihre Berücksichtigung keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Es geht nur darum zu erkennen, daß die griechische Wissenschaft — zumindest in ihren Spitzenleistungen —, gemessen an denen der alten Ägypter, Babylonier, Inder und Chinesen, eine neue Qualität darstellte, die erstmalig »Wissenschaft« in dem Sinne genannt werden darf, in dem dieser Terminus auch heute verstanden wird.

Wenden wir uns jetzt der Frage zu, ob und welche wesentlichen Unterschiede zwischen der antiken und der modernen Wissenschaft bestehen. Darauf gibt es keine einfache Antwort, da sich die antike Wissenschaft während ihrer tausendjährigen Geschichte selbst sehr gewandelt hat. Entstanden war sie als allgemeine Naturlehre, als rein spekulative Kosmologie, die sich mit dem Ursprung und der Beschaffenheit der Welt in ihrer Einheit und Ganzheit befaßte. Ganz anders als die moderne Naturwissenschaft, war sie zunächst ungegliedert und bis zum Ende des 5. Jahrhunderts v. u. Z. überhaupt nicht von der Philosophie zu trennen, weshalb man auch von Naturphilosophie spricht, was aber unseres Erachtens kein prägnanter Ausdruck für die griechische Wissenschaft in ihrer Entstehungsphase ist. Sehr treffend charakterisiert sie Friedrich Engels: »Bei den Griechen — eben weil sie noch nicht zur Zergliederung, zur Analyse der Natur fortgeschritten waren — wird die Natur noch als Ganzes, im ganzen und großen angeschaut. Der Gesamtzusammenhang der Naturerscheinungen wird nicht im einzelnen nachgewiesen, er ist den Griechen Resultat der unmittelbaren Anschauung.« \*

Ihre höchste Entwicklungsstufe erfuhr die Naturlehre im Sinne einer ganzheitlichen Naturbetrachtung bei Aristoteles. In dieser Zeit begann bereits ihre Differenzierung in Einzeldisziplinen mit eigenen Gegenständen und Forschungsmethoden. Im 5. Jahrhundert v. u. Z. scheint sich schon mit der Entwicklung der deduktiven Methode die Mathematik, die bei den älteren Pythagoreern noch untrennbarer Bestandteil der allgemeinen Lehre über die Welt gewesen war, verselbständigt zu haben. Durch Eudoxos, der um 408 bis um 355 v. u. Z. lebte, erhielt die Astronomie die entscheidende Starthilfe. Und bei Aristoteles und seinen Schülern

---

\* Karl Marx, Friedrich Engels, Werke, Band 20, Dietz Verlag Berlin 1973

nehmen bereits die Logik, die Zoologie, Embryologie, Psychologie, Botanik, Mineralogie, Geographie Gestalt an, abgesehen von den auf Mensch und Gesellschaft bezogenen Disziplinen wie Ethik, Poetik u. a., die nie Bestandteil der Naturlehre gewesen waren.

Dieser Differenzierungsprozeß verstärkte sich im hellenistischen Zeitalter, in dem etwa neben der Geometrie die geometrische Optik, darunter die Katoptrik, das ist die Lehre von den Spiegeln, und die mathematisch und technisch orientierte Mechanik mit der Statik und Hydrostatik zu selbständiger Geltung gelangten. In dieser Zeit bedeutete Wissenschaftsdifferenzierung vor allem Loslösung und Distanzierung der Fachgebiete von der Philosophie, mithin auch das Ende der philosophisch-spekulativen Gesamtschau der Natur. Die Blütezeit der hellenistischen Kultur wurde durch schöpferische Leistungen solcher großer Gelehrter wie Euklid, Archimedes, Eratosthenes, Apollonios von Perge, Hipparch gekrönt. Gerade in der Periode vom 3. bis 2. Jahrhundert v. u. Z. kam die antike Wissenschaft dem Geist und Anliegen der modernen Wissenschaft am nächsten. Danach setzt ein allmählicher Verfall ein. Und obwohl noch die Spätantike auf große Namen wie Ptolemaios, Diophant oder Galen verweisen kann, verstärkte sich in den ersten Jahrhunderten unserer Zeitrechnung die Tendenz allgemeinen wissenschaftlichen Verfalls. Diese Tendenzen hängen mit dem Wachstum des Irrationalismus, mit dem Aufkommen okkultur Disziplinen, mit der Renaissance von Versuchen einer synkretischen Vereinigung der Wissenschaft und der Philosophie zusammen. Auf dies alles werden wir in weiteren Kapiteln unseres Buches eingehen.

Aber selbst wenn wir die antike Wissenschaft in ihrer entwickeltsten Form betrachten, können wir in ihr einen Wesenszug finden, der sie von der modernen Wissenschaft prinzipiell unterscheidet. Trotz der glänzenden Erfolge Euklids und Archimedes' fehlte ihr eine wichtige Komponente, ohne die Physik, Chemie und andere Naturwissenschaften heute undenkbar wären; nämlich die experimentelle Methode, und zwar in der von Galilei, Boyle, Newton und Huygens geschaffenen Form. Die antiken Denker wußten sehr wohl um die Bedeutung der Empirie, davon zeugen Aristoteles und vor ihm Demokrit, sie verstanden sich auf die Naturbeobachtung und entwickelten auch diffizile Meßmethoden. Man denke an die Ermittlung des Erdumfangs

durch Eratosthenes, die Messung des Winkels, unter dem die Sonnenscheibe erscheint (Archimedes), oder an die Bestimmung des Abstands Mond — Erde durch Hipparch. Aber ein Experiment, das Naturerscheinungen unter künstlich geschaffenen Bedingungen und unter Ausschluß unwesentlicher Nebeneffekte untersucht, um eine Hypothese bestätigen oder widerlegen zu können, hat die Antike noch nicht gekannt. Aber eben ein solches Experiment liegt der Physik und der Chemie zugrunde — jenen Wissenschaften, die in der Naturforschung der Neuzeit die führende Rolle erlangten. Daraus erklärt sich, warum das umfangreiche Gebiet der physikalisch-chemischen Erscheinungen in der Antike den rein qualitativen Spekulationen vorbehalten blieb und das Aufkommen einer adäquaten wissenschaftlichen Methode nicht mehr erlebt hat.

Doch warum ist dies passiert? Warum hat es die antike Wissenschaft nicht bis zur Entdeckung der experimentellen Methode im obengenannten Sinne gebracht? Diesen Umstand wird man schwerlich erklären können, ohne jene sozialen Verhältnisse in Betracht zu ziehen, unter denen die antike Wissenschaft entstand und sich entwickelte.

Oben wurde als eines der Wesensmerkmale der Wissenschaft ihre Eigenwertigkeit, ihr Streben nach Wissen um der Wahrheit willen genannt. Das schließt jedoch keinesfalls ihre praktische Nutzbarkeit aus. Die große wissenschaftliche Revolution im 16. bis 17. Jahrhundert legte das theoretische Fundament für die Herausbildung einer neuartigen industriellen Produktion, die ihrerseits den wissenschaftlich-technischen Fortschritt in einem bisher unbekanntem Maße förderte. Das Zusammenwirken von Wissenschaft und industrieller Praxis wurde im Laufe der Zeit immer enger und wirksamer, und heute erscheint Wissenschaft bereits als unverzichtbare Produktivkraft der Gesellschaft.

In der Antike kam es zu keinem solchen Zusammenwirken. Die Produktion beruhte im wesentlichen auf Sklavenarbeit, so daß die antike Wissenschaft als höchster Ausdruck der Tätigkeit freier Menschen keinen Zugang zur Produktionspraxis hatte. Die Ingenieur Tätigkeit des Archimedes zählt zu den Ausnahmen. Umgekehrt hatten auch die Fortschritte auf den Gebieten der Architektur, des Schiffbaus oder der Kriegstechnik nichts mit der Entwicklung der Wissenschaft zu tun. Das Fehlen eines solchen

Zusammenwirkens war letztlich auch der Entwicklung der antiken Wissenschaft abträglich.

Auf diese allgemeinen Bemerkungen über die Besonderheiten der antiken Wissenschaft wollen wir uns vorerst beschränken. In den weiteren Darlegungen sind diese Fragen anhand des historischen Materials noch im Detail zu betrachten.

## DIE QUELLEN DER FRÜHGRIECHISCHEN WISSENSCHAFT

Die frühgriechische Naturlehre sah also ihr Hauptproblem in der Erklärung des Ursprungs und der Beschaffenheit der Welt, die als ein einheitliches Ganzes aufgefaßt wurde. Die verschiedenen Lösungsvorschläge waren damals zwangsläufig auf rein spekulative Weise gewonnen worden, und zwar in Auseinandersetzung mit der Mythologie, vor allem den Weltentstehungsmythen, die alle Völker einer bestimmten kulturellen Entwicklungsstufe hervorzubringen pflegen. Die ersten griechischen Gelehrten bauten ihre spekulativen Gebilde sowohl auf ihren unmittelbaren Beobachtungen als auch auf den Erfahrungen jahrhundertealter menschlicher Lebenspraxis auf. Zur Verarbeitung dieser Informationen griffen sie zu einem methodologischen Instrumentarium, dem aus heutiger Sicht das Attribut »wissenschaftlich« noch nicht beigegeben werden kann. Zum einen ordnet man das traditionelle und empirische Material mit Hilfe solcher Gegensätze wie oben — unten, links — rechts, warm — kalt und vielen anderen, die im menschlichen Bewußtsein bereits seit frühester Urzeit verwurzelt sind. Zum anderen verwendet man als ordnende Methode die Analogie, die in diesem frühen Entwicklungsstadium der Wissenschaft das wichtigste Mittel des Schließens war.

Sowohl die Literaturdenkmäler uralter Völker als auch die Erkenntnis der modernen Ethnographie liefern reiches Material über die mythenschöpferische Tätigkeit vieler Völker der Welt. Dabei lassen sich die Weltentstehungsmythen in mehrere Gruppen untergliedern, die den verschiedenen Entwicklungsetappen der menschlichen Gesellschaft entsprechen. Bei den rückständigsten Völkerschaften (beispielsweise bei den australischen Ureinwohnern) trifft man lediglich auf Ansätze kosmogonischen Denkens, die sich in den mythischen Gestalten sogenannter Kulturheroen manifestieren, die die Welt zwar nicht erschaffen, diese aber ein-

richten, indem sie Sitten und Bräuche festlegen, die Menschen unterweisen usw. In den Sagen relativ entwickelter Völker Asiens, Afrikas und Lateinamerikas verwandeln sich diese »Kulturheroen« in Schöpfer des Universums, die im primitiven Bewußtsein tatsächlich »leben«. Neben einstmals existierenden Helden oder legendären Zwillingbrüdern wurden mitunter auch Tiere zu Schöpfern der Welt erklärt, wie dies bei den nordamerikanischen Indianern sehr verbreitet ist. Die Griechen sprachen vom Demiurgen (Handwerker) zur Bezeichnung des Weltbaumeisters. Solche Mythen werden in der Fachliteratur als »kreative Mythen« bezeichnet.

In der griechischen Mythologie blieben die Eigenschaften des archaischen »Kulturheros« in Gestalt des Prometheus erhalten, der allerdings um das Motiv des Ringens mit den Göttern bereichert wurde.

Der Zerfall des uralten Gentilwesens und die Entstehung der Klassen und gesellschaftlichen Klassenbeziehungen wurden vom Übergang des primitiven religiösen Glaubens zu entwickelten Formen des Polytheismus begleitet. Das Studium dieser Formen führt uns zu den schriftlichen Denkmälern des Alten Orients und der Antike, die klassische Beispiele für die neue Entwicklungsetappe des mythen-schöpferischen Bewußtseins bieten. Die Götter der Ägypter, Babylonier und Griechen waren ursprünglich nur Stammesgötter und auf keine Weise miteinander verbunden, doch führte die Vereinigung der lokalen Kulte zur Schaffung eines Götterkönigs (Ammon Re, Marduk, Zeus), unter oder neben dem eine Vielfalt anderer Götter agierte, die in bestimmte verwandtschaftliche Beziehung gesetzt wurden. Die Mythen, die vom Ursprung der Götter, von ihrem Kampf untereinander und vom Wechsel verschiedener Göttergenerationen berichten, widerspiegeln die Vorstellung der Menschen vom Ursprung und von der Evolution des Universums. In der Epoche der Entwicklung der polytheistischen Religionen trat die Kosmogonie in der Regel als Theogonie hervor. Hesiods »Theogonia« ist ein bekanntes Beispiel einer solchen Götterabstammungslehre.

Unter ihrem Einfluß entstanden im 6. bis 5. Jahrhundert v. u. Z. weitere derartige Lehren, die bereits Produkt des individuellen Mythenschöpfertums waren, wie zum Beispiel die Theogonien der Orphiker Pherekydes aus Syros, Epimenides aus Kreta und Akusilaos von Argos. Alle diese

Autoren entnahmen ihre Stoffe vielfach der religiös-mythologischen Vorstellungswelt der Völker des Nahen Ostens. Aristoteles bezeichnete sie als »Theologen« im Gegensatz zu den »Physikern«, den Schöpfern der frühgriechischen Naturlehre. Der Beitrag der »Theologen« zur Herausbildung der Wissenschaft war zu gering, um weiter auf sie eingehen zu müssen.

Die »Physiker« waren ebenfalls mit den griechischen und orientalischen Mythen von der Entstehung der Welt vertraut, jedoch war für sie deren entschiedene Ablehnung charakteristisch. Trotzdem tauchen Motive dieser Mythen auch bei den ersten griechischen Gelehrten auf, den sogenannten Vorsokratikern von Thales bis hin zu Demokrit.

Wir wollen diese Motive kurz aufzählen, da ohne ihre Berücksichtigung der Ursprung vieler für die frühe griechische Wissenschaft charakteristischer Ideen nicht nachvollziehbar wäre.

1. Fast alle Mythen zur Weltentstehung enthalten die Vorstellung eines formlosen Urzustandes des Universums, oft beschrieben als ein gewaltiges Gewässer. Die Idee eines unbegrenzten Gewässers findet man in den sumerisch-babylonischen, den ägyptischen und indischen Mythen sowie in der biblischen Schöpfungsgeschichte. Für die Griechen war diese Idee weniger typisch, wenn man auch an einer Stelle der »Ilias« eine klare Andeutung auf die »Wasser«-Idee findet, ebenso in der Lehre des Thales von Milet, auf die später noch einzugehen sein wird. Allgemeinere Vorstellungen von der ursprünglichen Formlosigkeit und Ungeordnetheit der Welt trifft man etwa bei Anaximander, Anaxagoras, den Atomisten oder bei Platon (im »Timaios«) an.

2. Eine große Rolle spielt in vielen Schöpfungsgeschichten die Scheidung von Himmel und Erde, die männliches und weibliches Prinzip verkörpern. Dieses Motiv ist in dem polynesischen Mythos über Rangu und Papa, im Dualismus von den zwei Grundanfängen — Yin und Yang — bei den Chinesen, im ägyptischen Mythos über Su und Tefnut und bei den Griechen im Mythos über Gaia und Uranos anzutreffen. In rationalistischer Form erscheint das Motiv der Trennung von Himmel und Erde in den Lehren des Anaximanders, Anaxagoras, Empedokles und der Atomisten.

3. Fast alle Weltentstehungsmythen gehen davon aus, daß eine Evolution zu größerer Ordnung und besserer Einrichtung der Welt stattgefunden habe. Diese Idee realisiert

sich in der Regel in Form des Kampfes von aufeinanderfolgenden Göttergenerationen, der in der Krönung eines lichten, vernünftigen und gerechten Gottes seine Vollendung findet. In der indoeuropäischen Mythologie sind das gewöhnlich der Wind-, Sturm- und Donnergott wie Indra, Perun, Wodan, Zeus. Dieses Motiv, mit dem vorangegangenen aufs engste verknüpft, ist in den Kosmogonien der Vorsokratiker vorhanden, die im Chaos einen präkosmischen Zustand sahen.

4. Bei einigen Völkern kommt das Motiv periodischen Entstehens und Vergehens der Welt hinzu; der Mythos vom »Untergang der Götter« in den germanisch-skandinavischen Sagen, die Idee des »großen Jahres« in altpersischen religiösen Texten. In der griechischen Mythologie ist dieses Motiv nur unterschwellig in den Anspielungen auf die Unhaltbarkeit des Reiches des Zeus und die Möglichkeit seines Sturzes durch einen neuen Weltherrscher vorhanden. Zu diesem Motiv griffen Vorsokratiker wie Anaximander, Heraklit und besonders deutlich Empedokles.

Hieraus ist zu ersehen, inwiefern die Weltentstehungslehren der Vorsokratiker von den alten griechischen und orientalischen Mythen abhängig waren. Die frühen Denker schöpften vor allem aus der »Theogonie« Hesiods, aber auch aus orientalischen Quellen, sowohl direkt, wie möglicherweise Thales, als auch indirekt, da die griechische Mythologie selbst Motive orientalischer Herkunft enthielt. Das trifft zum Beispiel auf den Mythos über Kronos zu, der seinen Vater Uranos entmannte. Unter den vor nicht allzu langer Zeit gemachten archäologischen Funden befindet sich eine Keilschrift, die eine wesentlich ältere hethitisch-churritische Version dieses Mythos festhält, in der der Gott Kumbari als das genaue Gegenstück des Kronos agiert. Die Verpflanzung dieser Sage nach Griechenland scheint lange vor Hesiod, vielleicht schon in der kretisch-mykenischen Epoche stattgefunden zu haben.

Die »Theogonie« war ein Werk der epischen Dichtung. Das griechische Epos scheint überhaupt für die Herausbildung eines rationalen Weltverständnisses wichtig gewesen zu sein, insofern nämlich die Werke Homers und Hesiods die Zerstörung des religiös-mythologischen Weltempfindens förderten, indem sie die traditionellen Mythen versachlichten und ästhetisierten. Mithin schwand in ihnen das unmittelbare Verhältnis zum Mythos als lebendiger Realität.

Dieses Moment wird besonders bei Hesiod deutlich. Be-

reits das Bild des Chaos als »grenzenlosen« Abgrunds reduziert das religiös-mythologische Element auf ein Mindestmaß; es trägt keine Spur irgendeiner Personifizierung. Nach dem Chaos, doch nicht aus ihm heraus, entstehen als weibliche und männliche Urmächte bzw. Gottheiten »die breitbrüstige Gaia«, die Erde mit dem Tartaros im Innern, und der Eros, der Gott der Schöpferkraft. Den gestirnten Himmel (Uranos), den Gegenpol zum tristen Tartaros, bringt Gaia auf ungeschlechtlichem Wege ebenso hervor wie auch die Berge und den Pontos, das Meer. Die Entwicklung des Kosmos wird nur geringfügig personifiziert. In diesem Teil der Dichtung gibt Hesiod nicht einfach traditionelle Mythen wieder, sondern entwickelt hier Gedanken, die ihn als Vorläufer der frühgriechischen »Physiker« erscheinen lassen.

In dem später verfaßten Lehrgedicht »Werke und Tage« wird mythologisches Material zum moralisch-didaktischen Gleichnis. Aus der griechischen Mythologie ist Eris, die Göttin der Zwietracht, bekannt, die ungeladen auf einem Göttergelage erschien und mit ihrem goldenen Apfel einen Streit auslöste, der letztlich zum Trojanischen Krieg führte. Hesiod spricht moralisierend von einer guten und einer bösen Eris. Im weiteren werden zwei Mythen erzählt, die deutliche Merkmale einer Moralpredigt aufweisen: der Mythos von Prometheus, Epimetheus und Pandora sowie der Mythos über die fünf Zeitalter, der auch im Orient bekannt war. Daran schließt sich die erste Fabel der Antike vom Habicht und der Nachtigall an.

Ein anderes Bild zeigt sich bei Homer, der als großer Künstler im Unterschied zu Hesiod dem mythologischen Material eine solche künstlerische Form verlieh, durch die seine Epen noch heute manchem als unerreichbare Muster gelten. Die Götter schildert Homer ebenso lebendig und individuell wie die sterblichen Helden. Die Götter sind freilich mächtig, prächtig, unsterblich und fähig, unsichtbar zu werden oder auf Wunsch ein beliebiges Äußeres anzunehmen, weisen aber ansonsten ganz menschliche Züge und Eigenschaften auf. Ihnen sind Gefühle der Freude, der Wut, des Neides und der Fleischeslust eigen, sie können ausgelassen feiern, aber auch körperlich leiden. Der Dichter selbst nähert sich den Göttern mit einem beträchtlichen Maß an Ironie. Kein Wunder, daß ihn die späteren Homerkritiker — von Xenophanes bis Platon — der Verletzung religiöser Gefühle bezichtigten. Während in den »Werken und Tagen«

der Mythos zur lehrreichen Parabel wird, gestaltete er sich bei Homer zu einem spannenden literarischen Gegenstand.

Darüber hinaus bot das griechische Epos ein Weltbild, das zu den späteren Modellen des Kosmos hinzuführen scheint. Es läßt sich wie folgt skizzieren:

Die Erdoberfläche ähnelt einer platten Scheibe, die von einem riesigen Strom, dem Okeanos, umspült wird. Darüber wölbt sich als feste Halbkugel der Himmel, dessen oberer Teil, Wohnsitz der Götter, vom leuchtenden Äther erfüllt ist, während in der darunterliegenden Luftschicht (aer) Wolken, Winde und andere atmosphärische Erscheinungen entstehen; »aer« bezeichnet hier noch nicht die atmosphärische Luft, sondern eben nur den unteren Dunstkreis im Gegensatz zum aither, der reinen, oberen Luft. Die Unterwelt enthält ebenfalls zwei Etagen. Der Hades, das Totenreich, liegt unmittelbar unter der Erdoberfläche, während sich der Tartaros ebensoweit nach unten erstreckt wie der Himmel nach oben. Hesiod beschreibt den Tartaros als abgründige Finsternis, in der Wirbelstürme toben; der Eingang dorthin gleicht einem engen Kehlchen (»Hals«), über dem sich die »Wurzeln« oder »Anfänge« der Erde, des Himmels und des Meeres verzweigen. Eine derartige »Vertikal«-Struktur des Universums ist für die mythologischen Vorstellungen aller Völker charakteristische und mit dem verbreiteten Bild vom »Baum der Welt« unmittelbar verbunden.

Der Grieche aus der Epoche von Homer und Hesiod (grob gerechnet ist das die Zeit zwischen dem 9. und 8. Jahrhundert v. u. Z.) verfügte über einen bestimmten Fundus an astronomischen und meteorologischen Kenntnissen. Diese Kenntnisse waren nicht das Ergebnis gezielter wissenschaftlicher Forschungen, sondern entstammten dem Schatz jahrhundertealter Lebenserfahrungen des Volkes.

So existierten vermutlich bereits damals die Bezeichnungen für eine ganze Reihe von Sternbildern sowie für die hellsten Sterne. Von Homer und Hesiod werden die Große Bärin, Orion, Bootes, Sirius und einige andere erwähnt. Nach dem Erscheinen und Verschwinden der Plejaden — des Sternhaufens am Rücken des Stiers — bestimmten die Griechen wie auch andere Völker die Zeiten für ihre landwirtschaftlichen Arbeiten. Bei den Planeten unterschied man nur den Morgenstern oder »Lichtbringer« (Eosphoros) und den Abendstern (Hesperos), deren Identi-

tät damals noch nicht bekannt war. Laut Homer »baden« alle Himmelskörper mit Ausnahme des Großen Himmelswagens im Ozean, d. h., sie tauchen hinter dem Horizont unter; wahrscheinlich sind damit nur die Gestirne gemeint, die einen Namen haben. Auf welche Weise sie bei Aufgang auf die andere Seite der Erdscheibe gelangen, bleibt unklar. Daß sie unter der Erde hindurchgehen, wurde damals für unmöglich gehalten; denn unter der Erde herrscht ewiges Dunkel, wo keinerlei Gestirne erscheinen können.

Die östliche und die westliche Himmelsrichtung werden in der »Odyssee« nach dem Auf- und Untergang der Sonne bestimmt, aber es gibt keinen Hinweis darauf, auf welche Weise (und ob überhaupt) Nord und Süd festgelegt wurden. Allerdings werden hier vier Winde erwähnt — Euros, Notos, Zephyros und Boreas —, welche die Himmelsrichtungen zu repräsentieren scheinen.

Die durch die »Ilias« vermittelten geographischen Angaben beschränken sich auf die Balkanhalbinsel, das Ägäische Meer (einschließlich der Küste Kleinasiens) und die Insel Kreta. Die »Odyssee« erwähnt Ägypten, das an einigen Stellen des Poems mit dem Nil gleichgesetzt wird. Bei den meisten von Odysseus auf seinen Irrfahrten aufgesuchten Orten bereitet es erhebliche Schwierigkeiten, sie zu identifizieren. Die geographischen Kenntnisse von Hesiod scheinen umfassender gewesen zu sein. So ist ihm der Ätna bekannt sowie eine Reihe von Strömen und Flüssen, die bei Homer nicht vorkommen (Eridanos, Phasis).

So also sah die Welt in den Vorstellungen eines einfachen Griechen der vorwissenschaftlichen Epoche aus. Zwar dürften die Vertreter einiger Schichten oder Gewerbe (Seeleute, Kaufleute) über umfassendere und genauere Kenntnisse des damaligen Mittelmeerraumes verfügt haben, jedoch liegen uns keinerlei Schriftdenkmäler darüber vor.

Kompliziert und umstritten ist die Frage nach den orientalischen Einflüssen auf die frühe griechische Wissenschaft (und nicht nur auf die kosmogonischen Ideen der vorsokratischen Philosophen). Die ersten unsicheren Schritte ging diese Wissenschaft, wie wir wissen, erst im 6. Jahrhundert v. u. Z. Es wäre höchst verwunderlich, wenn dies ohne Einfluß der Ägypter, Babylonier, Perser und anderer Völker, die Kleinasien und den östlichen Mittelmeerraum bevölkerten, geschehen wäre. Gerade in dieser Zeit, im 7. bis 6. Jahrhundert v. u. Z., wurden die Handelsbeziehungen zwi-

schen den griechischen Städten und den Ländern des Nahen Ostens besonders rege. An der syrischen und ägyptischen Küste wurden griechische Siedlungen gebaut, die als Bindeglied zwischen der griechischen Welt und den uralten orientalischen Zivilisationen fungierten. Die Rolle eines solchen Bindegliedes spielten in Kleinasien die nichtgriechischen Staaten Lydien, Kilikien, Phrygien u.a., die aus den Ruinen des uralten Hatti-Reiches hervorgegangen sind. Viele junge Griechen verdingten sich als Krieger bei den Medern, dienten im persischen und sogar babylonischen Heer; damals galt dies weder als schimpflich noch als unpatriotisch. Die Kontakte führten unvermeidlich dazu, daß die Griechen bestimmte Elemente der Kultur der Länder übernahmen, in denen sie sich aufhielten. Doch wie und in welchem Umfang erfolgten diese Entlehnungen?

In erster Linie waren es kulturelle Entlehnungen, die mit der Wissenschaft in keiner Beziehung standen, ihre Entwicklung in Griechenland jedoch indirekt beeinflussten. Eine enorme Bedeutung für die Geschicke der griechischen Kultur hatte beispielsweise die alphabetische Schrift, die sich ursprünglich in Syrien herausgebildet hat und von den Griechen in etwas veränderter Form wahrscheinlich bei den Phöniziern entlehnt wurde. Diese Entlehnung dürfte auf das 10. bis 9. Jahrhundert v. u. Z. zurückgehen, weil die frühesten archäologischen Funde mit griechischen Schriftmustern aus der Zeit vom Anfang des 8. Jahrhunderts v. u. Z. stammen. Bei den Hethitern oder anderen an das Hatti-Reich grenzenden Völkern Kleinasiens lernten die Griechen die Herstellung von Eisen, das bereits in Homers »Ilias« erwähnt wird. Ursprünglich galt Eisen als rares und wertvolles Metall, das aber nach und nach seinen Platz im Alltag behauptete und zu einem Werkstoff für Waffen und Werkzeuge der Handwerker, wie Scheren, Sägen, Zangen, Hämmer usw., wurde.

Von den Ägyptern konnten die Griechen einige praktische mathematische Kenntnisse übernehmen; mit ihrer Hilfe wurden näherungsweise Flächen, Rauminhalte und Entfernungen berechnet. Dabei bezeichneten die Griechen alles, was mit der Rechenkunst zu tun hatte, als Logistik; diese wurde als Angelegenheit der Kaufleute, Steuereinnehmer, Wechsler usw. ohne Beziehung zur Mathematik als Theorie angesehen, welche sich unabhängig von praktischen Bedürfnissen entwickelte. Tatsächlich fehlt jedoch über die

Methoden der griechischen Logistik jede Information, da wir über keine den ägyptischen Papyri oder Keilschrifttafeln vergleichbaren Textmuster verfügen, die solche Methoden belegen könnten. Und doch ist es höchst wahrscheinlich, daß die Griechen mit den ägyptischen Rechenmethoden gut vertraut waren.

Die Griechen der klassischen Epoche hatten generell große Achtung vor der ägyptischen Kultur. Sie pflegten die uralte Weisheit der ägyptischen Priester hervorzuheben, gegen die sich die Versuche der Griechen wie erste Schritte von Anfängern ausgenommen hätten; solche Äußerungen findet man etwa in den Dialogen Platons. Die angebliche »Weisheit« der ägyptischen Priester läßt sich jedoch nicht bestätigen, zumindest nicht im Hinblick auf wissenschaftliche Erkenntnisse. Es ist nicht ausgeschlossen, daß die Gerüchte einer insgeheim betriebenen Wissenschaft von den Ägyptern selbst in Umlauf gesetzt worden waren. Aufgrund der Sprachbarriere und der Schwierigkeiten der Aneignung der Hieroglyphen ohne Möglichkeit, diesen Gerüchten kritisch nachzugehen, glaubten ihnen die Griechen gern, und dieser Glaube blieb über Jahrhunderte lebendig. So behauptete der Historiker Diodoros im 1. Jahrhundert v. u. Z., daß sowohl die Dichter und Politiker des Altertums wie Orpheus, Musaios, Homer, Lykurgos, Solon — als auch die Gelehrten wie Platon, Pythagoras, Eudoxos von Knidos, Demokrit, Oinopides von Chios — Ägypten besucht und mit den dortigen Priestern Gespräche geführt hätten. Gerade von den Ägyptern hätten sie Anregungen für wissenschaftliche Lehren, staatliche Gesetzgebungen und Institutionen sowie für die Künste empfangen, um diese dann in Griechenland zu verwirklichen. Das betreffe insbesondere die Geometrie, die pythagoreische Zahlen- und Seelenwanderungslehre, das astronomische Wissen Demokrits, die den idealen Staat betreffenden Entwürfe Platons. Derartige Behauptungen gehören in den Bereich der Legende mit sehr geringer Beziehung zur Wirklichkeit.

Wir wollen nun zu den griechisch-babylonischen Beziehungen übergehen. Gerade von den Babyloniern hätten die griechischen Gelehrten viel lernen können. Die engsten Kontakte zwischen Griechen und Babyloniern bestanden zur Zeit der neubabylonischen Dynastie (626 bis 539 v. u. Z.). In diese Periode fällt die Geburt der griechischen Wissenschaft. Unter Führung babylonischer Könige kämpften da-

nals auch viele Griechen, unter denen sich zum Beispiel der Bruder des berühmten Dichters Alkaios befand; gleichzeitig entwickelte sich zwischen den ionischen Städten und Babylon ein reger Handel. Bezeichnend ist jedoch, daß bis in die Epoche des Hellenismus hinein, deren Anfang die Feldzüge Alexanders des Großen markieren, die größten Leistungen der Babylonier auf dem Gebiet der Algebra und der beobachtenden Astronomie den Griechen unbekannt blieben. Es scheint, daß jene Griechen, die in der Periode vom 7. bis 6. Jahrhundert v. u. Z. Handel mit den Babyloniern trieben bzw. bei ihnen Wehrdienst leisteten, keine Kontakte zu den babylonischen Mathematikern und Astrologen hatten, die über entsprechende Informationen verfügten. Tatsächlich übernahmen sie manches praktisch Wertvolle von den Babyloniern. Dazu zählt Herodot die Sonnenuhren, Gnomon und Polos, sowie die Teilung des Tages in zwölf Stunden. Letzteres hing offenbar mit der Zahl der Sternbilder im Tierkreis zusammen, deren Namen ebenfalls aus Babylon stammten und in Griechenland gegen Mitte des 6. Jahrhunderts v. u. Z. bekannt wurden.

Die ersten Landkarten wurden auch bei den Babyloniern gefunden; später fertigten griechische Gelehrte ebenfalls ähnliche Landkarten an.

Das dritte große Reich, zu dem die Griechen in der von uns betrachteten Epoche unmittelbare Kontakte unterhielten, war Persien. Im Unterschied zu den babylonischen Priestern, den »Chaldäern«, interessierten sich die persischen »Magier« anscheinend nicht für Mathematik und Astronomie. Dafür existierte bei ihnen eine interessante religiös-philosophische Tradition, deren ältestes Denkmal das Awesta ist — die Sammlung heiliger Schriften der Perser. Dank dem Wirken Zoroasters (Zarathustra) als Reformator und Verkünder wurde die iranische Religion (Mazdaismus) von archaischen Elementen befreit und nahm einen für jene Zeit ungewöhnlich abstrakten und erhabenen Charakter an. Die oberste Gottheit in dieser Religion war der Gott des Guten und des Lichtes, Ahura Mazda (Ohrmazd), dem der Geist des Bösen, Ahra Mainyu (Ahriman), gegenüberstand. Der Kampf zwischen dem Guten und dem Bösen bildete nach Auffassung der Mazdaisten das Wesen des Weltprozesses. Das Fehlen eines offenen Anthropomorphismus oder Zoomorphismus in dieser Religion stand im krassen Gegensatz zu den religiösen Vorstellungen der meisten anderen

Völker jener Zeit, so daß die Griechen darauf aufmerksam werden mußten. Herodot zum Beispiel schreibt in diesem Zusammenhang folgendes: »Götterbilder, Tempel und Altäre zu errichten halten sie nicht für recht, sondern sie werfen sogar denjenigen, die dies tun, Torheiten vor, (und zwar) wie mir scheint, weil sie nicht wie die Griechen glaubten, daß die Götter menschenähnlich wären. Sie pflegen aber dem Zeus, nachdem sie die höchsten Spitzen der Berge erstiegen hatten, Opfer darzubringen, indem sie den gesamten Umfang des Himmelsgewölbes Zeus nennen. Sie opfern ferner dem Sonnengott, der Mondgöttin, der Erde, dem Feuer, dem Wasser und den Winden.« \*

Nach seiner Art bezeichnet Herodot Ahura Mazda mit einem griechischen Namen. Dabei ist interessant, daß er in dieser Gegenüberstellung des persischen und griechischen Glaubens deutlich mit dem ersteren sympathisiert. Der Anthropomorphismus der traditionellen griechischen Religion konnte die denkenden Griechen jener Zeit nicht mehr befriedigen. Bereits lange vor Herodot wurden viele Elemente der iranischen religiösen (und kosmologischen) Vorstellungen in Griechenland übernommen von den Orphikern, von Pherekydes von Syros und von solchen Denkern des 6. Jahrhunderts v. u. Z., wie Anaximander, Heraklit und möglicherweise Xenophanes.

Abschließend sei noch auf einen Faktor verwiesen, der indirekt Einfluß auf die Ausprägung des griechischen wissenschaftlichen Denkens hatte.

Es wurde bereits erwähnt, daß zwischen der materiellen Produktion und der antiken Wissenschaft keine derartige Wechselwirkung bestand, wie wir sie heute beobachten und die zu einem Wesensmerkmal des wissenschaftlich-technischen Fortschritts der letzten Jahrhunderte wurde. Und dennoch hätte die griechische Wissenschaft kaum entstehen können, wenn die handwerkliche Produktion und die Ingenieurlässigkeit der Griechen nicht jenes Niveau vom Anfang des 6. Jahrhunderts v. u. Z. erreicht hätten.

Im 4. und 3. Jahrtausend v. u. Z. haben sich in einigen Regionen der Erde — vor allem in den Tälern des Nil und Indus, im Zweistromland, in Kleinasien und China — Veränderungen in der Sphäre der materiellen Produktion vollzogen, die in ihrer Gesamtheit mit Recht als erste techni-

---

\* Kleine Bibliothek, Herodot, Buch 1, Leipzig

sche Revolution in der Geschichte der Menschheit bezeichnet werden können. Diese Veränderungen erfolgten, nachdem die Stämme, die diese Regionen bevölkerten, von der nomadischen zur sesshaften Lebensweise übergegangen waren; damit war die Durchsetzung des Ackerbaus als Hauptform der Produktionstätigkeit verbunden. Der Ackerbau wurde von der Entwicklung neuer Methoden der Bodenbestellung, des Bewässerungssystems, des Anbaus neuer Agrikulturen usw., mithin von der Herausbildung ständiger Siedlungen begleitet. Zu den großen Leistungen technischen Denkens in dieser Revolution gehört die Erfindung des Rades, die zur Töpferscheibe und neuen Transportmitteln führte, des weiteren die Erfindung des Webstuhls und schließlich die Entwicklung geeigneter Verfahren zur Gewinnung und Verarbeitung von Bronze und später Eisen.

Die im 3. und 2. Jahrtausend v. u. Z. im Raum des Ägäischen Meeres und der Balkanhalbinsel lebenden Stämme übernahmen die genannten Errungenschaften von ihren nächstlichen Nachbarn und führten diese, wie archäologische Ausgrabungen belegen, zu einem hohen Grad der Vollkommenheit. Das war die Epoche der kretisch-mykenischen oder ägäischen Zivilisation, die eine retrospektive und daher in gewisser Hinsicht verzerrte Widerspiegelung in den Homerischen Epen gefunden hat. Trotz wiederholter Überfälle durch weniger zivilisierte kriegerische Stämme — der bedeutendste und verheerendste Überfall wurde Ende des 11. Jahrhunderts v. u. Z. von den Dorern unternommen —, sind einige wesentliche Grundlagen der ägäischen Zivilisation unberührt geblieben. Nach der sogenannten finsternen Zeit, zu der die Historiker die Periode des 10./9. Jahrhunderts v. u. Z. rechnen, erfolgte in einer Reihe von Städten der Balkanhalbinsel und vor allem an der Westküste Kleinasiens eine allmähliche Wiedergeburt der städtischen Kultur, die allerdings wesentlich andere Formen annahm als jene, die für die kretisch-mykenische Epoche charakteristisch waren. Die wesentlichsten Veränderungen vollzogen sich auf sozialpolitischem Gebiet. An die Stelle der absolutistischen Monarchien der ägäischen Welt, die in vielem an analoge staatliche Gebilde der Länder des Nahen Ostens erinnerten, trat rasch die Form des Stadtstaates, der Polis, die später zu einem besonderen Charakteristikum der griechischen Welt wurde.

Nach dem Niedergang der staatlichen Formen der kre-

tisch-mykenischen Epoche und im Laufe der ganzen »finsteren« Zeit blieb die Landwirtschaft in Griechenland die Hauptform der materiellen Produktion. Über die Spezifik der landwirtschaftlichen Tätigkeit jener Epoche, über Probleme und Schwierigkeiten, denen der griechische Bauer gegenüberstand, und über die Klassenverhältnisse, die allerdings nur für das Ende dieser Periode charakteristisch waren, berichtet Hesiod in seinem Lehrgedicht »Werke und Tage«. Mit der Zeit erwiesen sich jedoch die landwirtschaftlichen Nutzflächen in vielen Poleis als nichtausreichend, um die schnell wachsende städtische Bevölkerung ernähren zu können. Hieraus ergaben sich zwei Erscheinungen, die die folgende Entwicklung der griechischen Geschichte in vielerlei Hinsicht vorbestimmten.

Die erste Erscheinung war die Kolonisation. Viele Griechen verließen ihre Heimatsorte und begaben sich auf der Suche nach einem besseren Leben in andere Länder — vor allem nach Süditalien und an die Schwarzmeerküste, wo große Ländereien mit fruchtbarem Boden brachlagen. Die dort gegründeten neuen Siedlungen wurden zu selbständigen Stadtstaaten, die jedoch enge wirtschaftliche und kulturelle Beziehungen mit den »Mutter«-Poleis beibehielten. Die meisten Kolonien gründete Milet, das in der Periode vom 8. bis 6. Jahrhundert v. u. Z. die größte und blühendste Stadt des kleinasiatischen Ioniens war. Die Kolonien oder Tochttersiedlungen führten in die alten griechischen Poleis landwirtschaftliche Produkte aus, vor allem Weizen; als Gegenleistung erhielten sie Erzeugnisse des Handwerks, die für den eigenen Bedarf und für den Handel mit der eingeborenen Bevölkerung genutzt wurden.

Eine weitere Erscheinung ist die rasche Entwicklung der Produktion für den Export. Das betraf die berühmten griechischen Vasen, Textilwaren, besonders aus Milet, sowie Gold- und Silberschmuck. Und so wurden die Handwerker in Athen und anderen entwickelten Poleis zu einer Schicht, die eine bedeutsame Rolle zu spielen begann.

Mit dem Handwerk entwickelte sich nicht nur das ästhetische Empfinden, sondern Kunst und Geschicklichkeit (technē) in einem ganz allgemeinen Sinn, die »technische« Begabung überhaupt. Im klassischen Griechenland war die Grenze zwischen dem Handwerk und der Kunst tatsächlich sehr fließend. Die griechischen Vasen sind wirkliche Kunstwerke. Nicht von ungefähr signierten die Meister ihre Va-

sen wie die Maler heute ihre Bilder. Ihre Namen waren »Gütezeichen«. Phidias, Polyklet, Praxiteles sind heute als große Bildhauer bekannt, die vollendete Kunstwerke schufen; dennoch unterschied sich ihr gesellschaftlicher Status wenig von dem eines Töpfers oder Juweliers.

Elemente des Handwerks und der Kunst vereinigte auch die Architektur in sich. Der Beruf des Architekten, also des »Oberbaumeisters«, setzte aber außer dem rein bautechnischen und künstlerischen Sachverstand besondere mathematische Bildung voraus. Für den größten Tempel der Welt hielt Herodot den Heratempel auf der Insel Samos. Er wurde um 530 v. u. Z., als Polykrates regierte, errichtet und nach dessen Fall zerstört. Ausgrabungen zeigten, daß die Konstruktion dieses Tempels nach mathematischen Gesichtspunkten erfolgt war. Bereits in jener Zeit, als die frühe griechische Wissenschaft ihre ersten Schritte machte, verfügten die griechischen Architekten zweifellos über praktikable mathematische Kenntnisse.

Ebenfalls um 530 v. u. Z. wurde auf Samos nach dem Entwurf des Eupalinos von Megara eine Wasserleitung gebaut, die etwa einen Kilometer durch einen Berg führte. Lange haben die Historiker dieser Mitteilung des Herodot mißtraut, bis sie Ende des 19. Jahrhunderts durch eine deutsche archäologische Expedition bestätigt werden konnte. Das technisch Interessanteste an dem Wasserleitungstunnel war, daß er gleichzeitig von beiden Seiten vorgerieben und die Höhen- und Seitenabweichung von wenigen Metern durch einen Querschlag optimal korrigiert worden war. Später zeigte Heron von Alexandria in seiner »Dioptra« das geometrisch-konstruktive Schema, dem die Tunnelbauer folgen mußten, um sich in der Mitte des Berges zu treffen. Das war vor allem deshalb eine komplizierte Aufgabe, weil es recht genauer geodätischer Messungen bedurfte.

Als dritten bemerkenswerten Bau der Samier erwähnt Herodot einen Damm, der den Hafen umgab und eine Länge von etwa 400 m hatte.

Während des Feldzuges des persischen Königs Dareios gegen die Skythen im Jahre 514 v. u. Z. baute Mandrokles von Samos eine Pontonbrücke über den Bosphorus, über die das persische Heer nach Europa kam. Herodot schreibt, daß Dareios mit dem Bau der Brücke sehr zufrieden war und Mandrokles reich beschenkte. Davon stiftete Mandrokles für

den Heratempel ein Gemälde, das König Dareios darstellte, wie er auf einem Thron sitzt und den Marsch seines Heeres über die Brücke beobachtet. Nach über zwanzig Jahren stand vor Dareios' Sohn Xerxes eine ähnliche Aufgabe, als er mit seinem Heer gegen Griechenland zog. Es wird berichtet, daß die beiden ursprünglichen Brücken, die von Phöniziern bzw. von Ägyptern gebaut worden waren, von der Strömung des Hellespont weggespült wurden, worauf der König das Meer auspeitschen und die Aufseher enthaup-ten ließ. Eine neue Schiffsbrücke entstand unter der Leitung des griechischen Technikers Harpalos, der die Konstruktionsfehler der Vorgänger vermied.

Das rasche Wachstum des griechischen Handels war von der Entwicklung des ebenfalls technisch anspruchsvollen Schiffbaus begleitet. Daraus ergaben sich auch erhöhte Anforderungen an die Nautik, die ohne gewisse astronomische Kenntnisse undenkbar ist. Die Legende schreibt Thales sicher nicht von ungefähr eine »Sternkunde für Seefahrer« zu.

Die rasche Entwicklung des Handwerks und der Technik war mithin eines der Charakteristika der griechischen Welt des 7./6. Jahrhunderts v. u. Z. Sie bestimmte zwar nicht die geistigen Hauptprobleme dieser Zeit, aber daß ein technisch rückständiges Land keine günstigen Voraussetzungen für das Entstehen von Wissenschaft bieten konnte, ist unbestreitbar.

Das Aufkommen der frühen griechischen Wissenschaft hing mit dem allgemeinen geistigen Aufschwung zusammen, den Griechenland im 6. Jahrhundert v. u. Z. erlebte und der mitunter als „griechisches Wunder“ bezeichnet wird. Innerhalb einer sehr kurzen Zeit erlangten die Griechen die kulturelle Führungsstellung unter den Völkern des Mittelmeerraums, wobei sie die alten und mächtigen Zivilisationen Ägyptens und Babylons hinter sich ließen.

Die gesellschaftliche Grundlage dafür war die Durchsetzung einer demokratischen Regierungsform in den meisten griechischen Poleis. Die Gleichheit freier Bürger vor dem Gesetz und die Beteiligung jedes einzelnen an der Erfüllung gesellschaftlicher Funktionen förderte die Entwicklung des Gefühls der bürgerlichen Verantwortung und des kritischen Denkens. Durch die Notwendigkeit, in den Volksversammlungen überzeugend, d. h. logisch fundiert, aufzutreten und den eigenen Standpunkt zu verteidigen, vervollkommnete sich die Kunst mündlichen Argumentierens, was letztlich

zur Ausarbeitung ausgefeilter Beweismethoden führte. Die relativ kleine Ausdehnung der Poleis, die eine aufgebauerte administrative Struktur überflüssig machte, sowie die Wählbarkeit von Staats- und Priesterämtern waren Ursache dafür, daß es in den griechischen Poleis im Gegensatz zu den zentralisierten bürokratischen Großreichen des Orients keine Beamten- und Priesterstände gab.

All diese Merkmale zeichneten vor allem die ionischen Poleis an der Westküste Kleinasiens aus. Es kommen allerdings noch einige Besonderheiten dieser Handelsstädte hinzu: eine mehr oder weniger gemischte ethnische Zusammensetzung der Bevölkerung, die Entwicklung der Seefahrt, der Handels- und Kulturaustausch mit den Ländern des Orients und eine relative Schwäche des Adelsstandes. All diese Faktoren erzeugten im Zusammenwirken mit den großen geistigen Gaben der Griechen eine Atmosphäre der Freiheitsliebe und Toleranz. Der Erwerb von Wissen geschah in Ionien nicht im Auftrag staatlicher oder religiöser Institutionen, sondern war eine private Angelegenheit freier Bürger und hatte daher, anders als in Ägypten oder Babylon, keine vordergründig praktische Ausrichtung.

Die gesellschaftspolitische Struktur und die historisch-geographische Situation der ionischen Poleis können einige charakteristische Züge der frühen griechischen Wissenschaft erklären. Einer dieser Züge bestand, wie gesagt, im Verzicht auf religiös-mythologische Erklärungsweisen, deren Kritikwürdigkeit durch die Bekanntschaft mit der Vielfalt und Gegensätzlichkeit der Mythen und Glaubensbekenntnisse deutlich werden mußte. Der griechische Glaube und die griechische Mythologie hatten also keine Allgemeingültigkeit. Die Anthropomorphisierung der Götter, die einen derart künstlerischen Ausdruck in den Homerschen Poemen gefunden hatte, wurde nun als Mangel der allgemein gültigen Religion empfunden; das konstatierte in aller Deutlichkeit Xenophanes von Kolophon, der scharf gegen den anthropomorphen Polytheismus des griechischen Volksglaubens polemisierte: »Wenn Kühe, Pferde oder Löwen Hände hätten und damit malen und Werke wie die Menschen schaffen könnten, dann würden die Pferde pferde-, die Kühe kuhähnliche Götterbilder malen und solche Gestalten schaffen, wie sie selber haben.«

Die ionischen Denker bemühten sich darum, ihren Konzeptionen allgemeine Gültigkeit zu verleihen, sie für alle

Menschen akzeptabel zu machen, ganz gleich, welche Götter sie anbeten mochten. Das erreichten sie dadurch, daß sie die vielen menschenähnlichen Götter und Fabelwesen durch unpersönliche und allgemeingültige Naturkräfte ersetzten. Dann galt es, unter diesen Kräften eine besonders hervorzuheben, die sowohl genetisch als auch hierarchisch an erster Stelle stehen könnte. Dafür konnten solche elementaren Kräfte wie Feuer, Luft, Wasser, Erde in Frage kommen. Das Wasser wurde, wie schon erwähnt, bei vielen Völkern mit dem ursprünglichen Zustand der Welt identifiziert, deshalb erschien die Wahl des Wassers als kosmogonische Ursubstanz natürlich, die Luft (oder der Wind) nahm in den indoiranischen Vorstellungen einen wichtigen Platz ein und wurde in der Sphäre des Mikrokosmos als der menschlichen Seele identisch betrachtet; schließlich kam dem Feuer in der Religion des Zoroastrismus eine besondere Bedeutung zu.

Die ersten wissenschaftlich-philosophischen Systeme, wie sie einige ionischen Denker der frühen Periode entwickelten, waren wesentlich durch solche Ideen der Aufklärung geprägt.

## DIE FRÜHGRIECHISCHE NATURLEHRE

### Was bedeutet »Natur«?

Die antike Tradition der nacharistotelischen Zeit kennt die meisten Werke der griechischen Denker des 6./5. Jahrhunderts v. u. Z. unter dem Titel »Über die Natur« (Peri physios). Es handelt sich gewiß nicht um die originalen »Buchtitel«, sondern eher um eine viel später gewählte Sammelbezeichnung zur Charakterisierung der Hauptproblematik dieser Werke. Es empfiehlt sich daher eine möglichst genaue Analyse des griechischen Naturbegriffs, zumal er sich vom modernen wesentlich unterscheidet.

Heute versteht man unter »Natur« in erster Linie die Gesamtheit der Besonderheiten des Bodens, des Klimas, der Pflanzen- und Tierwelt usw., die der jeweiligen geographischen Region (einem Land, einer Klimazone, einem Kontinent) eigen sind, oder aber im weiteren Sinne die ganze, nicht vom Menschen geschaffene bzw. veränderte Welt, das Universum schlechthin. In einem anderen Sinn wird »Natur« gebraucht, wenn man etwa von der Natur eines bestimmten Dinges spricht. Dann meint man damit seine wichtigste, meist innere, nicht sichtbare Eigenschaft oder sein Wesen. Als die Werke »Über die Natur« geschrieben wurden, hatte »Natur« noch nicht die heutige Grundbedeutung. Das griechische Wort »physis« (»Natur«) stammt vom Verb »phyō«, was soviel wie »ich zeuge«, »ich erzeuge«, »ich bringe hervor« und im medialen Genus verbi »ich entstehe«, »ich stamme ab« heißt. Ursprünglich war dieses Wort den Substantiven »Geburt«, »Herkunft«, »Ursprung« äquivalent. Dann haben sich aus ihm zwei Bedeutungsgruppen herausgeschält: einerseits die äußere Erscheinung, die Größe und Gestalt, die Haltung, andererseits der innere Aufbau, die Zusammensetzung (im abstrakteren Sinne das Wesen) des betreffenden Dinges oder der Gattung, zu der es gehört. Der ursprüngliche Sinn »physis« geht dabei nicht völlig verloren, sondern wird »aufgeho-

ben«; sowohl die äußere Erscheinung als auch die innere Struktur werden als Endergebnis des Prozesses der Entstehung oder Entwicklung verstanden, der dem Prozeß der Entstehung oder Entwicklung eines Lebewesens ähnlich ist. Und schließlich die letzte, für uns interessanteste Bedeutung des Wortes »physis« als eine einem Gegenstand (oder einer Gattung von Gegenständen) immanente eigene Kraft oder Gesetzmäßigkeit, die den Charakter seiner Entwicklung bedingt und somit seine äußere Gestalt, seine Struktur sowie seine inneren Möglichkeiten und sein Verhalten determiniert. Die letzte Bedeutung ist für die Wendungen »naturgemäß« und »gegen die Natur« besonders charakteristisch. Und in dieser Bedeutung beginnt man, die Natur als Naturgesetzlichkeit der »künstlich« vom Menschen (oder Göttern) geschaffenen Ordnung gegenüberzustellen; die Antithese »physis« — »nomos« fand in der Literatur Ende des 5. Jahrhunderts v. u. Z. weite Verbreitung. Aristoteles definierte später »Natur« prägnant als »das Wesen der Dinge, die die Quelle der Bewegung in sich selbst haben«.

Das Aufkommen eines so vielschichtigen Begriffs war für die frühe griechische Wissenschaft bezeichnend. Übernatürliche, göttliche oder überhaupt außerhalb eines gegebenen Dinges liegende Faktoren wurden durch natürliche Ursachen, die in dem Ding selbst zu suchen waren, ersetzt. Freilich wurden diese Ursachen noch nicht differenziert analysiert, sondern auf den globalen Begriff der »Natur« gebracht. Aber selbst in dieser Form war die neue Fragestellung nach den Ursachen alles Geschehens ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Herausbildung des rationalen theoretischen Denkens. In der Wissenschaft »über die Natur« ging es also um das Aufdecken der natürlichen Ursachen der Entstehung, Entwicklung und des Aufbaus der Welt im ganzen und ihrer Bestandteile. Aristoteles nannte sie später »Physik« und diejenigen, die sich mit ihr befaßten, »Physiker« oder »Physiologen«. Von ihnen handeln die folgenden Abschnitte.

### **Die Schule von Milet**

Die griechische Wissenschaft beginnt im Selbstverständnis der antiken Tradition mit Thales von Milet. Er trieb Handel, reiste viel und war einer der einflußreichsten und angesehensten Bürger seiner Stadt. Die Bestimmung seiner

Lebenszeit basiert auf Berichten, wonach er die totale Sonnenfinsternis vorausgesagt haben soll, die sich am 28. Mai 585 v. u. Z. ereignete. Nach dem glaubwürdigen Zeugnis Herodots hat Thales diese Prognose den Ioniern für die Zeitspanne eines Jahres gegeben. Eine zeitlich und räumlich exakte Voraussage wäre damals selbst unter der Annahme, er hätte mit den Berechnungen der babylonischen Sterndeuter vertraut sein können, unmöglich gewesen. Schriften hinterließ er wahrscheinlich nicht. Vom Inhalt seiner Lehren wußte man bereits zur Zeit des Aristoteles keine Einzelheiten mehr.

Die Grundannahmen seiner kosmologischen Konzeption sind: Alles entstand aus Wasser, und die Erde schwimmt wie ein Stück Holz auf dem Wasser. Wahrscheinlich kam Thales zu diesen Ansichten unter dem Einfluß altorientalischer Mythen, die er auf seinen Reisen nach Ägypten und Mesopotamien kennengelernt haben kann. Ferner wird überliefert, daß er, wohl unter dem Eindruck des Magneten, der das Eisen anzieht, die allgemeine Beseeltheit der Dinge angenommen und behauptet hat, alles sei voller Götter.

Im Altertum wurden Thales viele Entdeckungen auf dem Gebiet der Mathematik und Astronomie zugeschrieben; die Zuverlässigkeit dieser Angaben ist jedoch umstritten. Der Neuplatoniker Proklos nennt unter Berufung auf den Aristoteleschüler Eudemos einige Sätze, die erstmalig Thales bewiesen haben soll; zum Beispiel die Gleichheit der Basiswinkel im gleichschenkligen Dreieck und die Halbierung des Kreises durch den Durchmesser. Diese Berichte werden von Wissenschaftshistorikern unterschiedlich gewertet. So hält B. L. van der Waerden die Zeugnisse des Eudemos durchaus für glaubwürdig und damit Thales für den Initiator einer Geometrie, die anders als die der Ägypter und Babylonier auf Beweisführung und logischen Aufbau Wert legte. Andere Historiker meinen, die Beweisführung des Thales habe noch nicht streng logisch sein können. Eine skeptische Position nimmt O. Neugebauer ein, nach dessen Ansicht solche Überlieferungen als unhistorisch zu verwerfen sind.

Und dennoch ist Thales' Ruhm als Mathematiker keine bloße Legende späterer Zeiten, denn er ist bereits in ziemlich frühen Quellen, wie zum Beispiel in den »Vögeln« des Aristophanes, bezeugt. Es ist durchaus denkbar, daß Thales, nachdem er sich in den Ländern des Orients mit einigen

geometrischen Verfahren zur Lösung praktischer Aufgaben vertraut gemacht hatte, ihnen als erster auch ein theoretisches Interesse entgegenbrachte und sie auf irgendeine Weise zu begründen suchte.

Anaximander, der im Altertum als Schüler und Nachfolger von Thales galt, lebte bis in die vierziger Jahre des 6. Jahrhunderts v. u. Z. Seine Lehre legte er in einem Buch in Prosaform dar, das als das erste schriftliche Zeugnis wissenschaftlichen Denkens in der europäischen Geschichte gelten darf. Leider ist nur ein Fragment aus diesem Buch erhalten, das erkennbar in einem bildhaften, gehobenen Stil verfaßt worden war. Aufgrund indirekter Zeugnisse lassen sich jedoch die Hauptthesen Anaximanders relativ genau rekonstruieren.

Dieser Lehre lag eine detailliert ausgearbeitete kosmogonische Konzeption zugrunde. Die Arché, der Ursprung oder Urgrund alles Seienden, ist bei Anaximander nicht mehr das Wasser, sondern das Apeiron, d.h. das Unendliche oder Unbegrenzte. Nach der auf Aristoteles zurückgehenden Tradition wurde Anaximanders Arché gewöhnlich als eine eigenschaftslose und unbestimmte Ursubstanz gedeutet. In einer Reihe jüngster Abhandlungen wird dieses traditionelle Verständnis jedoch in Frage gestellt.

Die Entstehung der Welt stellte Anaximander als Kampf und Absonderung von Gegensätzen dar — in erster Linie von Wärme und Kälte (wobei er vermutlich noch nicht zwischen Kraft, Eigenschaft und Substanz unterschied). Im Schoße einer unbegrenzten Urkraft entsteht gewissermaßen ein Embryo der künftigen Welt, deren feucht-kalter Kern von einer Feuerhülle umgeben wird. Unter der Einwirkung der Glut dieser Hülle trocknet der feuchte Kern allmählich aus, wobei der sich bildende Dampf die Hülle aufbläht, die schließlich platzt und in Ringe (oder »Räder«) zerfällt. Als Folge dieser Prozesse bildet sich im Zentrum der Welt die feste Erde in der Form eines Zylinders heraus, dessen Höhe ein Drittel vom Durchmesser der Grundfläche ausmacht. Die Erde verbleibt unbeweglich in der Mitte, da sie keinen Grund für die Bewegung in irgendeine Richtung hat; sie bedarf also keiner Stütze. Die Sterne, der Mond und die Sonne sind 9, 18 bzw. 27 Radien der Erdscheibe vom Zentrum der Welt entfernt. Was wir als Gestirne sehen, sind eigentlich nur Löcher in feuergefüllten Schläuchen, die um die Erde rotieren. Mit Hilfe eines solchen Bildes

erklärte Anaximander eine Reihe astronomischer und meteorologischer Erscheinungen.

Die lebenden Wesen entstanden nach Anaximander in feuchtem Schlamm, der ursprünglich die ganze Erde bedeckte. Als die Erde auszutrocknen begann, konzentrierte sich die Feuchtigkeit in Vertiefungen, die Meere bildeten, und einige Tiere gingen aus dem Wasser auf das Festland über; darunter waren auch fischähnliche Wesen, aus denen sich die Menschen entwickelten. Als die Menschen groß wurden, platzte die sie bedeckende Schuppenhülle und blätterte ab. Einige Forscher erblickten in dieser Konzeption eine erste Andeutung der Idee von der Evolution der Tierwelt.

Die Entstehung und die Entwicklung der Welt hielt Anaximander für einen sich periodisch wiederholenden Prozeß; nach Ablauf bestimmter Zeiträume löst sich die Welt wieder in den unbegrenzten Urstoff auf. In der Frage, ob Anaximander an eine gleichzeitige Existenz vieler Welten glaubte, gehen die Meinungen auseinander. In einigen seiner Darlegungen kommt nämlich der Terminus Kosmos im Plural (kosmoi) vor. Damit ist aber vermutlich die Vielzahl der Welten in der zeitlichen Aufeinanderfolge gemeint.

Es ist nicht ausgeschlossen, daß sich der Darlegung der Kosmogonie und der allgemeinen Kosmologie im Werk Anaximanders ein geographischer Teil anschloß, der eine Beschreibung der damals den Griechen bekannten Ökumene (des bewohnten Erdkreises) beinhaltete. Auf jeden Fall berichten die Quellen, daß Anaximander der erste war, der eine geographische Karte der Erde zeichnete, auf der die ganze Ökumene in zwei annähernd gleich große Teile — Europa und Asien — zerfiel. Ihm wurde auch die Einführung des Gnomons (der Sonnenuhr) zugeschrieben.

Das Verdienst Anaximanders besteht, wissenschaftshistorisch gesehen, vor allem darin, ein rationales, vom Mythos mit seinen menschenähnlichen Göttern befreites Bild vom Universum geschaffen zu haben. Dieses Bild, dessen Kühnheit und spekulative Kraft beeindruckend, war im großen und ganzen die originäre Schöpfung Anaximanders, wenn auch einzelne Elemente aus altorientalischen Vorstellungen entlehnt sein mögen (hierzu zählt M. L. West das Bild der Feuerringe, die Zahlenverhältnisse, die die Entfernung der Gestirne vom Zentrum der Welt bestimmen, die Zyklizität des Weltprozesses und sogar den Begriff der ewigen und

unbegrenzten Ursubstanz selbst). Es wäre falsch anzunehmen, daß Anaximander die alltägliche menschliche Erfahrung vollständig ignoriert hätte, jedoch wurde diese von ihm nur bei der Ausarbeitung der Details des Weltsystems, nicht aber bei der Aufstellung des Grundschemas der Welt berücksichtigt, das rein spekulativ war. Obwohl Anaximander keine wissenschaftlichen Entdeckungen von allgemeiner Gültigkeit machte, war seine Lehre doch ein entscheidender Schritt in der Entwicklung des wissenschaftlichen Denkens.

Anaximenes, ein dritter bedeutsamer Vertreter der Schule von Milet, lebte etwas später als Anaximander, jedoch verfügen wir über keine Angaben, die uns genauere Aufschlüsse über seine Lebensdaten geben könnten. Ebenso wie Anaximander hat er ein einziges Werk geschrieben, dessen Inhalt uns nur aus indirekten Zeugnissen bekannt ist. Wie aus antiken Quellen hervorgeht, war dieses Werk in einer einfachen und klaren Prosa geschrieben. Für den Urgrund alles Seienden erklärte Anaximenes die unbegrenzte Luft. Die Dinge entstehen aus der Luft durch Verdünnung oder Verdichtung, wobei die Verdünnung von Erwärmung und die Verdichtung von Abkühlung begleitet wird. Die Luft ist in ununterbrochener Bewegung begriffen; wäre sie unbeweglich, hätte sie nicht so verschiedenartige Dinge hervorbringen können. Es gibt einen Quellenbericht, wonach Anaximenes gesagt haben soll: »Wie unsere Seele, die Luft ist, uns regiert, so umfaßt auch den ganzen Kosmos Hauch und Luft.«

Einzelheiten der kosmogonischen Konzeption von Anaximenes sind kaum bekannt. Es wird berichtet, daß zuerst die Erde durch Luftverdichtung (die bildlich mit dem Walken von Wolle verglichen wurde) als flache Scheibe entstand, die quasi auf einem Luftpolster schwimmt. Danach entstehen Meere, Wolken und andere Dinge. Sonne, Mond und die übrigen Gestirne werden aus irdischen Dünsten gebildet, die nach oben steigen, sich verdünnen und eine Feuernatur annehmen. Die Fixsterne sind wie Nägel am Himmelsgewölbe befestigt, während die Planeten sowie Sonne und Mond in der Luft schweben. So befinden sich also hier, anders als bei Anaximander, Sonne und Mond in größerer Erdnähe als die Fixsterne. Hinter dem Horizont bewegen sie sich nicht unter die Erde durch, sondern um die Erde herum; demgemäß wird die Drehung des Himmelsgewölbes von Anaximenes mit dem Drehen eines Filzhutes auf dem Kopf verglichen.

Hieraus ergibt sich, daß bei Anaximenes die Analogiebildung eine große Rolle spielte. Gemessen an dem erhabenen und streng auf mathematischen Verhältnissen fußenden Bild des Universums von Anaximander, mögen die Ansichten des Anaximenes nicht sehr geistreich erscheinen. Und doch waren sie in gewisser Hinsicht ein Fortschritt. Neu bei Anaximenes war die Interpretation der Arché nicht nur als Quelle, sondern auch als Substrat der Dinge der uns umgebenden Welt. Deshalb war die Luft bei Anaximenes etwas, was im Grunde genommen der Urmaterie von Aristoteles näherstand als die physisch unbestimmte Arché Anaximanders. Sehr wichtig war auch der Umstand, daß sich Anaximenes mit der Verdichtung und Verdünnung einen Mechanismus ausgedacht hatte, durch den die verschiedensten Dinge aus der Luft entstehen. Es wurde zum erstenmal das Problem aufgeworfen, auf welche Weise qualitative Veränderungen möglich sind. Die Suche nach der Lösung dieses Problems war ein wichtiger Beweggrund zur Ausarbeitung der Atomistik. Darüber hinaus scheint die Lehre des Anaximenes weniger von altorientalischen Vorstellungen abhängig zu sein als die Kosmologie Anaximanders, sie liegt somit eher in der griechischen »meteorologischen« Tradition.

### Die Pythagoreer

Wenn wir von einer »Schule von Milet« reden, muß man sich im klaren sein, daß diese Bezeichnung relativ ist und nur insofern einen Sinn hat, als die drei Vertreter dieser »Schule« Bürger der Stadt Milet waren. Ihre Ansichten unterschieden sich jedoch so sehr voneinander, daß es schwierig ist, die Kontinuität ihrer Ideen festzustellen, die gewöhnlich einer wissenschaftlichen Schule eigen ist. Und obwohl Anaximander seinen älteren Zeitgenossen Thales zweifellos gut kannte und Anaximenes mit den Lehren Anaximanders sicherlich vertraut war, scheint es noch keine Schule im späteren Verständnis gewesen zu sein.

In der zweiten Hälfte des 6. Jahrhunderts v. u. Z. entstand in Unteritalien eine andere wissenschaftlich-philosophische Schule, die eine derartige Bezeichnung schon eher verdient; die pythagoreische Schule oder, genauer, der Bund der Pythagoreer, der nach seinem Begründer Pythagoras benannt wurde. Die Entstehung dieser Schule ist insofern

mit dem ionischen Kulturgebiet verknüpft, als Pythagoras aus Samos stammte. Er verließ seine Heimat erst in reifem Alter; nach der Überlieferung geschah dies unter dem unerträglichen Druck der Tyrannis des Polykrates. Pythagoras ist viel gereist und muß lange Zeit in Ägypten gelebt haben. Als er sich schließlich in Süditalien niederließ, stiftete er in Kroton eine Art religiös-ethischen Bund oder Orden, dessen Mitglieder — Männer und Frauen griechischer Abstammung — sich verpflichteten, die sogenannte pythagoreische Lebensweise zu führen, die neben einem ganzen System asketischer Übungen auch bestimmte Arten wissenschaftlicher Tätigkeit einschloß.

Zunächst hatten anscheinend nicht nur die pythagoreischen Lehren über die Unsterblichkeit der Seele und die Seelenwanderung, sondern auch die wissenschaftlichen Resultate einen streng geheimen Charakter, sie wurden jedenfalls nicht schriftlich fixiert. Weil zudem die Pythagoreer alle Erfolge ihrer Schule auf Pythagoras zurückzuführen pflegten, ist es praktisch unmöglich, seinen Beitrag und den seiner unmittelbaren Schüler von denjenigen Ergebnissen zu trennen, die sehr viel jüngeren Datums sind. Die Meinungen der Forscher gehen in dieser Frage weit auseinander. Die der »pythagoreischen Frage« gewidmete Literatur ist heute derart uferlos, daß wir nur auf einige Haupttendenzen hinweisen können, die die Entwicklung der historisch-wissenschaftlichen Forschungen auf diesem Gebiet bestimmten.

Man glaubte zunächst völlig den Berichten des Porphyrios, Iamblichos und anderer Autoren der Spätantike, die Pythagoras neben Wundertaten auch wichtige Entdeckungen auf den Gebieten der Mathematik, der Astronomie und anderer Wissenschaften zuschrieben. Später begann man, sie historisch-kritisch als mythische Verklärung der neupythagoreischen und neuplatonischen Schule zu betrachten. Der um die Erforschung der pythagoreischen Schule hochverdiente August Boeckh (1785—1867) hielt Anfang des 19. Jahrhunderts die Fragmente des Philolaos, des ersten Pythagoreers, der seine Ansichten niederschrieb, für die einzige zuverlässige Quelle, die uns von den Pythagoreern des 5. Jahrhunderts v. u. Z. erhalten blieb; später wurden aber auch diese Fragmente in Zweifel gezogen. Die kritische Erforschung der »pythagoreischen Frage« erreichte ihren Höhepunkt erst in unserem Jahrhundert in der Ar-

beit von E. Frank »Platon und die sogenannten Pythagoreer« (1923), in der eine radikale Umdatierung der wissenschaftlichen Errungenschaften der pythagoreischen Schule vorgenommen wurde. Die pythagoreischen Entdeckungen auf dem Gebiet der Mathematik und Astronomie sind nach Franks Meinung erst nach dem Jahr 400 v. u. Z. von Archytas und seiner Schule und unter Einfluß der Atomistik gemacht worden; von der Existenz einer pythagoreischen Schule vor dieser Zeit zu sprechen entbehre jeder Grundlage. In dieselbe Richtung geht die 1962 erschienene Arbeit von W. Burkert »Weisheit und Wissenschaft« über die Pythagoreer, in der der Autor nach detaillierter Analyse aller verfügbaren Quellen zu dem Schluß gelangt, daß die frühen Pythagoreer so gut wie nichts zur Wissenschaft beigetragen hätten. Ihm gilt die Zahlenmystik und die Spekulation mit Gegensatzpaaren vom Typ »gerade — ungerade« und »endlich — unendlich« nicht als Wissenschaft. Die Entdeckung der Irrationalität sowie andere wirklich wissenschaftliche Resultate, die man auf Pythagoras und seine Schüler zurückzuführen pflegte, haben nach Burkerts Meinung so gut wie keine Beziehung zur pythagoreischen Schule.

Daneben verstärkte sich in letzter Zeit eine ganz andere Tendenz, die in den Zeugnissen von Iamblichos und anderen Neuplatonikern, die über Pythagoras schrieben, Angaben erblicken will, die auf das 4. und sogar auf das 5. Jahrhundert v. u. Z., d. h. auf jene Zeit zurückgehen, als die von Pythagoras gegründete Schule noch existierte. Diese Angaben könnten Informationen enthalten, denen historische Tatsachen zugrunde liegen. In einer Reihe von neuesten Arbeiten wurden verschiedene Belege (bis hin zu den Quellen der Numismatik) analysiert, die bis dahin von den Philologen völlig ignoriert wurden. Es stellte sich heraus, daß vieles, was man früher in das Reich der Legende verwies, durch diese Quellenbelege bestätigt wurde. Das führte dazu, daß eine Reihe namhafter Spezialisten jetzt eine gemäßigttere Position bezieht. Dazu gehört K. von Fritz, der einige fundamentale Werke über die altpythagoreische Schule veröffentlicht hat.

In der Tat, man kann mit einer an Sicherheit grenzenden Wahrscheinlichkeit behaupten, daß die pythagoreische Schule bereits von ihren ersten Anfängen an der Mathematik Interesse entgegenbrachte und daß die These: »Alles ist Zahl« von Pythagoras selbst stammt. Wie auch in ande-

ren Theorien der frühen griechischen Denker stellte diese These eine Verallgemeinerung dar, die aufgrund weniger Beobachtungen gemacht wurde. Sowohl alte Belege als auch die frühe mathematische Terminologie verweisen auf die Verbindung dieser Beobachtungen mit der Musik. Eine entscheidende Rolle spielte dabei die Entdeckung, daß sich die Intervalle der Tonleiter durch Verhältnisse natürlicher Zahlen ausdrücken lassen; Oktave 1 : 2, Quinte 2 : 3 und Quarte 3 : 4. Diese Entdeckung regte dazu an, analoge Verhältnisse auch auf anderen Gebieten, zum Beispiel in der Geometrie und der Kosmologie, zu suchen.

Also bestand der Sinn der These: »Alles ist Zahl« in der Überzeugung, daß in jedem Ding auf irgendeine Weise bestimmte Zahlen oder Zahlenverhältnisse verborgen sind. Die Aufgabe der Erkenntnis besteht darin, diese Verhältnisse aufzudecken (ähnlich wie sie in der Musik aufgedeckt worden sind). Dabei ging es hauptsächlich um Zahlen, die nicht über 10 hinausgingen. Einigen dieser Zahlen wurde eine besonders wichtige Rolle zugeschrieben: der 3 (Triade), der 4 (Tetrade), der 7 (Hebdomade) und der 10 (Dekade). Die 1 galt nicht als Zahl, sie war Quelle und Urgrund aller Zahlen und folglich aller Dinge. Fundamentale Bedeutung maßen die Pythagoreer dem Unterschied zwischen den geraden und den ungeraden Zahlen zu.

Die Suche nach solchen Zahlenverhältnissen führte sowohl in die Richtung der Zahlenmystik als auch in die Richtung des Aufdeckens quantitativer Gesetzmäßigkeiten. Diese beiden Richtungen ließen sich durchaus in ein und derselben Schule verbinden. Auf die erste dieser Richtungen werden wir überhaupt nicht eingehen, da ihre Betrachtung über den Rahmen der Geschichte der Wissenschaft hinausgehen würde.

Was die mathematischen Entdeckungen der Pythagoreer betrifft, so wird von ihnen im Abschnitt, der dem Entstehen der mathematischen Wissenschaft gewidmet ist, die Rede sein. An dieser Stelle wollen wir uns lediglich auf ein Beispiel beschränken, das zeigen soll, wie in Einzelfällen die Suche nach Zahlenverhältnissen zu rein wissenschaftlichen Ergebnissen führen konnte.

Es ist anzunehmen, daß die Pythagoreer sehr schnell darauf aufmerksam geworden sind, daß drei Strecken, die zueinander im Verhältnis 3 : 4 : 5 stehen, ein rechtwinkliges Dreieck bilden. Dies war zwar in den Ländern des Orients

längst bekannt, aber es entsprach voll und ganz dem pythagoreischen Geist, bei der Bestimmung der Eigenschaften einer geometrischen Figur nach ganzzahligen Verhältnissen zu suchen. Das weitere Studium dieser Frage ermöglichte es, dieses Verhältnis zu verallgemeinern, und führte zum Beweis des Theorems, das den Namen »Satz des Pythagoras« trägt. Ob tatsächlich Pythagoras oder ein jüngerer Pythagoreer diesen Satz formulierte, werden wir niemals erfahren.

Charakteristisch für die pythagoreische Lehre war; daß sie den grundlegenden Gegensätzen wie endlich — unendlich, gerade — ungerade, Einheit — Vielheit, rechts — links, männlich — weiblich große Beachtung schenkte. Aristoteles zählt zehn solcher Paare auf, aber es ist unsicher, ob schon die frühen Pythagoreer diese zehn Paare kanonisiert haben. Wie schon erwähnt, ist die Verwendung analoger Oppositionen zum Zwecke des Klassifizierens und Ordnen bereits dem urzeitlichen vorwissenschaftlichen Denken eigen. Freilich decken sich die pythagoreischen Gegensätze nicht ganz mit dem Standardkatalog von Oppositionen, deren sich gewöhnlich das mythenschöpferische Denken primitiver Völker bedient hat und in dem wir kein solches Paar wie endlich — unendlich (und bei den Pythagoreern war das das Wichtigste) finden, ganz zu schweigen von dem Paar quadratisch — rechteckig, das das Interesse der Pythagoreer für die Geometrie bezeugt. Im großen und ganzen stellt jedoch die Verwendung solcher Oppositionen durch die Pythagoreer ein archaisches Moment in ihrer Lehre dar, zumal die von Aristoteles genannten Gegensatzpaare das Wertvolle von vermeintlich Minderwertigerem scheiden. (Tab. 1). Wollen wir festhalten, daß auch in den Lehren solcher Denker wie Anaxagoras, Empedokles und später Aristoteles Gegensätze wie warm — kalt, trocken — feucht, hell — dunkel eine große Rolle spielen, doch handelt es sich hier um wertneutrale Qualitäten.

#### **Tabelle 1**

##### **Die zehn pythagoreischen Gegensätze**

|                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|
| 1 endlich — unendlich | 6 Ruhe — Bewegung     |
| 2 ungerade — gerade   | 7 gerade — gekrümmt   |
| 3 Einheit — Vielheit  | 8 Licht — Dunkel      |
| 4 rechts — links      | 9 Gut — Böse          |
| 5 männlich — weiblich | 10 Quadrat — Rechteck |

Nach Zeugnissen von Aristoteles und anderen alten Autoren kann man schlußfolgern, daß die Pythagoreer eine eigene kosmogonische Konzeption hatten, die mit ihrer Lehre von den Zahlen eng verbunden war. Es ist sehr wenig über sie bekannt, ihre Hauptideen laufen wahrscheinlich aber auf folgendes hinaus.

Ausgangszustand der Welt war bei den Pythagoreern ein unbegrenztes Urelement, das sie entweder mit einer unendlichen Leere oder mit der Luft identifizierten. Es muß darauf verwiesen werden, daß es einen klar definierten Begriff des leeren Raumes zu jener Zeit noch nicht gab. Die pythagoreische Leere ist eher eine ungeformte, weder Grenzen noch innere Gegliedertheit aufweisende Unendlichkeit. In dieser Unendlichkeit entstand die Einheit Feuer, die die Rolle des Samens oder Embryos spielte, aus dem sich der Kosmos entwickelte. Diese Einheit wuchs auf ähnliche Art und Weise, wie sich eine Embryozelle in einem Nährstoffmedium entwickelte; sie sog das angrenzende Unendliche in sich auf, wodurch sie es begrenzte und formte. Erst in die Länge, dann in die Breite und Höhe gehend, brachte sie die Zwei, die Drei und die Vier hervor, die — geometrisch interpretiert — der Linie, der Fläche und dem Raumkörper entsprechen. So sollte schließlich der ganze Kosmos durch Zahlen geprägt sein.

Es unterliegt keinem Zweifel, daß die oben dargelegte Konzeption archaisch ist; davon zeugt insbesondere ihr spezifischer Zoomorphismus. Zugleich wird am Beispiel der dargelegten Konzeption die funktionelle Rolle der Gegensätze bei den Pythagoreern deutlich.

## **Heraklit und die Eleaten**

Über das Leben Heraklits von Ephesos (um 540—480 v. u. Z.) wissen die spätantiken Quellen viele imposante Einzelheiten zu berichten, deren Glaubwürdigkeit durch nichts bewiesen werden kann. Glaubwürdig erscheint allerdings, daß Heraklit einen Abschnitt seines Lebens in Persien verbrachte, da einige Aspekte seiner Lehre allem Anschein nach vom Zoroastrismus abhängig sind. Seine Anschauungen hat Heraklit in einem Buch dargelegt, das formal keine Ähnlichkeit mit einem wissenschaftlichen Werk hat; es handelt sich nämlich um eine Sammlung metapho-

rischer Aussprüche, die zuweilen sehr dunkel in ihrem Sinn sind, weshalb man Heraklit auch »den Dunklen« nannte.

Mit den Denkern der Schule von Milet verband Heraklit die Frage nach der *arché*, als die ihm das Feuer galt: »Diese Welt, dieselbe von allen Dingen, hat keiner der Götter noch Menschen gemacht, sondern sie war immer und ist und wird immer sein ein ewig lebendiges Feuer, nach Maßen sich entzündend und nach Maßen verlöschend.« Bei der Wahl des Feuers ließ sich Heraklit wahrscheinlich am wenigsten von Überlegungen physikalischer Art leiten. Das Feuer war ihm ein Symbol der ewigen Bewegung und Veränderung. Der nie endende Weltprozeß verläuft bei Heraklit auf zwei Wegen; »abwärts«, wenn das Feuer sich in Wasser und das Wasser sich in Erde verwandelt, und »aufwärts«, wenn der Erde und dem Wasser Ausdünstungen entsteigen, zu denen Heraklit auch die Seelen der Lebewesen zählte. Die Ausdünstungen sind unterschiedlichen Charakters: Die hellen und reinen verwandeln sich in Feuer, steigen nach oben und konzentrieren sich in runden Behältnissen oder Schalen, so daß wir sie als Sonne, Mond und Sterne wahrnehmen; die dunklen und feuchten Ausdünstungen verursachen Regen und ähnliche meteorologische Erscheinungen. Durch das zeitweilige Übergewicht der Ausdünstungen dieser oder jener Art erklärt sich der Wechsel von Tag und Nacht, von Sommer und Winter. Die Mond- und Sonnenfinsternisse sowie die Phasen des Mondes führt Heraklit darauf zurück, daß die Schalen teilweise oder ganz ihre Hohlseite von uns abwenden. Über die Form und die Lage der Erde scheint Heraklit keine Aussagen gemacht zu haben.

Alle oben genannten Veränderungen erfolgen dem Logos gemäß, einem höchst vieldeutigen und später oft interpretierten Terminus. Unbestreitbar jedoch ist eine seiner Bedeutungen, das Weltgesetz, wonach sich alles aus Feuer bildet und wieder in Feuer auflöst.

Nach den späten Quellenberichten vertrat Heraklit die Konzeption einer periodischen Kosmosbildung, wonach die Welt bald ganz verbrennt, bald neu aus Feuer entsteht. Jedoch nehmen viele Forscher an, daß die Idee von der Verbrennung (*ekpyrosis*) des Kosmos lediglich einer späteren stoischen Interpretation einiger Äußerungen von Heraklit entsprang, die grundsätzlich auch eine andere Deutung zulassen.

Die wichtigste Idee der Philosophie von Heraklit war die Idee der ewigen Bewegung und der allgemeinen Veränderbarkeit aller Dinge. Um diese Idee anschaulich zum Ausdruck zu bringen, bediente sich Heraklit des Bildes vom Fluß, in den man nicht zweimal hineinsteigen kann, denn »denen, die in dieselben Flüsse hineinsteigen, strömen andere und wieder andere Wasserfluten zu«. Der Veränderbarkeit alles Seienden liegt nach Heraklit der ununterbrochene Kampf und Wechsel von Gegensätzen zugrunde, die aber einander nicht ausschließen, sondern eine Art höchste Einheit — die Harmonie der Welt — bilden. Diese Gedanken wurden von Hegel hoch eingeschätzt, der darin den historisch ersten Ausdruck des dialektischen Weltbegriffs erblickte. Und Engels schrieb, daß die »ursprüngliche, naive, aber der Sache nach richtige Anschauung von der Welt ... die der alten griechischen Philosophie [ist] und ... zuerst klar ausgesprochen [ist] von Heraklit: Alles ist und ist auch nicht, denn alles fließt, ist in steter Veränderung, in stetem Werden und Vergehen begriffen«\*.

Wenn man Heraklits Lehre im ganzen einschätzen soll, so muß man feststellen, daß sie vor allem für die Entwicklung des philosophischen Denkens eine große Rolle gespielt hat. Seine naturwissenschaftlichen Ansichten waren ziemlich unmaßgeblich; so meinte er, die Sonne habe die Breite eines menschlichen Fußes, und für Mathematik scheint er sich überhaupt nicht interessiert zu haben. Er verachtete »Vielwisserei«, denn sie bringe noch keinen Verstand. Die kosmologischen Abschnitte in Heraklits Buch dienten wahrscheinlich nur als Präambel zum Hauptteil, der vor allem Äußerungen allgemein philosophischen, ethischen und politischen Charakters enthielt. Heraklits Bemühungen waren darauf gerichtet, das einheitliche Weltgesetz oder Weltprinzip zu finden, denn »Eins nur ist das Weis: sich auf den Gedanken zu verstehen, als welcher alles auf alle Weise zu steuern weiß«.

Der wandernde Dichter Xenophanes aus der kleinasiatischen Stadt Kolophon war älter als Heraklit, starb aber vermutlich erst nach ihm. Die antike Tradition bezeichnet ihn als Begründer der eleatischen Schule und »Lehrer« des Parmenides, der bei der Ausarbeitung seines philosophischen Systems wohl tatsächlich einige Anregungen von Xenophanes

---

\* Karl Marx, Friedrich Engels, Werke, Band 20, Dietz Verlag Berlin 1973

nes empfangen hat. In seinen Dichtungen kritisierte Xenophanes leidenschaftlich den anthropomorphen Polytheismus der griechischen Religion und verspottete auch die pythagoreische Seelenwanderungslehre. Den traditionellen Gottesvorstellungen stellte er die Idee eines unbeweglichen kugelartigen Gottes entgegen, der »ganz sieht, ganz denkt, ganz hört«. Nach einigen Quellenberichten identifizierte er diesen einheitlichen Gott mit dem kugelförmig begrenzten All. Andere Hinweise besagen, daß Xenophanes sich die Erde als nach unten hin unbegrenzt vorstellte. Die Welt ist ewig, aber periodischen Veränderungen ausgesetzt, die durch die Vermischung des Meeres mit dem Festland hervorgerufen würden. Als Beweis führte er die auf Bergen gefundenen Muscheln und die Abdrücke von Fischen und anderen Seetieren in Steinbrüchen an. Alles, was wächst und entsteht, besteht aus Erde und Wasser. Aus dieser Behauptung folgt, daß Xenophanes sich nicht zur Idee der milesischen Schule und des Heraklit von einem einheitlichen Urprinzip alles Seienden bekannte.

Die eleatische Schule erhielt ihren Namen nach der Stadt Elea in Unteritalien. Ihr Sohn und Bürger war Parmenides, der Begründer und Hauptvertreter dieser Schule. Seine Schaffensperiode liegt in der ersten Hälfte des 5. Jahrhunderts v. u. Z. Über die Lebensdaten verfügen wir nicht; nach einigen Quellen wurde er um das Jahr 540 v. u. Z., nach anderen um das Jahr 515 v. u. Z. geboren. In der Jugend hatte Parmenides wahrscheinlich Verbindungen zu den Pythagoreern. Seine Ansichten legte er in einem Lehrgedicht dar, das aus einem allegorischen Prolog und zwei Teilen bestand. Der erste Teil, von dem uns größere Auszüge erhalten geblieben sind, enthält die Seinslehre (Ontologie). Das Seiende ist das, was tatsächlich existiert, im Gegensatz zu dem, was Schein und bloße Meinung ist. In seiner Analyse des Sein-Begriffs kam Parmenides zu dem Schluß, daß das Seiende einheitlich und unteilbar, unbeweglich und unveränderlich sein müsse. Da aber das Seiende, das er sich als raumerfüllende Körperlichkeit dachte, eine letzte Grenze habe, so sei es nach allen Seiten hin vollendet, »gleich der Masse einer wohlgerundeten Kugel, von der Mitte nach allen Seiten hin gleich«.

Der zweite Teil des Gedichts, der noch lückenhafter überliefert ist, stellt die Naturlehre im engeren Sinne vor, die jedoch keinen Anspruch auf Wahrheit erheben und nur die

»Wahnvorstellungen der Sterblichen« wiedergeben könne. Er nimmt hier als höchste Ursubstanz zwei entgegengesetzte »Formen« (morphai) — das Licht oder den Äther (Feuer) und das Dunkel oder die Nacht (Erde) — an, aus denen alle sinnlich wahrnehmbaren Dinge bestehen. Das Universum bestehe aus konzentrischen Ringen oder »Kränzen«, die sich um ein Zentrum drehen; einige bestehen aus reinem Feuer, in anderen mischen sich Feuer und Erde. Es gibt Anhaltspunkte dafür, daß Parmenides die Kugelgestalt der Erde angenommen hat. Ferner betrachtete er in diesem Teil des Gedichts himmlische und atmosphärische Erscheinungen, äußerte Gedanken zur Natur der Sinneswahrnehmungen, über den Ursprung der Lebewesen, über die Fortpflanzung usw. Der in solchen Fachfragen wenig originelle Parmenides ging in die Geschichte des menschlichen Denkens vor allem als Autor der Seinslehre und somit als Begründer der philosophischen Ontologie ein. Aber auch aus naturwissenschaftlicher Sicht war seine Ontologie von Interesse. Das wird im folgenden klar werden, wenn wir die philosophisch-physikalischen Systeme der Denker des 5. Jahrhunderts v. u. Z. behandeln werden.

Parmenides' Schüler Zenon verfaßte eine Schrift, in der er zeigte, daß die Annahme der Vielheit der Dinge und der Möglichkeit der Bewegung zu unlösbaren Widersprüchen (Aporien) führe. Bei dieser rein logischen Analyse stieß Zenon auf das wissenschaftlich bedeutsame Problem des Kontinuums, indem er feststellte, daß eine kontinuierliche Größe nicht als Gesamtheit diskreter Punkte, die Bewegung nicht aus einer Vielzahl von Ruhelagen gedeutet werden könne. In diesem Zusammenhang ist es unwesentlich, ob Zenons Polemik gegen die Zahlauffassung der Pythagoreer gerichtet war (wie der englische Philosophiehistoriker J. Burnet vermutete) oder ob ihr Sinn ausschließlich darin bestand, Parmenides' Lehre zu unterstützen (wie Platon im »Parmenides« schreibt). Die von Zenon aufgeworfene Problematik ist über den konkreten historischen Anlaß hinaus eine Herausforderung geblieben. Eine umfangreiche Literatur hat die Zenonschen Aporien analysiert, besonders in den letzten hundert Jahren, als die Mathematiker in ihnen die Vorwegnahme der Paradoxien der modernen Mengenlehre erblickten.

Zenons Lehre leitete eine neue Etappe des wissenschaftlichen Denkens ein. Sie kennt keine Analogieschlüsse und

ist das erste bekannte Beispiel einer rein logischen Beweisführung. Aus diesem Grund kann man Zenons Namen mit Sicherheit in den Lehrbüchern zur Geschichte der Logik finden.

Der dritte berühmte Vertreter der eleatischen Schule, Melissos von Samos, lebte um 444 v. u. Z. und hatte keine Verbindung nach Italien. Parmenides' Lehre vom Sein hatte also weithin Resonanz gefunden. Melissos schrieb »Über die Natur oder über das Seiende«. In dieser fragmentarisch erhalten gebliebenen Schrift wurden in ionischer Prosa Parmenides' Argumente über das einheitliche, unteilbare, unveränderliche und unbewegliche Sein wiederholt und entwickelt. Melissos vertrat nur in einem Punkt eine andere Auffassung, insofern er das Seiende für unbegrenzt hielt. Denn wenn es begrenzt wäre, argumentierte er, müßte es an das Nichtseiende grenzen. Das Nichtseiende aber existiert nicht, also kann das Seiende nicht begrenzt sein. Faktisch identifizierte Melissos das Sein mit dem unendlichen Raum, in dem nichts geschieht. Es muß allerdings betont werden, daß die Idee eines unendlichen Raums den frühen griechischen Denkern noch fernlag. Davon wird im Zusammenhang mit der Atomistik von Leukipp und Demokrit noch die Rede sein.

### **Die nachparmenidische Wissenschaft**

Die griechischen Denker des 5. Jahrhunderts v. u. Z., die sich mit naturwissenschaftlichen Fachfragen beschäftigten, standen ganz unter dem Eindruck der Ontologie des Parmenides. Jedoch konnten sie diese Lehre nicht einfach akzeptieren, da dies bedeutet hätte, die Welt und damit ihren Untersuchungsgegenstand für unwirklich zu halten. Andererseits schienen ihnen die Argumente von Parmenides über die Eigenschaften des wahren Seienden größtenteils schlüssig. Deshalb stimmten die »Physiker« der Generation nach Parmenides diesen Argumenten weitgehend zu, wobei sie von der Lehre der Eleaten nur in einem, allerdings sehr wichtigen Punkt abgingen: Sie lehnten das Prinzip von der Einheit des Seienden ab, indem sie das Vorhandensein einer Reihe von Urgründen anerkannten, von denen ein jeder über Eigenschaften verfügt, die dem wahren Sein bei Parmenides immanent sind. Die Urgründe waren nötig, um das Problem der Vielheit der Dinge sowie die Probleme ih-

res Entstehens und Vergehens, ihrer Veränderung und Bewegung lösen zu können. Der Schritt dieser Denker war folgenreich, denn er führte zur Idee der Elemente, aus denen die Dinge bestehen, und der fundamentalen Einsicht, daß es keine Entstehung aus dem Nichts gibt.

Hervorragende Vertreter dieser geistigen Strömung waren Empedokles, Anaxagoras und Leukipp, der Begründer der Atomistik. Zunächst wollen wir im einzelnen auf die Lehren des Empedokles und des Anaxagoras eingehen.

Empedokles aus Agrigent (Sizilien) lebte um 490—430 v. u. Z. Er war eine markante und widerspruchsvolle Persönlichkeit, die Züge eines Philosophen, Dichters, Naturwissenschaftlers, Arztes, Politikers, Sühnepriesters und Magiers in sich vereinigte. Seine Lehre scheint nicht unbeeinflusst von den Pythagoreern, knüpft aber vor allem an die Leistungen des Parmenides an. Empedokles schrieb zwei Lehrgedichte, »Über die Natur« und die »Reinigungen«, von denen größere Fragmente mit insgesamt 440 Versen erhalten sind.

Von besonderem naturwissenschaftlichem Interesse ist seine Konzeption der vier Elemente: Feuer, Luft, Wasser und Erde oder, in mythologischer Bezeichnung, »Zeus«, »Hera«, »Nestis« und »Hades«, die er die »Wurzeln aller Dinge« nennt. Diese »Wurzeln« sind bei Empedokles ewig, unveränderlich und können weder aus etwas anderem entstehen noch ineinander übergehen. Alle übrigen Dinge ergeben sich aus den Verbindungen dieser Elemente in bestimmten quantitativen Verhältnissen; in einigen Fällen gibt Empedokles diese Proportionen an, die von ihm wahrscheinlich aufgrund spekulativer Erwägungen, jedoch unter Berücksichtigung der sinnlich wahrnehmbaren Eigenschaften entsprechender Dinge gefunden wurden. Neben den vier Elementen nimmt Empedokles zwei weltumspannende Kräfte an, die verbindende Liebe (*philia*) und den trennenden Haß (*neikos*). Er scheint zwei Hauptphasen des zyklischen Weltprozesses unterschieden zu haben. Dominiert die Liebe, sind alle vier Elemente auf vollkommenste Art und Weise vermischt und bilden eine riesige homogene und in Ruhe verharrende Kugel (*sphairos*). Dabei wird der Haß in die peripheren Gebiete der Welt verdrängt. Schließlich dringt der Haß, indem er die Elemente trennt, wieder zur Mitte vor. Dadurch kommt es zur Störung des Gleichgewichts und zur zunächst langsamen, dann schneller werden-

den Drehung der Welt. In der Phase des Hasses, in der die Elemente vollkommen getrennt und in konzentrischen Schichten übereinander gelagert sind, vollzieht sich der Umschwung am schnellsten; er wird in dem Maße schwächer, wie die im Zentrum der Welt zusammengepreßte Liebe Oberhand gewinnt und die getrennten Elemente wieder vermischt.

Die Einzelheiten dieser merkwürdigen Kosmogonie bleiben unsicher wie das ganze Modell, das lediglich eine gewisse Wahrscheinlichkeit für sich beanspruchen kann. Es gibt auch andere Rekonstruktionen. Der Franzose J. Bollack zum Beispiel negiert die Zyklizität des Weltprozesses bei Empedokles überhaupt.

Die Idee des unendlichen Raums ist bei Empedokles noch nicht vorhanden. Quellen wissen mitzuteilen, daß Empedokles der Welt (dem Kosmos) nicht eine streng kugelförmige, sondern eine eiförmige Gestalt zuschrieb. Ein Fragment lautet: »Im All gibt es nirgends einen leeren Raum, noch einen, der übervoll wäre.« Das Himmelsgewölbe, an dem die Fixsterne festsäßen, sei seiner Substanz nach eisartig. Die Planeten könnten sich jedoch frei im Raum bewegen. Die Sonne sei selbst kein Feuer, sondern einer Kristallinse vergleichbar, die unter der Erde befindliches Feuer reflektiere. Ihr Abstand von der Erde sei doppelt so groß wie der des Mondes, der aus verdichtetem Wolkenmaterial bestehe, eine flache Form und sein Licht von der Sonne habe. Die Sonne verfinstere sich, wenn der Mond unter ihr durchliefe. Wie sich Empedokles die Form der Erde vorstellte, ist unklar. Die Meeresgewässer befanden sich seiner Meinung nach in den Tiefen der Erde; als Folge des kosmischen Umschwungs wurden diese wie aus einem Schwamm aus ihr herausgequetscht. An einer Stelle nennt Empedokles das Meer »den Schweiß der Erde«.

Großes Interesse wird der von Empedokles entwickelten Zoogonie entgegengebracht, in der viele die Vorwegnahme der Darwinschen Idee der natürlichen Auslese erblicken. Und zwar könnten die Lebewesen nur in den Übergangsphasen entstehen, in denen die Liebe bzw. der Haß ihre Vorherrschaft verlieren. Im ersten Fall bilden sich anfangs zusammengesetzte Formen, die sich dann in Wesen entgegengesetzten Geschlechts teilen. Im zweiten Fall findet der umgekehrte Prozeß statt: Im warmen, feuchten Schlamm entstehen einzelne Glieder und Organe, die ungeordnet im

Raum schweben, sich zufällig miteinander verbinden und die unterschiedlichsten, meist mißratene Wesen bilden; nur wenige von ihnen erweisen sich als lebensfähig und überleben.

Als Arzt maß Empedokles den Fragen der Anatomie und Physiologie große Bedeutung bei. Seinen Vorstellungen vom Aufbau des Organismus legt er die Lehre von vier Elementen zugrunde, nach der die unterschiedlichen Eigenschaften des organischen Gewebes durch die Mischungsverhältnisse der Elemente erklärt werden. Interessante Gedanken äußert Empedokles über die Vererbung, über Unterschiede der Geschlechter und die Entwicklung des Embryos. Die vererbten Eigenschaften des Kindes werden durch das Verhältnis des Vater- und Muttersamens bestimmt, aus dem das Embryo entsteht. Das Geschlecht des Embryos hängt von der Wärme der Gebärmutter ab, in der er sich entwickelt; eine wärmere bringt ein männliches, eine kältere ein weibliches Wesen hervor. Der männliche Embryo bildet sich schneller als der weibliche. Der Vorgang des Ein- und Ausatmens wird von Empedokles durch die rhythmische Bewegung des Blutes erklärt; die Luft strömt dabei durch die Poren der Haut ein und aus, wie etwa bei einer Wasseruhr (Klepsydra) beobachtbar sei. Ursache des Schlafes sei die Abkühlung des Blutes; der Tod tritt ein, wenn die Wärme den Organismus völlig verläßt.

Die von Empedokles detailliert ausgearbeitete Theorie der Sinneswahrnehmungen basiert auf dem Prinzip »Gleiches wird durch Gleiches erkannt«. So glaubte er zum Beispiel, das Augeninnere bestehe aus allen vier Elementen, wobei ein jedes bestimmte Poren ausfüllt. Wenn sich ein Element mit den entsprechenden Ausflüssen, die von einem äußeren Gegenstand ausgehen, trifft, kommt die Sehempfindung zustande. Seine Erklärung der Hörempfindung klingt recht modern. Die von der Stimme in Bewegung gesetzte Luft schlage an das knorpelartige Gebilde, das wie eine Glocke im Innern des Ohres aufgehängt sei. Angenehme Wahrnehmungen erklärte Empedokles durch die Wirkung von Gleichem auf Gleiches, unangenehme Gefühlseindrücke durch das Aufeinandertreffen entgegengesetzter Agentien.

Im offenbaren Gegensatz zu den naturwissenschaftlichen Anschauungen steht seine in den »Reinigungen« (»Katharmoi«) entwickelte Lehre, die von pythagoreischen Ideen der Unsterblichkeit der Seele, der Seelenwanderung und der

sittlichen Läuterung geprägt ist. Man hat diesen Gegensatz zu erklären versucht, indem man die beiden Lehrgedichte so grundverschiedenen Charakters verschiedenen Schaffensperioden des Empedokles zuordnete. Es ist jedoch möglich und wahrscheinlicher, daß er diesen Widerspruch nicht sah und tatsächlich nüchterne Naturerklärung mit religiösem Enthusiasmus (er nannte sich selbst einen Gott!) zu vereinbaren wußte.

Empedokles hat eine Reihe wichtiger Ideen der späteren Naturwissenschaften vorweggenommen. Theodor Gomperz hob drei dieser Ideen hervor, die zum Fundament der Chemie wurden; die Hypothese der Vielheit, und zwar einer begrenzten Vielheit der Grundelemente, die Idee der Verbindungen, die diese Elemente miteinander eingehen, und schließlich das Erkennen der Mannigfaltigkeit möglicher Verbindungen durch Variation der quantitativen Verhältnisse.

Anaxagoras aus Klazomenai (um 500—428 v. u. Z.) stand ganz in der Tradition der milesischen Schule. Zugleich wurde er von den Eleaten und vielleicht von der früheren Atomistik stark beeinflusst. Um 462 v. u. Z. kam er nach Athen, wo er am Hofe des Perikles lebte. Er brachte den Geist der ionischen Aufklärung mit und wurde dadurch zum Begründer der philosophischen Schule von Athen. Gegen Ende seines Lebens wurde Anaxagoras von Gegnern des Perikles wegen Gottlosigkeit angeklagt, konnte sich aber ins Exil nach Lampsakos am Hellespont retten.

Der Stofflehre des Anaxagoras liegt die Annahme einer Unzahl qualitativ differenzierter Urstoffe zugrunde, die weder entstehen noch vergehen und in entsprechenden Proportionen gemischt in allen sinnlich wahrnehmbaren Objekten der uns umgebenden Welt vorkommen. Zu diesen Grundbestandteilen, die Aristoteles später »Homöomeren«, d. h. »gleichteilige« Stoffe, nannte, rechnete er eine Unzahl qualitativ bestimmter Dinge wie pflanzliches und tierisches Gewebe, die Metalle und homogene Mineralien; hinzu kommen einige Gegensatzpaare wie warm und kalt, hell und dunkel, trocken und feucht, dünn und dicht.

Ein origineller Zug dieser Lehre ist das Prinzip »Alles in allem« oder »In allem ist ein Teil von allem«. In jedem Ding, mag es noch so klein sein, sind demnach alle Homöomeren und Gegensatzpaare enthalten; die in Erscheinung tretenden Eigenschaften eines Dinges werden jedoch von jenen Komponenten bestimmt, die in diesem Ding überwie-

gen. Verbunden mit diesem Prinzip war die Anerkennung der unendlichen Teilbarkeit der Stoffe. »Denn es ist unmöglich, daß das Seiende durch Teilung bis ins Unendliche aufhört zu sein.« Ferner konnten die Elemente des Empedokles im Verständnis des Anaxagoras keineswegs elementaren Charakter haben. Mit Empedokles leugnete er jedoch die Existenz des leeren Raums.

Anaxagoras lehnte die Idee der Zyklizität des Weltprozesses ab, die für die Lehren des Anaximander (vielleicht auch Anaximenes), Heraklit und Empedokles charakteristisch war, und vertrat eine evolutionäre Kosmogonie, nach der sich die Welt aus einem chaotischen Urzustand heraus auf bestimmte vorgegebene Weise entfaltet. Der Urzustand, in dem noch »alles zusammen« (panta homoy) ist, kommt durch das Hinzutreten des »Nus«, d. h. Vernunft, derart in Bewegung, daß aus dem Chaos ein Kosmos, also ein wohlgeordnetes Ganzes wird. Dieses bewegende Prinzip gibt an irgendeiner Stelle den Anstoß für eine kräftige Wirbelbewegung (perichoresis), die um sich greift und immer neue Mengen des Urgemischs erfaßt. Die schnelle Drehung bewirkt dessen Entmischung oder Teilung in Komponenten: in erster Linie in den Äther (Feuer) und in die Luft, die den peripheren bzw. den inneren Bereich des kosmischen Wirbels einnehmen. In jedem dieser Elemente sind alle möglichen »Samen«, d. h. verschwindend kleine Teilchen unterschiedlicher Stoffe enthalten, die sich in Form, Farbe, Geschmack und Geruch unterscheiden. Im weiteren trennen sich die dichteren und dunkleren Komponenten von der Luft ab — die Wolken, das Wasser, die Erde, die Steine. In Übereinstimmung mit dem Prinzip »Gleiches strebt zu Gleichem« erfolgt die Zusammenballung gleicher Samen zu makroskopischen Gebilden, die von uns als homogene Stoffe empfunden werden. Dieses Prinzip erweist sich in Verbindung mit der trennenden Wirkung der kosmischen Drehung als ausreichend für die Formierung des Kosmos. Man darf dabei nicht außer acht lassen, daß der ganze Prozeß der Kosmosbildung und folglich die Organisation des Kosmos im ganzen von dem primären Anstoß des »Nus« gleichsam vorprogrammiert waren. Wäre ein solcher Anstoß in einem anderen Bereich der Urmasse erfolgt, so wäre auch dort eine Welt entstanden, die in jeder Beziehung der unseren gleich wäre. Ob wirklich viele Welten entstehen oder der Prozeß der Kosmosbildung ein einmaliger Akt ist, bleibt

offen. Die antiken Quellen zählten Anaxagoras jedenfalls zu den Verfechtern der zweiten Möglichkeit.

Anaxagoras war der Meinung, daß die kosmische Drehung nie zum Stillstand kommen wird. Sie wird sich aber in dem Maße verlangsamten, wie sie neue Mengen des sie umgebenden Gemischs einbezieht; somit erweitert sich der Kosmos immer mehr. Diese Drehung empfindet man als Drehung des Himmelsgewölbes, die den Wechsel von Tag und Nacht begleitet. Die Erde, die sich aus den dichtesten und schwersten Substanzen gebildet hat, verlangsamte ihre Drehung schneller und befindet sich in der Mitte des Wirbels. Sie hat eine flache Form und wird durch die unter ihr befindliche Luft gehalten. Die Gestirne wurden durch den Umschwung des Äthers von der Erdscheibe abgerissen. Die Sonne ist eine glühende Gesteinsmasse und größer als der Peloponnes. Die Sterne sind erhitzte Steine, die manchmal niederstürzen; so erklärte Anaxagoras den Fall des großen Meteoriten bei Aigospotamoi am Hellespont (468/67 v. u. Z.). Der Mond aber sei eine Erde; er habe Berge und Täler sowie bewohnte Gegenden.

Anaxagoras gebührt das Verdienst, nicht nur die Sonnen-, sondern auch die Mondfinsternisse richtig erklärt zu haben. Auch die Ursache der Nilschwelle, über die damals viel spekuliert worden war, gab er zutreffend an. Er formulierte außerdem eine Vielzahl von Hypothesen zur Erklärung weiterer astronomischer und meteorologischer Erscheinungen, zum Beispiel über die Kometen, die Milchstraße, Mond- und Sonnenwenden, die Neigung der Himmelsachse, den Blitz, den Donner, den Regen, den Schnee, den Hagel, den Regenbogen usw. Trotz ihrer Naivität widerspiegeln die meisten dieser Hypothesen das für Anaxagoras charakteristische progressive Bestreben, alle Erscheinungen konsequent rational zu erklären. Zwischen Himmel und Erde, zwischen Kosmologie und Meteorologie zog Anaxagoras keinerlei Grenzen. Sein Kosmos war einheitlicher Natur, ein irdischer Kosmos; in ihm gab es nichts Göttliches und nichts Übernatürliches. Anaxagoras, der nach den Worten von Marx »zuerst den Himmel physisch erklärte und ihn so in einem anderen Sinne, als Sokrates, auf die Erde herabzog«, soll von sich selbst gesagt haben, er sei »zur Betrachtung der Sonne, des Mondes und des Himmel« geboren.

Zu den sonstigen Eigenheiten in der Physik des Anaxagoras ist noch zu rechnen: der Relativismus des Großen

und des Kleinen, die Idee der unendlich kleinen Größen (im Grunde verwandt der Idee der infinitesimalen Größen in der Mathematik der Neuzeit, mit dem Unterschied jedoch, daß es bei Anaxagoras nicht um mathematische, sondern um physikalische Größen geht) und schließlich die Versuche, einige Gesetzmäßigkeiten der Mechanik qualitativ zu formulieren (»Geschwindigkeit gebiert Kraft«).

Der Biologie schenkte Anaxagoras weniger Aufmerksamkeit als Empedokles. Jedoch sind einzelne seiner Ideen auf diesem Gebiet von Interesse. So lehrte er, daß die Lebewesen aus Samen entstanden seien, die zusammen mit dem Regenwasser auf die Erde herabfielen. Die Pflanzen unterscheiden sich grundsätzlich nicht von den Tieren, sie sind zu Wahrnehmung, Trauer und Freude fähig. Der Mensch sei das klügste Lebewesen, weil er Hände hat. Gefühle entstehen dadurch, daß Gegensätzliches aufeinander einwirke. Der Kontrast dieser Einwirkung bestimme die Intensität der Gefühle; daher sind Gefühle immer relativ und können an und für sich keine Quelle wahrer Erkenntnis sein. Aber ohne sie ist die Erkenntnis auch nicht möglich, denn »das Sichtbare erschließt den Blick in das Unsichtbare«. Diese Aussagen von Anaxagoras bereiteten den Boden für die Erkenntnistheorie des Demokrit.

Es gibt Belege, daß sich Anaxagoras auch mit Mathematik, insbesondere mit der Quadratur des Kreises und der Theorie der Perspektive befaßte. Jedoch verfügen wir über keine detaillierten Informationen über seine Leistungen auf diesem Gebiet.

Das Hauptwerk des Anaxagoras wurde in prosaischer Form verfaßt. In seinem ersten Teil wurden allgemeine Prinzipien formuliert und die kosmogonische Konzeption dargelegt; im folgenden wurden einzelne naturwissenschaftliche Fragen behandelt. Ende des 5., Anfang des 4. Jahrhunderts v. u. Z. galt es als Pflicht eines jeden gebildeten Atheners, dieses Werk zu kennen. Uns wurden etwa zwanzig Auszüge überliefert, die größtenteils aus dem ersten Teil des Werkes stammen.

## **Leukipp und Demokrit**

Leukipp und seinem Schüler Demokrit gebührt das Verdienst, die atomistische Lehre im Alten Griechenland begründet und entwickelt zu haben.

Über die Person des Leukipp geben die Quellen praktisch keine Auskunft; wir kennen nicht einmal seinen Geburtsort, denn sowohl Milet als auch Elea werden als seine Heimat angegeben. So konnte bereits im Altertum die Meinung aufkommen, daß es einen Philosophen Leukipp überhaupt nicht gegeben habe und dieser Name lediglich eine erfundene Gestalt bezeichne oder ein literarisches Pseudonym des Demokrit gewesen sei. Heute wird dieser Standpunkt kaum noch vertreten, denn die ältesten und zuverlässigsten Autoren wie Aristoteles zweifelten nicht an der Existenz des Leukipp, da sie wohl mit seinen Werken, die sie von denen des Demokrit unterschieden, noch vertraut waren.

Über Demokrit wissen wir mehr. Er wurde in Abdera an der Nordküste des Ägäischen Meeres um 460 v. u. Z. geboren und starb 90jährig, also um 370 v. u. Z. Wie Anaxagoras widmete er sich ganz der Wissenschaft, reiste aber im Unterschied zu ihm sehr viel. Es wird von Aufenthalten in Ägypten, Persien und Babylon berichtet, wo er sicherlich aus wissenschaftlichem Interesse weilte und wohl auch mit Priestern, Magiern und Sternkundigen des Orients verkehrte. Als einzigen Lehrer Demokrits nennt die Überlieferung Leukipp.

Es ist sehr schwer, ihre wissenschaftlichen Beiträge voneinander zu trennen, weil beide Atomisten in den Quellenberichten meist gemeinsam genannt werden. In generellen Fragen wie der Atomlehre waren sie offenbar einer Meinung. Mit einiger Sicherheit kann man vermuten, daß von Leukipp die Grundthesen der atomistischen Kosmogonie und Kosmologie stammen. Demokrit entwickelte Leukipps Lehre weiter, indem er sie zu einem umfassenden System ausarbeitete, das auch die Erkenntnistheorie, Logik, Ethik, Pädagogik, Mathematik, Biologie, Psychologie usw. einschloß. Demokrits mit enzyklopädischem Wissen verbundene literarische Fruchtbarkeit, die mit der des Platon und Aristoteles vergleichbar ist, förderte zweifellos seinen Ruhm und könnte den Umstand erklären, daß die Person seines Lehrers schnell verblaßt ist. Leider haben uns Demokrits Werke nur in einigen ganz ärmlichen Splittern erreicht. Deshalb muß seine Lehre hauptsächlich anhand indirekter und nicht immer zuverlässiger Zeugnisse rekonstruiert werden.

Laut Aristoteles hat Leukipp die Atomlehre entworfen, um im Gegensatz zu Parmenides, der das Entstehen und

Vergehen, die Bewegung und die Vielheit der Dinge für unwirklich hielt, im Einklang mit der Sinneswahrnehmung zu bleiben. Gegen die Eleaten postulierte er, daß das Nichtseiende nicht weniger existiere als das Seiende und daß dieses Nichtseiende der leere Raum, das Seiende im eigentlichen Sinn aber das »Volle« sei. Darunter verstand er unteilbare Körperchen, die, unendlich an Zahl und Gestalt, als kleinste Bestandteile aller Dinge bloß wegen ihrer Kleinheit unsichtbar blieben. Diese kleinsten Körper entsprechen insofern dem Begriff des Parmenides vom wahren Sein, als sie selbst unveränderlich, unteilbar und massiv sind. Ihrer wesentlichen Eigenschaft, der Unteilbarkeit, verdanken sie ihren Namen, denn »Atom« (atomos) heißt wörtlich unzer-schneidbar, unteilbar.

Also gibt es nach Leukipp und Demokrit in Wahrheit nur die Atome und den leeren Raum. Leukipp nannte ihn die »große Leere«, die kein Oben und Unten, keine Mitte und keine äußere Grenze habe. Wahrscheinlich führte erst diese Vorstellung vom leeren Raum auch zur Idee der Unendlichkeit des Raums, die solchen Denkern wie Empedokles und Anaxagoras noch ferngelegen hatte. In diesem Raum bewegen sich die Atome planlos, zufällig und ewig; Demokrit verglich sie mit den im Sonnenstrahl tanzenden Stäubchen. Die Atome haben irgendwelche Haken, Ösen u. dgl., so daß sie sich beim Zusammenstoß mehr oder minder fest verbinden können. Bei der Verflechtung einer großen Anzahl kommt es zu Wirbeln, die letztlich zur Entstehung der Welten führen. Dabei bilde sich zuerst die Außenhülle oder Haut, die aus hakenförmigen Atomen zusammengeflochten sei und welche die innerhalb des Wirbels befindlichen Atome am Entweichen hindere, mithin die Stabilität des werdenden Kosmos sichere. Innerhalb dieser Hülle verselbständigen sich verschiedene Arten von Atomen, gleiche verbinden sich mit gleichen, wobei die großen Atome ins Zentrum gelangen und die Erde bilden, während die kleinen nach außen gedrängt werden. Die Schwere sei keine primäre Eigenschaft der Atome und entstehe als sekundärer Effekt im Prozeß der Kosmosbildung. Die Erde habe die Form einer Trommel bzw. einer konkaven Scheibe; anfangs — so lehrte Demokrit — sei sie wegen ihrer Kleinheit und Leichtigkeit unstet umhergetrieben, später aber, als sie dicker und schwerer geworden war, habe sie sich an einem bestimmten Platz festgesetzt.

Die Entstehung der Sonne, des Mondes und der übrigen Gestirne hat man sich nach demselben Prinzip vorzustellen. Sie werden durch die allgemeine Wirbelbewegung mitgerissen und werden in unterschiedlich große Bahnen gebracht. Hinsichtlich ihrer Reihenfolge gehen die Ansichten von Leukipp und Demokrit etwas auseinander. Leukipp nahm an, daß der Mond die kleinste, die Sonne aber (wie in Anaximanders Kosmos) die größte Bahn beschreibt. Demokrit korrigierte dieses Bild, indem er die Fixsterne ganz außen anordnete. Auf eine bestimmte Reihenfolge der Planeten, von denen es möglicherweise mehr als fünf gebe, legte er sich nicht fest.

In astronomischen und meteorologischen Einzelfragen folgte Demokrit zwar vielfach Anaxagoras, aber in der Frage der Vielheit der Welten dachte er ganz anders. Es gebe gleichzeitig nicht nur einen Kosmos im All, und der sei auch kein Muster für die anderen. Manche Welten haben keine Sonne und keinen Mond, in anderen seien Sonne und Mond größer oder in größerer Anzahl vorhanden. Es können auch solche Welten entstehen, die keine Tier- und Pflanzenwelt und keine Feuchtigkeit kennen. Die Welten entstehen in unterschiedlichen Entfernungen voneinander und zu verschiedenen Zeiten, während die einen noch im Werden seien, befinden sich andere, wie unsere, in der Blütezeit oder im Niedergang. Weltuntergänge können durch Zusammenstöße bedingt sein.

Diesem eindrucksvollen und in der Geschichte griechischen Denkens einzigartigen Weltbild lag als wesentliche Voraussetzung die Idee der Notwendigkeit zugrunde. Der einzige erhaltene Auszug aus einer Schrift des Leukipp lautet: »Kein Ding entsteht planlos, sondern alles aus Sinn und unter Notwendigkeit.« Diese Notwendigkeit soll jedoch nicht im Sinne des mechanischen Determinismus der Neuzeit verstanden werden. Der griechische Begriff der Naturnotwendigkeit schließt nämlich jeden göttlichen oder menschlichen Eingriff in das Geschehen aus, insofern es »naturgemäß« ist. Eine große Rolle spielte in Demokrits Schriften die Idee der Kausalität. Von dem Interesse, das er der Ursachenforschung entgegenbrachte, zeugen auch einige Buchtitel: »Ursachenerklärungen zum Himmel«, »Ursachenerklärungen zu den Tieren«, »Vermischte Ursachenerklärungen« usw. Für den Physikhistoriker mag es aufschlußreich sein, daß Demokrit bei der Begründung der Atom-

lehre unter anderem auch auf die Kompressionsfähigkeit der Körper hinwies.

Interessant ist Demokrits Konzeption von der Entstehung des Lebens. Danach hat das Feuchte das Leben hervorgebracht. Auch die Menschen seien ursprünglich aus Wasser und Schlamm entstanden. Kein Schöpfer oder Vernunftgrund spielte bei dieser Urzeugung eine Rolle. Wie Empedokles vermutete Demokrit, daß dabei auch Mißgebilde und Ungeheuer entstanden, die sich aber als lebens- und fortpflanzungsunfähig erwiesen und daher ausstarben. Jene jedoch, die überlebten, pflanzten sich mittels Paarung fort. Je nach Unterschiedlichkeit der Atome, die die Körper dieser Wesen bildeten, begannen die einen zu fliegen, die anderen im Wasser zu schwimmen, die dritten das Festland zu bewohnen. Dem Menschen wurden mehr Wärme und mehr kleine runde Atome zuteil als den anderen Organismen. Deshalb geht der Mensch aufrecht und berührt die Erde nur mit seinen zwei Füßen.

Die Seele besteht nach Demokrit aus den kleinen völlig glatten und sehr beweglichen Feueratomen. Eine Seele haben nicht nur die Menschen und Tiere, sondern auch die Pflanzen. Sie durchdringt den ganzen Körper und gibt ihm die Fähigkeit, sich zu bewegen, sinnlich wahrzunehmen, Gefühle zu haben und zu denken. Der leitende Seelenteil habe seinen Platz im Gehirn. Die Seele bleibt im Körper und vergrößert sich durch das Atmen, aber sie stirbt zusammen mit dem Körper und zerstreut sich dann im Raum. Die Seelenatome schweben überall in der Luft; wenn sie sich vereinigen, bilden sie eine Flamme, wenn sie in den Körper gelangen, gesellen sie sich zu der Seele des betreffenden Lebewesens.

Demokrits Theorie der Sinneswahrnehmung benutzt die Vorstellung von »Bildern« (eidōla), die auf die Sinnesorgane einströmen. Demokrit nahm an, daß sich von jedem Körper ständig ganz dünne Atomschichten ablösen und sich mit hoher Geschwindigkeit in alle Richtungen bewegen; sie erreichen die Augen und andere Sinnesorgane und wirken dort auf die ihnen ähnlichen Atome ein. Diese Wirkung teilt sich den Seelenatomen mit. Die Wahrnehmungen sind also durch Berührung bedingte Eindrücke der »Bild«-Atome. So werde zum Beispiel der Sinnesindruck der weißen Farbe durch glatte Atome, der der schwarzen Farbe durch rauhe Atome verursacht. Wenn aber diese glatten

Atome, die im Auge die Empfindung der weißen Farbe ausgelöst haben, auf die Zunge geraten, dann werden sie hier die Empfindung der Süße, in der Nase aber die Empfindung des Wohlgeruchs auslösen.

Als Sohn seiner Zeit verneinte Demokrit die Existenz der Götter nicht. Die Götter bestehen, wie auch alle sonstigen Dinge, aus Atomen und sind darum nicht unsterblich, doch sind dies sehr beständige Atomverbindungen und unseren Sinnesorganen nicht zugänglich. Bei Wunsch jedoch lassen die Götter durch Gestalten von sich wissen, die von uns meistens im Schlaf wahrgenommen werden. Diese Gestalten können uns Schaden oder Nutzen bringen, manchmal reden sie mit uns und prophezeien die Zukunft. Damit hat Demokrit sogar die Mantik und andere ähnliche Vorurteile mittels der atomistischen Lehre begründet.

Seine Erkenntnislehre geht ebenfalls von der Atomistik aus. Da das Wirkliche unter den Dingen letztlich nur die Atome und das Leere seien, existieren die Sinnesqualitäten süß und bitter, warm und kalt sowie die Farben nur nach der herkömmlichen Meinung, nicht aber in Wirklichkeit. Die Sinne sind trügerisch und vermitteln kein adäquates Bild von der Welt; die Wahrheit liege nämlich in der Tiefe. Andererseits kann aber die Sinneswahrnehmung nicht als bloßer Schein verworfen werden, weil sie Ausgangspunkt auf dem Weg zur Erkenntnis der Wahrheit ist. Es gilt also nach Demokrit, nicht bei der »dunklen« Erkenntnis der Sinne stehenzubleiben, sondern zur »echten« Erkenntnis vorzudringen, die nur durch das Denken möglich sei.

Von Demokrits Interesse auch an mathematischen Fragen zeugen die überlieferten Buchtitel »Über die Zahlen«, »Über die Berührung von Kreis und Kugel«, »Über die Geometrie«, »Über nichtrationale Linien« u. a. Wie Archimedes mitteilt, fand Demokrit als erster den Satz, daß die Rauminhalte von Kegel und Pyramide ein Drittel der Körper mit gleicher Grundfläche und Höhe betragen; den mathematischen Beweis dieses Satzes habe jedoch erst Eudoxos gefunden. In dem einzigen erhaltenen Fragment einer mathematischen Schrift stellte er die interessante Überlegung an, ob die bei einem Schnitt durch einen Kegel parallel zur Grundfläche entstehenden Schnittflächen gleich oder ungleich seien. Nach der besonders von S. Luria vertretenen Interpretation wendete Demokrit die atomistische Denkweise auch in der Geometrie an, denn aus der Sicht des

Atomisten war die Annahme gleich großer Schnittflächen einfach widersinnig; der Kegel müßte sonst ein Zylinder sein!

Die weitere Entwicklung der griechischen Mathematik vollzog sich aber über die Untersuchung der kontinuierlichen, d. h. unbegrenzt teilbaren Größen. Die in physikalischer Hinsicht äußerst fruchtbare Atomistik war nicht als Grundlage der Mathematik geeignet. Die »atomistische« Denkweise in der Mathematik war allenfalls von heuristischem Wert bei der Ausarbeitung von Näherungsverfahren, die die modernen Methoden der Integralrechnung vorbereiten halfen.

Auf die ethischen, politischen und pädagogischen Anschauungen des Demokrit kann hier nicht eingegangen werden. Doch das bereits Gesagte genügt, um den großen Beitrag Demokrits zur Entwicklung des wissenschaftlichen Denkens gebührend würdigen zu können, eines Mannes, der es verstand, die Erscheinungen aus einem gemeinsamen natürlichen Grund zu erklären.

### **Einzelne Wissensgebiete im 6./5. Jahrhundert v. u. Z.**

Neben den umfassenden Systemen über die Natur des Seienden gab es im 6./5. Jahrhundert v. u. Z. auch einige speziellere Wissensgebiete, die sich entweder von Anfang an selbständig entwickelten oder sich allmählich von der philosophisch-kosmologischen Hauptrichtung abtrennten.

Ein besonderer Zweig, der fast gleichzeitig mit der Naturlehre entstand, ist die historisch-geographische Beschreibung auf der Grundlage von Volkssagen, eigenen Beobachtungen, Berichten und Aufzeichnungen von Reisenden. Die Verfasser dieser Beschreibungen bedienten sich einer nüchternen, ungebundenen Sprache, deshalb wurden sie später allgemein als Logographen bezeichnet. Zu den ersten Logographen zählt die Tradition den Milesier Hekataios, der in der zweiten Hälfte des 6. Jahrhunderts v. u. Z. lebte. Von ihm wissen wir, daß er eine »Rundreise« und vier Bücher »Genealogien« (Stammbäume der Adelsgeschlechter) verfaßt hat, von denen uns einige Auszüge überliefert wurden. In erster Linie interessiert hier die »Rundreise«, in der die damals bekannte Ökumene (der bewohnte Erdkreis) in

zwei Europa und Asien gewidmeten Teilen behandelt wird. Dem Beispiel Anaximanders folgend, fügte Hekataios eine Karte bei, die die Erdoberfläche als vom Ozean umspülte Scheibe mit dem Zentrum im Ägäischen Meer darstellt. Alle großen Flüsse, Donau, Nil, Phasis (Rion), fließen aus dem Ozean heraus (Abb. 1). Diese geometrisch-schemati-

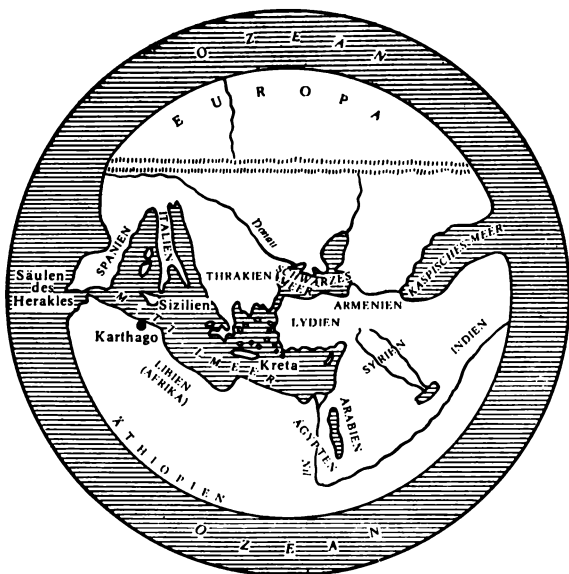


Abb. 1. weltkarte nach Hekataios

sche Art des Kartenzeichnens wurde später oft kritisiert, doch diente sie durchaus einer ersten Orientierung.

Im 5. Jahrhundert v. u. Z. gab es in vielen Gebieten Griechenlands Logographen, die Überlieferungen, Bräuche und Ereignisse des betreffenden Volkes oder Staates aufzeichneten. Die bekanntesten sind Akusilaos von Argos und Hellanikos von Mytilene. Eine Gesamtbeurteilung solcher Literatur gibt Dionysios von Halikarnassos (Ende des 1. Jahrhunderts v. u. Z.). Er läßt sich über Schriften aus, die seinerzeit noch gern gelesen wurden dank ihres unterhaltenden Charakters; es handelte sich wohl zumeist um eine Art Sammlung von Kuriositäten. In der Kritik seiner Vor-

gänger betont der wegen seiner »Geschichte des Peloponnesischen Krieges« berühmte Thukydides (um 460—396 v. u. Z.), daß diese Schriftsteller eher nach dem Beifall des Publikums strebten als nach historischer Wahrheit. Die Logographen pflegten ihre Werke gegen Honorar vorzulesen, ähnlich wie die Rhapsoden ihre epischen Dichtungen zur Unterhaltung darboten.

Höhepunkt der Entwicklung dieser historisch-geographischen Literatur sind die berühmten neun Bücher des Herodot aus Halikarnassos (um 484—425 v. u. Z.), der oft als »Vater der Geschichtsschreibung« bezeichnet wird. Tatsächlich ist sein umfassendes Werk für uns das erste klassische Denkmal der Historiographie. Aber neben rein historischem Material enthalten seine Bücher eine Fülle wertvoller Informationen über fremde Länder und über die dort lebenden Völker, einschließlich ihrer Lebensweise, Sitten und Bräuche, ihres religiösen Glaubens usw. Im großen und ganzen kann man sich nach Herodots Büchern ein ziemlich genaues Bild vom geographischen und ethnographischen Horizont der Griechen in der Mitte des 5. Jahrhunderts v. u. Z. machen.

Herodot kannte die Gebiete um das Mittelmeer und um das Schwarze Meer sehr gut. Von ferneren Ländern hatte er jedoch nur recht vage Vorstellungen. So wußte er zwar von der Existenz Indiens; es sei voller Wunder und Reichtümer; aber dahinter komme nur noch Sand und Wüste. Während Herodot ziemlich vollständige und genaue Angaben über die Skythen an der Schwarzmeerküste zwischen Donau und Don macht, sind seine Mitteilungen über die nördlich der Skythen lebenden Stämme verworren und unglaubwürdig. Ebenso gehört fast alles, was von Arabien verlautet, in den Bereich der Legende. Andererseits beruhen seine Beschreibungen Persiens und Ägyptens teils auf eigenen Beobachtungen, teils auf Informationen aus erster Hand, so daß sie lange als die maßgebliche Informationsquelle gelten durften. Das afrikanische Territorium westlich von Ägypten (Libyen) teilte Herodot in zwei Zonen; in ein Land der wilden Tiere und in eine unfruchtbare Wüste unbekanntem Ausmaßes.

Historiographie und Geographie trennen sich bald nach Herodot. Thukydides, Ephoros und Theopompos sind bereits reine Historiker. Auf die weitere Entwicklung der Geographie wird noch eingegangen werden.

Die Medizin kann aufgrund ihrer vordergründig praktischen Orientierung nur bedingt als Wissenschaft gelten. Im Altertum zählte sie zu den »Künsten« und war ursprünglich eng mit Magie und Zauberei verbunden. In der von uns betrachteten Epoche hatte die griechische Heilkunst durchaus schon rationalen Charakter und förderte durch ihr empirisches Vorgehen die Entwicklung wissenschaftlicher Forschungsmethoden erheblich.

Frühe Zeugnisse medizinischen Wissens finden sich in den Epen Homers. Aus der »Ilias« geht hervor, wie die »Militärchirurgen« auf dem Schlachtfeld von Troja wirkten, und welche hohen anatomischen Kenntnisse, chirurgische Fertigkeiten und Geschick bei der Zubereitung und Anwendung schmerzlindernder und wundheilender Pharmaka (meist pflanzlicher Herkunft) man schon für diese Zeit voraussetzen muß. Darüber hinaus gibt es vor allem in der »Odyssee« Hinweise auf Elemente ritueller Magie und ihrer Verbindungen mit der ägyptischen Heilkunst. Der am Anfang dieses Kapitels behandelte Physis-Begriff taucht erstmalig bei Homer auf: er gehörte offenbar bereits damals zur medizinischen Terminologie!

Im 6./5. Jahrhundert v. u. Z. gab es in Griechenland mehrere berühmte Ärzteschulen. Vertreter der sogenannten westgriechischen Heilkunde, die sich in Süditalien und Sizilien herausbildete, waren der von Herodot erwähnte Demokedes, Hofarzt des persischen Königs, und Alkmaion, auf den im nächsten Abschnitt eingegangen wird. Hierzu zählt der auch als Arzt erfolgreiche Philosoph Empedokles. Die Schule von Knidos setzte die empirischen Traditionen der ägyptischen und babylonischen Ärzte fort, indem sie Komplexe von Krankheitssymptomen detailliert beschrieb und für jede Krankheit eine Therapie entwickelte, die mit komplizierten Rezepturen, Diätvorschriften und verschiedenen anderen Mitteln, wie dem Ausbrennen, arbeiteten. Die Schriften dieser Ärzte sind uns nicht überliefert worden, doch scheinen einzelne Fragmente in einige Traktate des Hippokrates eingegangen zu sein. Ärzteschulen soll es auch in Rhodos und Kyrene gegeben haben. Über sie wissen wir allerdings so gut wie nichts.

Einen besonderen Platz in der Geschichte der frühgriechischen Wissenschaft nimmt der Arzt und Philosoph Alkmaion von Kroton (um 500 v. u. Z.) ein. Er stand den Pythagoreern nahe und vertrat Ansichten, die in der Tradition

der damaligen Naturlehre standen. Seine Bedeutung liegt jedoch vor allem darin, daß er in gewissem Maße die experimentelle Physiologie und Anatomie vorbereitete. Er soll als erster Tiere seziiert haben, um Aufschlüsse über den Aufbau und die Funktion einzelner Organe zu erhalten. Nachdem Alkmaion das Gehirn als das wichtigste Organ des Menschen und den Sitz der Seele erkannt hatte, entwickelte er eine Theorie der Sinneswahrnehmung, die durch Theophrast überliefert ist. Er soll auch die Nervenverbindung zwischen den Sinnesorganen und dem Gehirn entdeckt haben.

Besonders bedeutsam für die spätere medizinische Konzeption war Alkmaions Gesundheitslehre, der die Idee des Gleichgewichts entgegengesetzter »Kräfte« wie warm und kalt, trocken und feucht, süß und bitter zugrunde lag. Die Erkrankung des Organismus wird nach Alkmaions Auffassung durch eine Störung dieses Gleichgewichts verursacht.

Den größten Ruhm erlangte bereits im Altertum die kosische Ärzteschule, die mit Hippokrates von Kos (um 460—370 v. u. Z.) untrennbar verbunden ist. Die 58 im sogenannten Corpus Hippocraticum zusammengefaßten Schriften waren äußerst verschiedenartig, und man darf annehmen, daß Hippokrates nur einige davon verfaßt hat, die restlichen jedoch von seinen Schülern und Nachfolgern stammen dürften. Im ganzen vermittelt das »Corpus« ein recht komplettes Bild der medizinischen Theorie und Praxis im 5. und 4. Jahrhundert v. u. Z.

Das Hauptcharakteristikum der hippokratischen Medizin ist ihr strenger Rationalismus, der als eine bewußt durchgesetzte Tendenz auftritt. In diesem Zusammenhang ist der Aufsatz »Von der heiligen Krankheit« sehr bezeichnend, in dem die traditionelle Meinung über die Epilepsie als besondere Krankheit göttlichen Ursprungs widerlegt wird. Der Autor dieses Traktats verteidigt die These, daß alle Krankheiten, auch die Epilepsie, von natürlichen Ursachen ausgelöst werden, die zu klären und zu untersuchen sind, um richtige und effektive Methoden ihrer Heilung auszuarbeiten. Das Traktat enthält eine scharfe Polemik gegen jene, die zur Heilung von Krankheiten Beschwörungen und Methoden der religiös-mystischen Reinigung heranzogen. Wahrscheinlich richtete sich diese Polemik in erster Linie gegen Ärzte der westgriechischen Schule.

Das zweite Charakteristikum der hippokratischen Medizin besteht in der Forderung, jeden einzelnen Fall zu studieren, um die Besonderheiten des Patienten und seiner Lebensumstände bei der Behandlung berücksichtigen zu können. Dabei bedienten sich die Hippokratiker weitgehend des Physis-Begriffes, den sie sehr breit faßten. Zunächst einmal bedeutet Physis die Gesamtheit der Besonderheiten der körperlichen und geistigen Verfassung, die durch die Herkunft des Patienten, durch Vererbung und die Einwirkung der Umwelt bedingt sind. Um einen Kranken heilen zu können, muß sich der Arzt über dessen individuelle »Natur« klarwerden und solche Heilmethoden und Arzneien anwenden, die damit harmonieren. Dabei muß man die »Natur« sowohl des Organismus im ganzen als auch seiner einzelnen Organe berücksichtigen. Ferner hat jede Krankheit ihre eigene »Natur«, die der Arzt kennen muß, um den Krankheitsverlauf in die für den Patienten günstige Richtung lenken zu können. Schließlich muß die Natur des natürlichen Umfeldes, in dem der Kranke lebt, genutzt werden: die Besonderheiten des Klimas, der Charakter der Winde, die Eigenschaften des Wassers und dgl. In der Schrift »Über Luft-, Wasser- und Ortsverhältnisse«, die zu den ältesten Teilen des »Corpus Hippocraticum« zählt, wird der Einfluß dieser natürlichen Faktoren auf die »Natur« der örtlichen Bewohner und den Charakter ihrer Krankheiten beschrieben. Der wichtigste Ratschlag, der dem wandernden Arzt (Hippokrates war wahrscheinlich wandernder Arzt) in diesem Buch gegeben wird, besteht darin, daß man an jedem neuen Ort als erstes die natürlichen Faktoren studieren muß, um ihre schädliche Wirkung zu kennen und ihre heilende Kraft nutzen zu können.

Die Medizin in der Epoche des Hippokrates verfügte natürlich noch nicht über eine feste Grundlage in der Form der wissenschaftlichen Physiologie. Die Vorstellungen der Hippokratiker von den Funktionen des menschlichen Organismus waren sehr naiv und widersprüchlich. Zugleich zeigen einige Schriften verstärkt die Tendenz der Suche nach einem festeren Fundament der ärztlichen Praxis. So wehrt sich der Autor des Traktats »Über die alte Medizin« gegen den Einzug zeitgenössischer philosophischer Konzeptionen (beispielsweise der Lehre von den vier Elementen des Empedokles) in die Medizin, indem er diesen die Humoralpathologie entgegensetzt, zu der sich die alten Ärzte bekannt

haben sollen und die die Erkrankungen auf eine Störung des Gleichgewichtszustands zwischen den »Körpersäften« (chymoi) zurückführt, die die Lebensfunktion des Organismus bestimmen. Jedoch herrschte in bezug auf die Zahl und die Beschaffenheit dieser Säfte unter den Hippokratikern keine Einmütigkeit, einige Bücher weisen als solche Säfte Schleim und Galle aus, andere Blut, Schleim, Wasser, Galle, wieder andere Blut, Schleim, gelbe und schwarze Galle (ein Standpunkt, der sich später allgemein durchsetzte und die Grundlage für die Lehre von den vier Temperamenten lieferte). Schließlich wird im Traktat »Über die Winde« als Hauptagens, das den Zustand des Organismus bestimmt, das Pneuma (d.h. die Luft) genannt. Insgesamt ist für die hippokratische Medizin die Ablehnung übermäßigen Theoretisierens und Betonens der Empirie charakteristisch; damit hätten wir das dritte Hauptcharakteristikum der hippokratischen Medizin, das sich für die Entwicklung der Methoden der wissenschaftlichen Naturforschung als besonders fruchtbar erwies.

Die Krankengeschichten, die in einigen Traktaten des »Corpus« angeführt werden, faszinieren in der Genauigkeit und Objektivität ihrer Beschreibung. Wir führen zwei Beispiele aus dem III. Buch der »Epidemien« an; sie enden lakonisch mit der Diagnose.

»Die Patientin, die im Hause des Aristions lag, war an der Halsbräune (Diphtherie) erkrankt, die zuerst an der Zunge anfang. Ihre Stimme war undeutlich, Zunge rot, ausgetrocknet. Am ersten Tage in Frostschauern, wurde dann wieder warm. Am dritten Schüttelfrost, hohes Fieber. Rötliche Anschwellung, Versteifung des Nackens, die sich auf die Brust nach beiden Seiten ausdehnte. Kalte Hände und Füße, bläulich. Hochgehender Atem. Getränk kam durch die Nase zurück. Konnte nicht schlucken. Stocken von Stuhl und Urin. Am vierten allgemeine Verschlimmerung. Starb am fünften Tag an der Halsbräune.«

»Der junge Mensch, der am Lügnermarkt darniederlag, bekam eine fieberhafte Erkrankung infolge von Überanstrengung, Beschwerden und Wettlaufen gegen seine Gewohnheit. Am ersten Tag der Unterleib in Unordnung mit viel gallenartigem dünnem Stuhl. Urin dünn, schwärzlich. Kein Schlaf. Durstig. Am zweiten allgemeine Verschlimmerung. Häufiger Durchfall, mehr zur Unzeit. Kein Schlaf. Das Denken verwirrt. Leichter Schweiß. Am dritten Tag

Unbehagen. Durstig. Übelkeit. Viel Hin- und Herwerfen auf seinem Lager. Angstvoller Zustand. Irresein. Hände und Füße bläulich und kalt. Leichte Spannung der Rippenweichen auf beiden Seiten. Am vierten kein Schlaf, es ging zum schlechteren. Am siebten starb er, etwa zwanzig Jahre alt.«

Nichts in der Art dieser Beschreibungen läßt sich in der europäischen medizinischen Literatur bis in das 16. Jahrhundert hinein finden. Jede Beschreibung ist eine nüchterne Aufzählung der Symptome; nur in seltenen Fällen wird über die eingeleitete Behandlung berichtet. Es ist charakteristisch, daß 25 der 42 in den »Epidemien« beschriebenen Krankengeschichten letalen Ausgang hatten; dem Autor ging es also nicht um Werbung für seine Kunst.

In anderen Büchern des »Corpus« werden ärztliche Maßnahmen detailliert beschrieben. In dieser Hinsicht ist die Schrift »Über die inneren Leiden«, vermutlich unter starkem Einfluß der knidischen Ärzteschule abgefaßt, sehr interessant. Jedes Kapitel des Traktats enthält eine kurze Beschreibung der Ursachen und Symptome der betreffenden Krankheit mit Hinweisen für ihre Heilung. Die empfohlenen Mittel und Rezepturen werden ausführlich beschrieben, Vorschriften für Diät und Tagesablauf des Kranken sowie eine Prognose gegeben.

Besondere Popularität hatte bis in die Neuzeit die Schrift »Über die Knochenbrüche«, die gewöhnlich Hippokrates selbst zugeschrieben wird. Auch hier richtet sich die Polemik gegen die Unwissenheit und Scharlatanerie vieler zeitgenössischer Heilpraktiker und betrachtet danach verschiedene Arten von Knochenbrüchen und Verrenkungen. In jedem Fall fügt er eine detaillierte Beschreibung der Heilmethoden hinzu; auf theoretische Spekulationen verzichtet das Traktat gänzlich.

Das Studium einzelner Aufsätze des »Corpus« von Hippokrates zeigt, daß das anatomische Wissen im Griechenland jener Zeit ein höheres Niveau erreicht hatte als in den Ländern des Alten Orients oder in der Epoche von Homer. Besonders gut wurde das Skelett erforscht. Die wichtigsten inneren Organe waren ebenfalls bekannt, wenn man auch über ihren Aufbau im einzelnen wenig wußte, was auf das im Alten Griechenland gültige Verbot der Obduktion zurückzuführen ist. Über die Funktionen des Gehirns werden widersprüchliche Meinungen geäußert. Manche Traktate be-

trachten das Gehirn als eine Drüse, die den Organismus von der überflüssigen Flüssigkeit befreit, als ein Organ, das Samen produziert, und nur in der Schrift »Über die heilige Krankheit« wird vermutet, daß mit dem Gehirn nicht nur das Denken, die Empfindungen, die Emotionen, die Träume (dieser Gedanke wurde bereits von Alkmaion vertreten), sondern auch die Geisteskrankheiten verbunden sind.

Die embryologischen Vorstellungen der Hippokratiker sind uns aus dem Buch »Über den Samen und die Natur des Kindes« bekannt. Die grundsätzlichen Thesen des Autors gehen nicht über das hinaus, was die Vorsokratiker, insbesondere Demokrit, zu dieser Frage schrieben: Der Samen entstehe aus allen Teilen des väterlichen und mütterlichen Körpers; von der »Kraft« und dem quantitativen Übergewicht des männlichen oder weiblichen Samens hänge ab, ob das Kind ein Junge oder ein Mädchen wird sowie die Ähnlichkeit mit einem Elternteil. Außerdem enthält das Traktat interessante Beobachtungen über die Entwicklung des frühen menschlichen Embryos. Analogien zwischen der Entwicklung des Menschen und der Entwicklung der Pflanzen und Tiere (Kücken) werden hergestellt.

Abschließend sei betont, daß Hippokrates die Formulierung der Grundsätze ärztliche Ethik zugeschrieben wird. Der »Eid des Hippokrates« hat bis heute kaum an Bedeutung verloren.

Als die griechische Naturlehre entstand, verfügten die Griechen gewiß über bestimmte mathematische Kenntnisse, die aber an praktische Aufgabenstellungen gebunden waren und noch kein theoretisches Anliegen verfolgten. Es handelte sich um die Kunst, mehr oder weniger genau Flächen und Volumina zu berechnen und eventuell auch andere Berechnungsaufgaben aus Handel und Handwerk zu lösen. Wie der Aristotelesschüler Eudemos berichtet, hat Thales als erster einigen elementaren geometrischen Verhältnissen ein theoretisches Interesse entgegengebracht. Aber selbst wenn das zutrifft, blieb er darin zunächst eine Ausnahme, denn keiner der folgenden ionischen Denker scheint sich ernstlich mit Mathematik befaßt zu haben. Deshalb muß man denjenigen zustimmen, die meinen, das Verdienst, die Mathematik als Theorie ausgeprägt zu haben, komme in der Hauptsache der pythagoreischen Schule zu.

Das geschah gewiß nicht über Nacht und war kaum allein das Werk des Pythagoras. In den frühen Etappen der

Entwicklung der pythagoreischen Schule war das Interesse für die Zahl religiös-mystisch geprägt. Den Zahlen — insbesondere den ersten zehn — wurden übernatürliche Eigenschaften angedichtet. Sie waren keine Zahlen schlechthin, sondern machten das Wesen der Umwelt aus, denn die ganze Vielfalt aller Dinge und Erscheinungen läuft auf zahlenmäßige Beziehungen hinaus. Eine solche Sicht der Zahl barg äußerst wichtige Konsequenzen in sich. Die Zahlen, die früher zur Sphäre des Handwerks und der praktischen Tätigkeit gehörten, erlangten bei den Pythagoreern den höchsten ontologischen Rang. Die Pythagoreer studierten die Zahlen nicht etwa, weil sie diese Studien für anderweitige Belange benötigten, sondern weil sie nichts für würdiger befanden als das Studium der Zahlen.

In Ermangelung von schriftlichen Belegen läßt sich die Reihenfolge der Entdeckungen der pythagoreischen Schule nicht zuverlässig rekonstruieren. Von den Pythagoreern wurden die Gegensatzpaare Einheit — Vielheit, gerade — ungerade eingeführt. Der Einteilung der Zahlen nach geraden und ungeradenmaßen sie eine besondere Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang wurde das Problem der Teilbarkeit durch 2 (eine entsprechende Theorie wurde von Euklid im Buch IX seiner »Elemente« rekonstruiert) sorgfältig untersucht. Dann wurde man darauf aufmerksam, daß einige Zahlen (die Primzahlen) nur durch sich selber teilbar sind, andere dagegen als Produkt von zwei oder mehr Faktoren dargestellt werden können. Die Primzahlen bezeichneten die Pythagoreer als »linear«; die das Produkt von zwei oder drei einfachen Faktoren darstellenden Zahlen nannten sie »flach« oder »körperlich«.

Des weiteren wurden aus der natürlichen Reihe der Zahlen die Reihen der »Dreieck-«, »Quadrat-«, »Fünfeckzahlen« usw. herausgehoben. Der Sinn dieser Bezeichnungen wird aus der Abb. 2 klar, auf der geometrische Konfigurationen angeführt sind, die die Gewinnung entsprechender Reihen ermöglichen. Mittels analoger räumlicher Figuren erhielten die Pythagoreer auch »Würfel-«, »Pyramidenzahlen« und dgl.

Die weitere Behandlung der Frage der Teilbarkeit der ganzen Zahlen führte die Pythagoreer zu der Idee der rationalen Brüche. Im 5. Jahrhundert v. u. Z. lernten die Griechen, mit Brüchen des Typs  $m/n$  zu operieren (die Ägypter konnten dagegen nur mit Stammbrüchen rechnen) und da-

mit alle vier Rechenarten auszuführen — mit der Einschränkung, daß man von einer größeren Zahl nur eine kleinere abziehen kann. Die Mathematikhistoriker vermuten, daß Ende des 5. Jahrhunderts v. u. Z. in Griechenland bereits eine allgemeine Theorie der Teilbarkeit aufgestellt wurde, die auch die Theorie der Teilbarkeit durch 2 als Sonderfall enthielt. Später ging diese Theorie in das Buch VII des Euklid ein.

Mit der Entwicklung der Arithmetik ging auch die Entwicklung der Geometrie einher. Hier ist aber die Information, über die wir verfügen, noch geringer. Die Pythagoreer

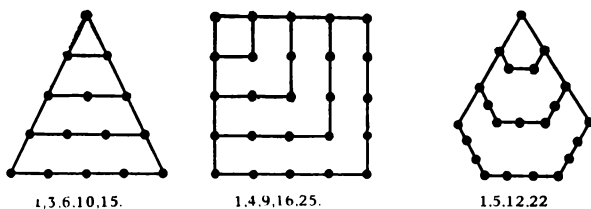


Abb. 2. Die Dreieck-, Quadrat- und Fünfeckzahlen

interessierten sich vor allem für die Eigenschaften der Figuren (der Dreiecke, der Quadrate usw.), die sich durch zahlenmäßige Verhältnisse ausdrücken lassen. Unter diesem Blickwinkel rief auch die Beziehung zwischen den Seiten eines rechtwinkligen Dreiecks besonderes Interesse hervor, was in dem Satz des Pythagoras Gestalt annahm. Allerdings wissen wir nicht, auf welche Weise und wann dieses Theorem bewiesen wurde; die Beweisführung, die wir in den »Elementen« von Euklid vorfinden, ist späteren Datums.

Ungefähr um die Mitte des 5. Jahrhunderts v. u. Z. entdeckte man die Existenz inkommensurabler Strecken, also solcher Strecken, deren Verhältnis sich nicht als Verhältnis ganzer Zahlen ausdrücken läßt; zum Beispiel stehen Seite und Diagonale eines Quadrats in keinem solchen rationalen Verhältnis. Man nimmt an, daß diese Entdeckung von dem Pythagoreer Hippasos von Metapont gemacht wurde. Mit seinem Namen sind Legenden verbunden, auf deren Erzählung wir hier verzichten möchten. Wir wissen nicht, auf welchem Weg Hippasos zu seiner Entdeckung kam; diesbezüglich haben die Forscher der antiken Mathematik verschiedene Hypothesen aufgestellt.

Die Entdeckung der Inkommensurabilität bzw. Irrationalität wurde zum Wendepunkt in der Geschichte der griechischen Mathematik; in ihrer Bedeutung für jene Zeit kann sie mit der Entdeckung der nichteuklidischen Geometrien im 19. Jahrhundert verglichen werden. Sie bedeutete den Zusammenbruch der frühen pythagoreischen Vorstellungen, daß sich die Verhältnisse beliebiger Größen durch Verhältnisse ganzer Zahlen ausdrücken lassen. Von der Resonanz, die diese Entdeckung in den gebildeten Kreisen der griechischen Gesellschaft fand, zeugen Schriften von Platon und Aristoteles, in denen die Frage der Unvergleichbarkeit diskutiert wird. Der Pythagoreer Theodoros aus Kyrene (zweite Hälfte des 5. Jahrhunderts v. u. Z.) bewies, daß die Seiten der Quadrate mit den Flächen 3, 5, 6, 7, ..., 17 mit einer Seite des Einheitsquadrats unvergleichbar sind. Theodoros' Schüler Theaitetos, Zeitgenosse und Freund Platons, stellte die erste allgemeine Lehre über irrationale Größen auf. Zunächst zeigte er, daß, wenn die Fläche eines Quadrats durch eine ganze Zahl  $n$  ausgedrückt wird, die nicht die Quadratzahl einer anderen ganzen Zahl ist, seine Seite immer mit der des Einheitsquadrats inkommensurabel sein wird. Weiter dehnte Theaitetos die Beweisführung der Irrationalität auf Zahlen des Typs  $\sqrt[3]{N}$  aus (wo  $N$  nicht die dritte Potenz einer anderen ganzen Zahl ist),  $\sqrt{N} + \sqrt{M}$  und  $N + \sqrt{M}$  (die sogenannten »Binomen«),  $\sqrt{N} - \sqrt{M}$ ,  $N - \sqrt{M}$  und  $\sqrt{N - M}$  (»Apotome«) und  $\sqrt{\sqrt{N} \cdot \sqrt{M}}$  (»Mediale«). Die Ergebnisse von Theaitetos sind im Buch X der »Elemente« des Euklid enthalten.

Die Entdeckung inkommensurabler Strecken und irrationaler (»unvernünftiger«) Größen hat die griechischen Mathematiker mit einem sehr wichtigen Problem konfrontiert. Wie mochte der Ausweg aus der Sackgasse sein, in die sich die Mathematik durch diese Entdeckung hineinmanövriert hatte? Ein möglicher Ausweg war jener, den die Mathematik der Neuzeit beschritten hat — der Weg der Generalisierung des Begriffs der Zahl und der Einbeziehung einer breiteren Klasse von mathematischen, sowohl rationalen als auch irrationalen Größen in diesen Begriff. So hätten die Griechen mit der Entwicklung rein analytischer Methoden der Lösung von mathematischen Aufgaben beginnen können. Aber dazu waren sie noch nicht vorbereitet (in der griechischen Mathematik existierte zu jener Zeit weder der

Begriff der Null noch der Begriff negativer Größen). Deshalb haben die Griechen einen anderen Weg gewählt — den der Geometrisierung der Mathematik. Als Ergebnis entstand die geometrische Algebra, die es ermöglichte, mittels anschaulicher geometrischer Gestalten rein algebraische Aufgaben zu lösen; über den Charakter der geometrischen Algebra können wir uns nach dem Buch II des Euklid sowie nach den Werken von Archimedes und Apollonios ein Urteil bilden. Der Grundstein für diese Disziplin, die ein typischer Sprößling des hellenischen Geistes war, wurde in der zweiten Hälfte des 5. Jahrhunderts v. u. Z. gelegt; sie gründete sich auf der antiken Planimetrie, die eine Geometrie des Zirkels und des Lineals war und sich für die Lösung von quadratischen Gleichungen und einigen anderen Klassen von algebraischen Aufgaben eignete. Jedoch waren ihre Möglichkeiten begrenzt, und im weiteren entpuppte sich die griechische geometrische Algebra als Hemmschuh auf dem Weg einer freien Entwicklung des mathematischen Denkens im Altertum.

Im Zuge der Ausarbeitung der geometrischen Algebra entwickelten die griechischen Mathematiker die Theorie der Proportionen, die sie für Operationen mit inkommensurablen Strecken anwendeten. Dabei wurde eine neue Definition der Proportionalität formuliert, die sich sowohl für rationale als auch für irrationale Größen anwenden ließ. Mit der Theorie der Proportionen befaßten sich Hippasos von Metapont, Hippokrates aus Chios, Archytas von Tarent u. a.

Ihre Vollendung fand die Theorie der Proportionen in der allgemeinen Theorie der Verhältnisse, die von dem größten Mathematiker des 4. Jahrhunderts v. u. Z., Eudoxos von Knidos, entwickelt wurde. Von ihnen wird im nächsten Kapitel die Rede sein.

Was die reine Geometrie anbelangt, so wurde am Anfang des 4. Jahrhunderts v. u. Z. der logische Aufbau der Planimetrie, die die Theorie der Parallelen, die Bestimmung der Winkelsummen des Dreiecks und der Flächen der Vielecke, den Satz des Pythagoras, die Theorie der Bögen und Sehnen im Kreis, die Konstruktion regelmäßiger Vielecke und die Berechnung der Kreisfläche einschloß, weitgehend abgeschlossen. Die erste systematische Darlegung der Geometrie lieferte Hippokrates von Chios. Von den Leistungen des Hippokrates fanden die sogenannten Mönchen des Hippokrates die weiteste Verbreitung.

Neben der Planimetrie entwickelte sich im 5. Jahrhundert v. u. Z. auch die Stereometrie. Während den frühen Pythagoreern nur drei reguläre Polyeder bekannt waren — das Tetraeder, der Würfel und das Dodekaeder —, kamen später noch zwei dazu — das Oktaeder und das Ikosaeder. Und im 4. Jahrhundert v. u. Z. begründete Theaitetos bereits die allgemeine Theorie der regulären Polyeder. Es wurde schon erwähnt, daß man die Entdeckung der Formel für das Volumen des Kegels und der Pyramide Demokrit zuschreibt. Im Zusammenhang mit der Entwicklung der Theatertechnik machte sich die Ausarbeitung der Theorie der Perspektive notwendig. Als Verfasser eines ersten Aufsatzes über diese Problematik nennen die Quellen den Maler Agatharchos aus Samos, in dessen Nachfolge Anaxagoras und Demokrit über die Theorie der Perspektive geschrieben haben sollen. Große Popularität gewannen im 5. Jahrhundert v. u. Z. drei geometrische Aufgaben, die sich mittels der Geometrie des Zirkels und des Lineals als unlösbar erwiesen: 1. die Verdopplung des Würfels, 2. die Dreiteilung eines Winkels, 3. die Quadratur des Kreises. Mit der Aufgabe der Würfelverdopplung, die die Bezeichnung »Delisches Problem« erhielt, beschäftigten sich die größten Mathematiker jener Zeit — Hippokrates von Chios und Archytas von Tarent; sie gab später den Anstoß zum Studium von Kegelschnitten. Zum Problem der Dreiteilung des Winkels erfand der bekannte sophistische Philosoph Hippias von Elis eine Kurve, die später »Quadratrix« genannt wurde. Die dritte Aufgabe — die Quadratur des Kreises — war dermaßen populär, daß sie selbst in den »Vögeln« von Aristophanes erwähnt wurde. Laut Überlieferung befaßte sich Anaxagoras mit dieser Aufgabe im Gefängnis von Athen. Besonders interessant sind im Zusammenhang mit dieser Aufgabe die Betrachtungen des Sophisten Antiphon, der den Kreis als ein Vieleck mit einer großen Anzahl von Seiten interpretierte.

Welche rasche Entwicklung nahm die Mathematik in nur anderthalb Jahrhunderten! Ende des 6. Jahrhunderts v. u. Z. waren die grundlegenden mathematischen Begriffe noch ein Objekt esoterischer Spekulationen der pythagoreischen Schule, und es gibt keine Belege darüber, daß mathematische Forschungen außerhalb dieser Schule geführt worden wären. Zu Anfang des 4. Jahrhunderts v. u. Z. hatte sich die Mathematik bereits in eine strenge und selbstän-

dige Disziplin verwandelt. Zwei Umstände haben diesen Fortschritt begleitet.

Erstens hörte die Mathematik gegen Mitte des 5. Jahrhunderts v. u. Z. auf, das ausschließliche Privileg der Pythagoreer zu sein; sie wurde zum Gegenstand der Tätigkeit von Wissenschaftlern, die sich zu keiner philosophischen Richtung bekannten. Wenn Theodoros von Kyrene und Archytas aus Tarent noch als Pythagoreer gelten, war Hippokrates von Chios wahrscheinlich bereits reiner Berufsmathematiker. Andererseits zog die theoretische Mathematik die Aufmerksamkeit von Philosophen auf sich, die keine Beziehung zur pythagoreischen Schule hatten; davon zeugen Berichte über mathematische Untersuchungen von Anaxagoras, Hippias, Antiphon sowie über die mathematischen Aufsätze von Demokrit. Die Mathematik wurde zu einer besonderen, ausgezeichneten Wissenschaft, und als solche wurde sie bald zum Vorbild für alle anderen Wissenschaften.

Der zweite wichtige Umstand war die Schaffung der deduktiven mathematischen Methode. Es ist uns unmöglich, die Entstehungsgeschichte dieser Methode zu verfolgen. Wurde sie bereits von den frühen Pythagoreern entwickelt? Oder wurde ihre Entstehung durch die logischen Überlegungen des Zenon stimuliert? Oder bildete sie sich erst im Prozeß der schöpferischen Tätigkeit der großen Mathematiker vom Ende des 5. Jahrhunderts v. u. Z. — Hippokrates und Archytas — heraus? Wir können diese Fragen nicht beantworten; uns ist lediglich bekannt, daß bei Hippokrates der ganze Stoff bereits streng deduktiv mittels logischer Schlüsse aus einer kleinen Anzahl von Prämissen dargelegt wurde. Also werden wir kaum Anstoß erregen, wenn wir die Geburt der mathematischen Wissenschaft dem Erscheinungsdatum seines Buches zeitlich zuordnen.

Im Unterschied zur Mathematik kann sich die griechische Astronomie des 5. Jahrhunderts v. u. Z. keiner so großen Erfolge rühmen. Vor allem fällt auf, daß die astronomischen Kenntnisse der meisten vorsokratischen Philosophen (bis hin zu Demokrit) sehr gering waren. Ihre kosmologischen Spekulationen stützten sich weder auf Beobachtungen noch auf Berechnungen; von den Planeten hatten sie nur sehr verschwommene Vorstellungen. Selbst Anaxagoras' Erklärung der Sonnen- und Mondfinsternisse war lediglich eine geniale Vermutung, die sich auf keine eigene kosmo-

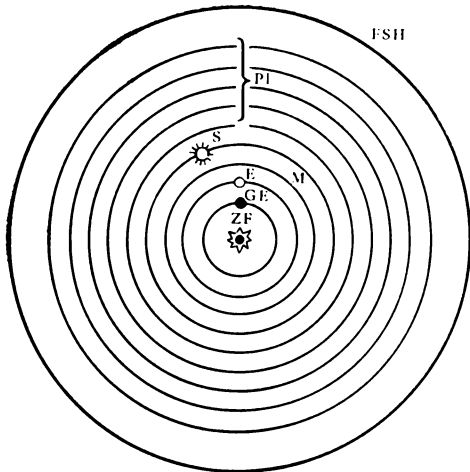
logische Konzeption des Philosophen aus Klazomenai stützte.

Nach den antiken Quellen erbrachte die pythagoreische Schule die größte Leistung auf dem Gebiet der Astronomie. Man nimmt an, daß die Hypothese über die Kugelförmigkeit der Erde von den Pythagoreern formuliert und dann erst von Parmenides übernommen wurde. Wahrscheinlich konnten die Pythagoreer nicht ohne orientalischen Einfluß fünf Planeten unterscheiden und ihre Ortsveränderungen beobachten. Es wird überliefert, daß Alkmaion, der in seinen wissenschaftlichen Ansichten den Pythagoreern nahestand, von einer Planetenbewegung von West nach Ost sprach, d. h. einer den Fixsternen entgegengesetzten Bewegung. Im weiteren entwickelte die pythagoreische Schule ein klassisches Modell des Kosmos, in dem die Himmelskörper auf sieben Kreisen oder Sphären folgendermaßen verteilt wurden (nach der Entfernung von der Erde): Mond, Sonne, Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn. In der pythagoreischen Schule hatten sie natürlich andere Bezeichnungen: Selene, Helios, Hermes, Aphrodite, Ares, Zeus und Kronos. Den Abstand zwischen diesen Sphären verglichen die Pythagoreer mit den Intervallen der Tonleitern, wobei sie annahmen, daß die Sphären durch ihre Drehung Töne abgeben, die in ihrer Gesamtheit die Himmelsharmonie oder Sphärenmusik ausmachen, die wir aber nicht wahrnehmen, da sich unsere Ohren an sie gewöhnt haben.

Von dem kosmologischen System, wie es sich in der ersten Hälfte des 4. Jahrhunderts v. u. Z. darstellte, kann man sich anhand des »Timaios« von Platon ein Bild machen. Zu dem dort dargestellten Kosmosmodell kam die pythagoreische Schule aber offensichtlich nicht auf direktem Weg. Die interessanteste Abweichung stellt das System von Philolaos aus Tarent dar — einem Pythagoreer, der Ende des 5. Jahrhunderts v. u. Z. lebte. Philolaos lehnte die traditionelle Vorstellung von der zentralen Stellung der Erde ab und setzte an ihre Stelle ein Feuer, um das sich die für uns unsichtbare »Gegenerde«, dann die Erde, der Mond, die Sonne, die fünf Planeten und die äußere Sternenschale (Abb. 3) bewegen. Die Sonne empfangt Licht und Wärme sowohl vom Zentralfeuer als auch von dem Feuer jenseits der äußeren Schale. Die »Gegenerde« war nach Meinung des Aristoteles nur wegen der den Pythagoreern heiligen Zehnzahl eingeführt worden. Möglicherweise übrigens hat er

sich auch von anderen Überlegungen leiten lassen, erst recht weil einige Vorsokratiker (Anaximenes, Anaxagoras) ebenfalls die Existenz unsichtbarer (dunkler) Himmelskörper unterhalb des Mondes zuließen.

In den Quellen werden auch Namen anderer Gelehrter dieser Epoche erwähnt, die keine Philosophen waren, sich aber mit Astronomie beschäftigten. Als erster wird Kleostratos von Tenedos genannt, der in der zweiten Hälfte des 6.



**Abb. 3.** Aufbau der Welt nach Philolaos:  
*ZF* Zentralfeuer, *GE* Gegenerde, *E* Erde, *M* Mond, *S* Sonne, *Pl* die fünf Planeten, *FSH* Fixsternhimmel

Jahrhunderts v. u. Z. lebte und der im Ida-Gebirge eine Beobachtungsstelle gehabt haben soll. Er unterhielt wahrscheinlich Kontakte zu den babylonischen Astronomen; insbesondere wird ihm die Aufstellung der Bezeichnungen für die Sterne des Tierkreises zugeschrieben, die den Babyloniern gut bekannt waren. Kleostratos schrieb eine »Astrologie« in Versform, aus der uns ein kurzes Fragment erhalten geblieben ist.

Die Tätigkeit der griechischen Astronomen im 6. bis 5. Jahrhundert v. u. Z. war größtenteils praktisch ausgerichtet; ihre wichtigste Aufgabe bestand in der Präzisierung des Kalenders, vor allem in der Abstimmung des Mondkalenders

(nach dem die meisten religiösen Rituale ausgerichtet waren) mit der wirklichen Dauer eines Sonnenjahres. Diese Aufgabe wurde mit Hilfe der Aufstellung von mehrjährigen Zyklen, zwischen die zusätzliche Monate eingeschoben werden mußten, gelöst. Als erster Zyklus dieser Art wird die »Oktaëteris« (der 8jährige Schaltzyklus) genannt, die entweder von Kleostratos oder von seinem Schüler Harpalos eingeführt wurde; letzterem wird auch die Präzisierung der Dauer eines Sonnenjahres zugeschrieben.

Genauere Angaben besitzen wir über zwei Athener Astronomen der zweiten Hälfte des 5. Jahrhunderts v. u. Z. — Meton und Euktemon. Sie führten ihre Beobachtungen an verschiedenen Orten durch — in Athen, Kilikien, Makedonien und Thrakien. Beide werden im Zusammenhang mit der am 27. Juni 432 v. u. Z. stattgefundenen vollen Sonnenfinsternis erwähnt. Meton (der von Aristophanes in den »Vögeln« verlacht wird) stellte einen 19jährigen Sonne-Mond-Zyklus auf, der aus 235 Monaten bestand, davon waren sieben Schaltmonate; 110 Monate dieses Zyklus hatten 29 Tage, 125 Monate 30 Tage. Ein Sonnenjahr hatte nach Meton  $365 \frac{5}{19}$  (365,263) Tage, was lediglich um eine halbe Stunde von dem genauen Wert abweicht. Euktemon wird die Entdeckung der ungleichen Dauer der Jahreszeiten zugeschrieben; nach seinen Beobachtungen dauern die astronomischen Jahreszeiten (beginnend mit der Sommersonnenwende) entsprechend 90, 90, 92 und 93 Tage.

Ungefähr zur gleichen Zeit lebte Oinopides von Chios, der, wie man annimmt, als erster Astronom die Neigung der Ekliptik zum Äquator maß. Er schlug auch einen eigenen Mond-Sonne-Zyklus vor, der 59 Jahre betrug. Die Dauer eines Sonnenjahres bestimmte Oinopides von Chios mit  $365 \frac{22}{59}$  Tagen.

Obwohl sich im Vergleich zu dem stürmischen Aufschwung der Mathematik die Leistungen der griechischen Astronomen in dem beschriebenen Zeitraum mehr als bescheiden ausnehmen, wäre es ungerecht, die mühselige Kleinarbeit solcher Leute wie Oinopides, Meton und Euktemon geringzuschätzen. Ihre Arbeit bereitete das Fundament, auf dem in der Folgezeit das Gebäude der antiken theoretischen Astronomie des Eudoxos, Hipparch und Ptolemaios errichtet wurde.

## DIE EPOCHE VON PLATON UND ARISTOTELES

### Allgemeine Lage am Ende des 5. Jahrhunderts v. u. Z.

Die letzten Jahrzehnte des 5. Jahrhunderts v. u. Z., gezeichnet durch den tragischen Peloponnesischen Krieg, waren eine Zeit der Krise der griechischen Poleis. Die Sklavenhalterdemokratie jener Form, wie sie sich damals in Athen und den meisten anderen Poleis etabliert hatte, brachte die ihr innewohnenden Mängel an den Tag. Sie konnte weder Frieden noch allgemeinen Wohlstand noch solch eine Rechtsordnung, die Leben und Sicherheit der Bürger garantieren würde, gewährleisten. Der Krieg spitzte die Widersprüche zwischen den verschiedenen Gruppen der Gesellschaft zu — zwischen der Stammesaristokratie und dem Demos, zwischen den Reichen und den Armen, zwischen der städtischen und der Landbevölkerung und schließlich zwischen den Reitern und Hoplitern (schwerbewaffneten Fußsoldaten) einerseits und den Leichtbewaffneten und Ruderern (Theten) andererseits.

All das führte zum Anwachsen antidemokratischer Tendenzen und zur Suche nach neuen Formen des Staatsaufbaus. In gebildeten Kreisen verstärkte sich sprunghaft das Interesse für ethische und politische Probleme; gleichzeitig entwickelte sich eine skeptische, zeitweise sogar negative Haltung zu jeder Art kosmologischer Spekulation. Als Zeugnis dieser Haltung können die literarischen Werke jener Epoche dienen: die »*Wolken*« von Aristophanes und wenig später »*Phaidon*« von Platon sowie »*Erinnerungen an Sokrates*« von Xenophon.

Doch die frühe griechische Naturlehre verfügte über keine Kriterien, die es gestattet hätten, unter den Konzeptionen der verschiedenen Denker, angefangen bei Thales von Milet, eine Wahl zu treffen. Die letzten bekannten »*Physiker*« — Archelaos aus Athen und Diogenes aus Apollonia — haben bereits nichts Originelles mehr geschaffen; Archelaos beschränkte sich auf die Ausarbeitung einzelner Aspekte der Anschauungen seines Lehrers Anaxagoras, und die Lehre des Diogenes war eine Mischung der Ansichten

von Anaximenes, der Atomisten und Anaxagoras. Für eine weitere Entwicklung war die genauere Untersuchung der Beweis- und Erkenntnismethoden dringend erforderlich. Neben Ethik und Politik widmeten sich ihr namentlich die Sophisten, die »Weisheitslehrer«. Sie bildeten weniger eine bestimmte philosophische Schule oder Strömung als eine neue Berufsgruppe, die sich gerade in dieser Krisenzeit herausbildete. Sie vermittelten gegen Geld vor allem jungen und vermögenden Leuten solches Wissen, das jedem Polis-Bürger bei der Wahrung seiner Rechte und Pflichten nützlich sein konnte; zum Beispiel Grammatik, Logik, Rhetorik und andere Lehrfächer.

Am Beispiel des Antiphon und Hippias konnten wir sehen, daß die Sophisten sich auch rein wissenschaftlichen, im einzelnen mathematischen Problemen stellten, doch insgesamt lagen ihre Interessen auf einem anderen Gebiet.

Die hervorragendsten Philosophen unter den Sophisten waren Protagoras aus Abdera (etwa 481—411 v. u. Z.) und Gorgias aus Leontinoi in Sizilien (etwa 485—380 v. u. Z.). Sie warfen wichtige erkenntnistheoretische Probleme auf, die sie im relativistischen und skeptizistischen Geiste lösten. Von Protagoras stammt der berühmte Satz, »der Mensch sei das Maß aller Dinge, der seienden, wie sie sind, der nichtseienden, wie sie nicht sind«.

Spürbar von den Eleaten beeinflußt ist die Schrift des Gorgias »Vom Nichtseienden«, die die These ausführte: »Es gibt nichts; gäbe es etwas, wäre es nicht erkennbar; wäre es erkennbar, so wäre es nicht mitteilbar.« Der Skeptizismus der Sophisten war eine Reaktion auf den Dogmatismus der »Physiker«, die sich meist nicht die Mühe machten, ihre Lehrsätze zu begründen.

In Athen stieß die Aufklärertätigkeit der Sophisten auf eine starke Opposition. Die konservativen Kreise befürchteten zu Recht, daß eine Verbreitung ihrer Ansichten zur Untergrabung von Religion und Moral führen könnte. Die attische Komödie verspottete die Sophisten. Ihr Gegner war auch Sokrates (470—399 v. u. Z.), obwohl er ihnen in der Art seines Denkens in gewisser Weise nahestand. Durch seine antidogmatische Haltung und seine bohrenden Fragen regte er seine Zeitgenossen zu selbständigem Denken an und wirkte durch seine starke Persönlichkeit insbesondere auf die Jugend. Das wurde ihm zum Verhängnis, denn er wurde schließlich von den Athenern wegen angeblicher

Verführung der Jugend und Gotteslästerei angeklagt und zum Tode verurteilt, nachdem er es abgelehnt hatte, ins Exil zu gehen oder aber keine politischen Gespräche mehr zu führen.

Der wahre Beweggrund für das Todesurteil wird aber wohl in dem ausgesprochen kritischen Verhältnis des Sokrates zur athenischen Demokratie bestanden haben.

Nach seinem Tode entstand eine reiche Literatur um Sokrates. Was er seinen Schülern und Freunden bedeutet hatte, ist vor allem den Platonischen Dialogen zu entnehmen, aber auch den Abhandlungen anderer Autoren, zu denen Xenophon, Antisthenes und Aischines aus Athen sowie Eukleides aus Megara, Phaidon aus Elis und Aristippos aus Kyrene zählen, die ihn gut gekannt hatten und teilweise selbst zu Begründern philosophischer Schulen wurden. In ihren Grundthesen und Haltungen unterschieden sie sich zwar sehr, aber sie alle widmeten sich in der Hauptsache ethischen und politischen Problemen.

## Platon und sein Weltbild

Platon (427—347 v. u. Z.) hat seinen festen Platz in der Geschichte der antiken Kultur. Er war nicht nur ein großer Philosoph und Begründer des objektiven Idealismus, sondern auch ein glänzender Stilist, ein politisch engagierter Denker, ein Organisator und Theoretiker der Wissenschaft. Aber er war auch ein Bürger von Athen, der die Krise, in der die Athener Polis steckte, als besonders schmerzlich empfand. Er sah ihre Mängel nach der Verurteilung seines hochverehrten Lehrers in aller Schärfe. So erklärt sich seine beharrliche Suche nach der idealen Staatsform, die er nicht nur theoretisch konzipierte, sondern auch praktisch, allerdings ohne Erfolg, umzusetzen versuchte.

Von den 36 Arbeiten, die unter seinem Namen überliefert sind, ist der größte Teil moralischen, ästhetischen und anderen menschlichen Fragen gewidmet. Seine Polemik richtet sich gegen die Sophisten, vor allem gegen ihren Relativismus in Fragen der Moral und Politik. Ihm ging es um Werte, die nicht von menschlichen Festlegungen abhingen. Die Suche nach dem Absoluten führte ihn zur Ideenlehre, die in einer Reihe von Dialogen aus seiner reifen Schaffensperiode, »Phaidon«, »Phaidros«, »Gastmahl«, »Parmenides«, »Staat« u. a., dargelegt ist.

Die Lehre von den Ideen, die nur durch reines Denken erfassbar seien und ontologisch über den sinnlich wahrnehmbaren Dingen ständen, gehört in den Bereich der Philosophie und hat keinen direkten Bezug auf die Einzelwissenschaften. Deshalb werden wir hier nicht näher auf sie eingehen. Wir wollen nur festhalten, daß die Ideenlehre insofern unschätzbar zur Entwicklung des wissenschaftlichen Denkens beitrug, als sie klar zwischen Wesen und Erscheinung, Allgemeinem und Einzellnem unterschied und die von den Eleaten erörterte Problematik präziserte.

Ideenlehre und Mathematik stehen bei Platon in engem Zusammenhang. Möglicherweise erwachte in ihm das Interesse für Mathematik durch die Bekanntschaft mit Archytas von Tarent, mit dem er während seiner längeren Reisen nach Sokrates Tod Kontakt hatte. Nach seiner Rückkehr in die Heimat gründete Platon eine wissenschaftliche Schule — die Akademie —, die er in einem von ihm speziell für diesen Zweck gekauften Teil eines Hains, benannt nach dem altattischen Helden Akademos (daher der Name), unterbrachte. Das war die erste straff organisierte wissenschaftliche Schule überhaupt. Über ihrem Eingang soll gestanden haben: »Niemand trete ein ohne Kenntnis der Geometrie!« Die hohe Wertschätzung der Mathematik wurde durch die philosophische Orientierung Platons bestimmt; er war der Ansicht, daß die Beschäftigung mit Mathematik eine wichtige Etappe auf dem Weg zur Erkenntnis der Ideen sei. Im »Staat« empfiehlt Platon ausgiebige propädeutische Studien der Arithmetik, Geometrie, Stereometrie und Astronomie. Dabei betont er nicht deren praktische Nützlichkeit, sondern ihre Bedeutung für ein allgemeines Training des Geistes, um ihn zu höheren philosophischen Einsichten zu befähigen.

In der letzten Periode, stark unter dem Einfluß der Pythagoreer stehend, war Platon geneigt, seine Ideen den pythagoreischen Zahlen gleichzusetzen.

Platon trat zwar nicht selbst mit wesentlichen mathematischen Beiträgen hervor, dennoch darf er als großer Förderer des mathematischen Denkens gelten. Er leitete die wissenschaftliche Tätigkeit der Akademie und unterhielt freundschaftliche Beziehungen zu namhaften Mathematikern, zu denen außer Archytas Theodoros, Theaitetos, Eudoxos zählen. Mathematische Probleme behandelte er insbesondere im »Menon«, »Theaitetos«, »Staat«. In seinem letz-

ten, wahrscheinlich von einem Schüler herausgegebenen Werk, dem »Anhang zu den Gesetzen«, legte er die Proportionslehre des Archytas dar. Aus wissenschaftshistorischer Sicht besteht Platons Hauptverdienst darin, daß er die Mathematisierung des Wissens motivierte, also jenen Weg vorzuzeichnen schien, den die Wissenschaft in der alexandrinischen Epoche dann tatsächlich eingeschlagen hat und den sie bis auf den heutigen Tag geht.

Spekulatives und darunter auch mathematisches Wissen stellte Platon über empirisches Wissen. Das heißt aber nicht, daß er den Wert des Erfahrungswissens, wie manchmal behauptet wird, generell bestritten hätte, jedoch gelte es über den Sinnenschein, das nur Ungefähre und Ungenaue, über bloße Meinungen hinauszukommen. Zur Erkenntnis der Ideen, des wahren Wesens der Dinge, bedarf es nach Platon des reinen Denkens oder der dem mathematischen Denken ähnlichen Geistesschau, die sich nicht von sinnlichen Wahrnehmungen täuschen läßt.

In einigen Dialogen berührt Platon auch astronomische Fragen. Im »Phaidon« bekräftigt er ausdrücklich die Kugelförmigkeit der Erde, und im letzten Buch des »Staat« skizziert er das pythagoreische Bild vom Kosmos. Eine gründliche Erörterung der Kosmogonie finden wir im »Timaios«, der zu dem späten und bekanntesten Platonischen Dialog zählt.

Das Gespräch über den Aufbau des Kosmos führt Timaios aus Lokris, der als Pythagoreer und »größter Kenner der Astronomie« erscheint. Allerdings gibt der Timaios des Dialogs nicht einfach die pythagoreische Lehre, sondern im wesentlichen die Überlegungen und Begründungen von Platon selbst wieder. Eine deutliche Abkehr von der pythagoreischen Tradition kommt in der Fragestellung nach dem Ursprung der Welt zutage. Die archaische pythagoreische Kosmogonie, in der das Feuer und die Einheit die Mannigfaltigkeit der Zahlen und Dinge hervorbringt, war für Platon unakzeptabel. Den einen einzigen existierenden Kosmos betrachtet er als das Werk der höchsten schöpferischen Kraft, des Demiurgen, der ihn nach einem idealen Urbild geschaffen habe, und zwar für alle Ewigkeit. Nur die einzelnen sichtbaren, fühlbaren und körperlichen Dinge hielt Platon für vergänglich. Zusammen mit dem Kosmos sei auch die Zeit entstanden, womit also die Frage, was vor der Entstehung des Kosmos war, sinnlos würde.

Die Hauptkomponenten bei der Entstehung des Kosmos waren das Feuer als Träger des Sichtbaren und die Erde als Träger des Fühlbaren. Als verknüpfende Mittelglieder erscheinen Luft und das Wasser, wobei sich das Feuer zur Luft verhalte wie die Luft zum Wasser und die Luft zum Wasser wie das Wasser zur Erde. Jedes der vier Elemente gehe ohne Überreste, die einen anderen Kosmos hätten bilden können, in den Bestand des Kosmos ein, der durch nichts mehr von außen zu beeinflussen wäre.

Der Kosmos als vollkommenes lebendiges Wesen habe die Form einer absolut glatten Kugel erhalten mit einer alles durchdringenden und umhüllenden Seele im Zentrum. Ihrer Struktur, die Platon ausführlich beschreibt, entspricht genau die Struktur des Kosmos.

Im Kosmos zeichnete der Demiurg oder Weltenbaumeister zwei in der Ebene des Äquators und der Ekliptik liegende Kreise ungleicher Größe aus, die sich in entgegengesetzter Richtung drehen und einen bestimmten Winkel bilden (Abb. 4). Der äußere Kreis sei Ausdruck der Natur des Selbigen (Wahren, Guten); seine Bewegung sei einheitlich und unteilbar, es sei die der äußeren Himmelskugel. Der innere Kreis sei Ausdruck des Anderen (Veränderlichen, Unvernünftigen); er habe sich in sieben ungleiche Kreise gespalten, auf denen sich der Mond, die Sonne und die fünf Planeten bewegen, von denen im »Timaios« nur der »Stern des Hermes« (Merkur) und der »Morgenstern« (Venus) unterschieden werden. Die Namen der äußeren Planeten finden wir bei Platon lediglich im »Anhang zu den Gesetzen«, der nach Ansicht vieler Gelehrter nicht von Platon selbst stammt.

Neben den Grundsatzthesen äußert sich Platon auch zu einer Reihe Spezialfragen, die sich vor allem auf die Bewegung der Himmelskörper beziehen. Diese Äußerungen sind nicht immer eindeutig auslegbar. Man muß berücksichtigen, daß der »Timaios« kein wissenschaftliches Traktat über die Astronomie war und keinen Anspruch darauf erhob, eine systematische Darstellung der Fakten zu sein, die Platon und seinen Zeitgenossen auf diesem Gebiet bekannt waren. Dazu kommt, daß längst nicht alles, was im »Timaios« gesagt wird, wörtlich zu verstehen ist; vieles (darunter auch die Beschreibung des Schöpfungsaktes des Kosmos durch den Demiurgen) drückte Platon sinnbildlich aus — in der Form des Mythos, auf die er nicht selten auch in

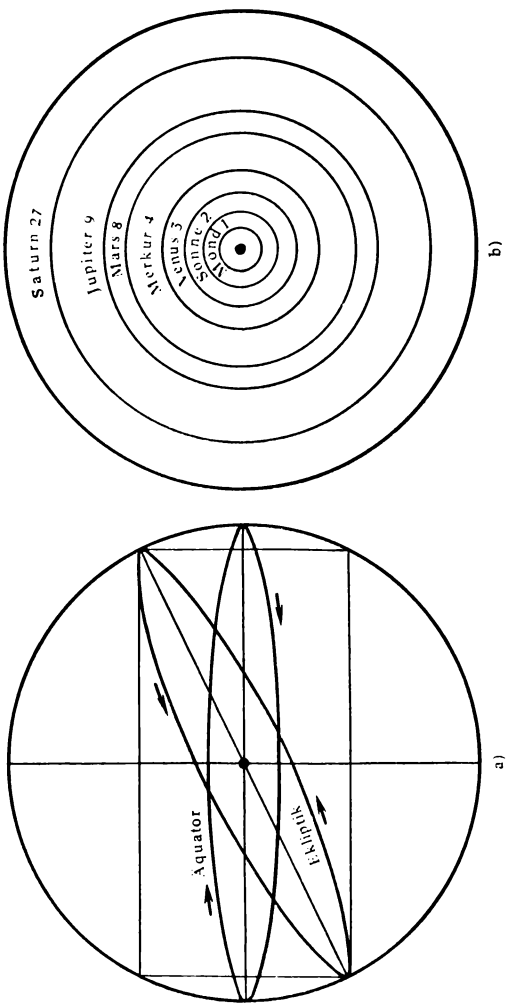


Abb. 4. Struktur des Kosmos nach Platon:  
 a) Kreis des »Selbigen« und des »Anderen« b) Kreis des »Anderen« (die Zahlen geben die relative Entfernung des Planeten zum Zentrum des Kosmos an)

seinen anderen Dialogen zurückgriff. Ungeachtet dessen (vielleicht auch gerade deshalb) wurde das im »Timaios« dargestellte Bild des Kosmos zum klassischen Muster des antiken Kosmos, der als eine der lichtesten und charakteristischsten Schöpfungen des hellenischen Geistes gilt.

Sehr interessant dürfte für den Wissenschaftshistoriker die im »Timaios« dargelegte Theorie der Materie sein, die als eine Art eigenwillige Synthese der Konzeption von den vier Elementen des Empedokles und der Atomistik des Demokrit betrachtet werden kann. Platon erkennt vier Elemente, die sogenannten *stoicheia*, als Hauptkomponenten der materiellen Welt an, aber er hält sie nicht für elementar im strengen Wortsinn. Ihnen liegt die allgemeine, unbestimmte Materie zugrunde, die Platon als die Nährerin oder die Aufnehmerin bezeichnet und die sich nach seinen Worten »in Flüssigkeit erströmt, durch Feuer lodert und die Formen der Erde und der Luft annimmt«. Diese vier Elemente (oder »vier Gattungen«, wie sie Platon nennt) werden mit Hilfe von Figuren und Zahlen geordnet, und zwar bestehen sie aus kleinsten unsichtbaren Teilchen, die die Form regelmäßiger Polyeder haben. So sind die Teilchen des Feuers Tetraeder, die der Luft Oktaeder, die des Wassers Ikosaeder und die der Erde Würfel. Dabei hat Platon wahrscheinlich die sinnlich wahrnehmbaren Eigenschaften entsprechender Elemente — die Beweglichkeit, die Beständigkeit, die Fähigkeit, auf andere Dinge einzuwirken usw. — berücksichtigt. Was das fünfte Polyeder — das Dodekaeder — anbelangt, beschränkte sich Platon auf die vage Bemerkung, der Gott habe es zum Umriß des Weltganzen bestimmt. Im »Anhang zu den Gesetzen« wird jedoch ein fünftes Element, der Äther, eingeführt, dessen Teilchen die Form eines Dodekaeders verliehen wird.

Die Begrenzungsflächen der Polyeder können aus rechtwinklig-gleichschenkligen Dreiecken oder ungleichseitigen Dreiecken mit den Winkeln  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  und  $90^\circ$  zusammengesetzt werden. Das sind die eigentlichen elementaren Struktureinheiten, aus denen die Dinge geformt sind. Die ungleichseitigen Dreiecke bilden die Feuer-, Luft- und Wasser-Polyeder, die gleichschenkligen Dreiecke nur Würfel, aus denen die Erde besteht. Deshalb sind die ersten drei Grundkörper ineinander umwandelbar, während Erde immer Erde bleibt.

Da aus ein und den gleichen elementaren Dreiecken re-

gelmäßige Polyeder verschiedener Abmessungen aufgebaut werden können, stellt jedes Element nicht einen streng homogenen Stoff, sondern eher eine ganze Klasse von Stoffen dar, die über einige gemeinsame Eigenschaften verfügen, sich aber in bestimmter Hinsicht voneinander wesentlich unterscheiden können. Aus der Sicht der heutigen Physik ist eine jede solche Klasse einem bestimmten Aggregatzustand des Stoffes analog; in den konkreten Beispielen, die Platon als Illustration zu seiner Theorie untersucht, hat diese Analogie frappierende Wirkung.

Beliebige Veränderungen und Umwandlungen des Stoffes sind durch Umstellung der Partikeln bedingt, die diesen Stoff ausmachen. Wenn ein Körper aus homogenen und gleich großen Partikeln besteht und dabei keinen äußeren Einwirkungen ausgesetzt ist, kann es in ihm keine Umwandlungen geben. Stellt aber der Stoff ein Gemisch aus zwei oder mehreren Arten von Partikeln dar, dann beginnt in diesem Fall zwischen den verschiedenartigen Partikeln ein Kampf, der entweder in der Isolierung der Partikeln einer jeden Art oder aber in der Zerstörung und der Umstellung der schwächeren oder der nicht so zahlreich vertretenen Partikeln endet. Besonders stürmische Prozesse finden dann statt, wenn als eine der Gemischkomponenten das Feuer auftritt, denn die winzigen, mobilen Partikeln des Feuers zeichnen sich laut Platon durch besondere Aggressivität aus. Ausgehend von diesen Prämissen, untersucht Platon im »Timaios« eine Reihe physikalischer Prozesse, die — unter Benutzung der heutigen Terminologie — zum Bereich der Phasenumwandlungen der Materie gehören.

Interessant sind Platons Gedanken über die Begriffe oben und unten, Schwere und Leichtigkeit. Die Begriffe oben und unten haben seiner Meinung nach einen relativen Charakter. Die Menschen, die sich an anderen Punkten der Erdkugel befinden, werden als oben und unten anderes bezeichnen als wir; das kommt daher, daß wir als unten die Richtung bezeichnen, in die alle schweren, »erdähnlichen« Dinge fallen; nämlich zum Zentrum der Welt. Dahin streben sie nicht gemäß ihrer Natur, sondern nach dem Prinzip »Gleiches zu Gleichem«, eben weil sich dort die Erde befindet. Ähnlich würde auch die Feuerperipherie des Kosmos die Teile des Feuers anziehen, wenn jemand sich anschicken würde, diese ihr zu entreißen. Das gleiche trifft auch für die Luft und das Wasser zu. Solche Überlegungen

spielten später, als es den aristotelischen Schwerebegriff zurückzuweisen galt, eine progressive Rolle.

Das Problem der Bewegung hat Platon ebenfalls beschäftigt. Er geht darauf auch an einigen Stellen seiner letzten Dialoge (angefangen von »Theaitetos«) ein. Als Ergebnis dieser Betrachtung wenden wir uns der Klassifikation der Bewegungen zu, die in den »Gesetzen« angeführt wird. Unter den zehn Bewegungsarten hebt Platon die dem Leben wesenseigene Selbstbewegung hervor; Ursache für eine solche Bewegung könne nur die Seele sein. Dabei schreibt Platon nicht nur den Lebewesen, sondern auch den Himmelskörpern als Teilen des kosmischen Gesamtorganismus Seelen zu. Er polemisiert gegen die »Physiker«, die die Bewegung der Dinge auf ihre »Natur« zurückführten.

Die biologischen Ansichten Platons sind von seinen allgemeinen philosophischen Anschauungen geprägt. Seiner Meinung nach begann das Leben mit dem Erscheinen des Menschen auf der Erde. Der Weltenbaumeister schuf den Menschen als das Wesen mit der größten Gottähnlichkeit. Alle anderen Lebewesen entstanden als unvollkommene Modifikationen des Menschen und um seinetwillen. Neben diesen phantastischen Ideen äußert Platon eine Reihe von interessanten Überlegungen in bezug auf die Struktur und die Funktionen einzelner Organe. Der bei Alkmaion beginnenden Tradition folgend, maß Platon besondere Bedeutung dem Gehirn bei, das der Sitz des höchsten und unsterblichen Teils der Seele sei. Die niederen Seelenteile seien sterblich und im Herzen bzw. im Bauchbereich angesiedelt.

In welcher Beziehung steht das im »Timaios« skizzierte Weltbild zur vorsokratischen Naturlehre? Platon hat sich kritisch und intensiv damit auseinandergesetzt. Während er in seiner Kosmologie hauptsächlich den Pythagoreern folgte, ähnelt die Tätigkeit des Demiurgen der Vernunft (Nus) bei Anaxagoras. Die vier Elemente übernahm er von Empedokles, und sein geometrischer Atomismus war wohl als Antwort auf die Lehre Leukipps und Demokrits gemeint.

Andererseits kommen im System Platons charakteristische Gesichtspunkte auf, die in den Lehren der Vorsokratiker nicht anzutreffen waren. Genannt sei erstens die bereits erwähnte äußerst feindselige Haltung Platons zum Begriff der »Natur«, der dem Weltempfinden der meisten Vorsokratiker zugrunde lag; zweitens das von Platon verkündete (wenn von ihm auch noch nicht realisierte) Programm der

Mathematisierung der Wissenschaft; drittens die exakte Trennung der philosophischen und ggnoseologischen Probleme von den Problemen der Naturforschung.

In seinem Weltbild war Platon bestrebt, den Rahmen der Wissenschaft »von der Natur« zu sprengen. Doch diese Aufgabe konnte nur durch Schaffung von Wissenschaften eines neuen Typs gelöst werden, was dann tatsächlich auch erfolgte, jedoch nicht durch die Philosophen, sondern durch die Mathematiker, Astronomen und Naturforscher.

### **Eudoxos — Verbote der Wissenschaft eines neuen Typs**

Eudoxos von Knidos (geb. um 408 v. u. Z.) war eine Schlüsselfigur der griechischen Wissenschaft seiner Zeit. Uns ist er vor allem als Mathematiker und Astronom bekannt, doch er schrieb darüber hinaus Bücher über Philosophie, Geographie und Medizin. Leider sind uns aus seinem ganzen Nachlaß nur einige Fragmente überliefert.

Seine Biographie scheint größeres Interesse erweckt zu haben. Aus seinem bewegten Leben blieb unter anderem folgendes bekannt. In seiner Jugend studierte er Mathematik bei Archytas in Tarent und Medizin bei Philistion in Sizilien. Mit 23 Jahren kam er nach Athen, und da er sehr arm war, ließ er sich im Hafen von Piräus nieder, von wo aus er täglich die Platonische Akademie aufsuchte. Später unternahm er mit Unterstützung seiner Freunde eine Reise nach Ägypten, wo er sein astronomisches Wissen bei den Priestern von Heliopolis bereicherte. Nach Griechenland zurückgekehrt, gründete er in Kyzikos an der Propontis eine eigene Schule. Nachdem Eudoxos große Berühmtheit erlangt hatte, besuchte er noch einmal Athen, wo er mit Platon Gespräche zu philosophischen Themen führte. Eudoxos starb mit 53 Jahren in Knidos.

In seinen philosophischen Ansichten schloß sich Eudoxos in einigen Fragen Platon an. Zur Ideenlehre bezog er insofern eine kritische Position, als er meinte, die Ideen müßten den sinnlich wahrnehmbaren Dingen irgendwie »beigemischt« sein, also nicht einem besonderen Seinsbereich angehören. Auch Platons Auffassung vom Endzweck der Philosophie, nämlich die Erkenntnis des höchsten Gutes, scheint er abgelehnt und für weltfremd gehalten zu haben.

Eudoxos war ein großer Mathematiker. Er entwickelte

die Proportionslehre von Archytas und Theaitetos weiter, indem er eine allgemeine Theorie der Proportionen mit einem neuen Größenbegriff aufstellte. Denn während man früher die Sätze einzeln für Zahlen, Strecken und Flächen beweisen mußte, schloß der von Eudoxos eingeführte Begriff der Größe sowohl Zahlen als auch beliebige kontinuierliche Größen ein. Der Begriff wurde mittels der allgemeinen Axiome der Gleichheit und Ungleichheit definiert; Eudoxos fügte ein weiteres Axiom hinzu, das jetzt gewöhnlich als Archimedisches Axiom bezeichnet wird: »Die größere von zwei gegebenen Größen, sei es Linie, Fläche oder Körper, übertrifft die kleinere um eine Differenz, die, genügend oft vervielfacht, jede der beiden gegebenen Größen übertrifft.« Ausgehend von diesen Axiomen, entwickelte Eudoxos eine durchweg strenge Theorie der Verhältnisse, die im Buch V der »Elemente« von Euklid dargelegt ist. Die Tiefe dieser Theorie wurde erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts voll erkannt, als durch die Arbeiten von Dedekind und anderen Mathematikern die Grundlagen der modernen Theorie der reellen Zahlen geschaffen wurden.

Ein anderer wichtiger Beitrag des Eudoxos zur Mathematik bestand in der Entwicklung der sogenannten Exhaustionsmethode, die die Grundlagen für die Theorie der Grenzwerte legte und die Voraussetzungen für die jüngste Entwicklung der mathematischen Analysis schuf. Der Exhaustionsmethode liegt folgende Prämisse zugrunde: Wenn man von einer Größe die Hälfte oder mehr abzieht und diese Operation mit dem Rest wiederholt, so kommt man nach einer endlichen Zahl von Schritten auf eine Größe, die kleiner ist als eine beliebige vorgegebene Zahl. Mit Hilfe dieser Methode hat Eudoxos zum erstenmal streng bewiesen, daß sich die Flächen zweier Kreise zueinander verhalten wie die Quadrate ihrer Durchmesser, ein schon Hippokrates von Chios bekannter Sachverhalt. Des weiteren bewies er, daß die Rauminhalte von Kegel und Pyramide ein Drittel der Rauminhalte von Prisma bzw. Zylinder mit derselben Grundfläche und Höhe betragen, also jenen Satz, den erstmals Demokrit formuliert haben soll. Später wurde die »Exhaustionsmethode« von Archimedes weiterentwickelt. In den »Elementen« von Euklid wurde diese Methode im Buch XII dargelegt.

Eine wohl noch bedeutsamere Rolle spielte Eudoxos in der Geschichte der Astronomie, da er als Begründer der an-

tiken theoretischen Astronomie gelten darf, die seitdem eine relativ selbständige Entwicklung nahm.

Die wahre Größe des Eudoxos als Astronom wurde von den Wissenschaftshistorikern eigentlich erst im 19. Jahrhundert erkannt. Tatsächlich sind die wenigen Zeugnisse der spätantiken Autoren, zum Beispiel des Aristoteleskommentators Simplikios (6. Jh. u. Z.), die von den Leistungen des Eudoxos berichten, nur fragmentarisch und vage. Große Verdienste hat sich namentlich der italienische Astronom G. V. Schiaparelli (1835—1910) bei der Rekonstruktion der Theorie des Eudoxos erworben, die etwa folgendermaßen ausgesehen haben muß.

Bereits seit uralten Zeiten waren die griechischen Denker von der Kugelförmigkeit des Kosmos überzeugt, da die Kugel wie der Kreis als vollkommene geometrische Gebilde galten. Deshalb schien es auch sinnvoll anzunehmen, daß sich in diesem Kosmos alle Himmelskörper wie die Fixsterne gleich- und kreisförmig bewegen. Diese Annahme erwies sich jedoch bei genauerer Betrachtung der Sonne, des Mondes und besonders der Planeten als unzulässige Idealisierung. Denn vor dem Hintergrund der Fixsterne bewegen sich die Planeten scheinbar nicht einmal ständig in west-östlicher, sondern zeitweise auch in umgekehrter Richtung, wobei sie Schnörkel und Schleifen beschreiben. Das soll Platon veranlaßt haben, seinen Schülern die Aufgabe zu stellen, die Bewegungen der Himmelskörper als Kombination gleichmäßiger Kreisbewegungen darzustellen. Eudoxos löste diese Aufgabe glänzend.

Das von Eudoxos vorgeschlagene Modell des Kosmos bestand aus 27 sich gleichmäßig um die Erde drehenden homozentrischen Sphären, d. h. Sphären mit gemeinsamem Zentrum, deren Achsen unterschiedliche Richtungen haben.

Die äußerste Sphäre war die Fixsternsphäre, die in 24 Stunden eine vollständige Drehung um die Achse, die durch die Pole der Erde hindurchgeht, ausführt. Die Äquatorebene dieser Sphäre ist mit der Äquatorebene der Erde identisch. Der Sonne und dem Mond sind je drei und den fünf Planeten je vier Sphären zugeordnet.

Schauen wir uns jetzt an, wie sich mit Hilfe von drei rotierenden Sphären die sichtbaren Verschiebungen der Sonne erklären ließen. Die Drehung der ersten Sphäre fällt mit der Drehung der Fixsternsphäre zusammen, mit Hilfe dieser Drehung wurde die tägliche Bewegung der Sonne be-

schrieben. Die zweite Sphäre gibt die jährliche Bewegung der Sonne auf der Ekliptik wieder. Die Achse dieser Sphäre ist mit der ersten Sphäre fest verbunden und hat eine Neigung von ungefähr  $24^\circ$  zur Achse der ersten Sphäre. Der Äquator der zweiten Sphäre liegt in der Ebene der Ekliptik, die von den Sternbildern des Tierkreises umsäumt ist. Die zweite Sphäre dreht sich um die eigene Achse von West nach Ost, also entgegengesetzt der Drehung der ersten Sphäre, einmal vollständig im Jahr. Den größten bzw. den kleinsten Abstand hat die Sonne vom Himmelsäquator zur Zeit der Sonnenwenden; den Schnittpunkten der Ekliptik und des Äquators entsprechen die Zeiten der Tag- und Nachtgleichen. Die dritte Sphäre, an deren Äquator die Sonne befestigt ist, sollte eine schwache Neigung zu der Achse der zweiten Sphäre haben und sich sehr langsam ebenfalls von West nach Ost drehen. Nach Simplicios' Worten war die dritte Sphäre eingeführt worden, um den Umstand zu erklären, daß die Sonne an den Tagen der Sonnenwende nicht immer an ein und demselben Punkt aufgeht.

Analog wurde die Bewegung des Mondes beschrieben. Die erste Sphäre realisiert die tägliche und die zweite Sphäre die monatliche Bewegung des Mondes längs der Sternbilder des Tierkreises. Die dritte Sphäre, auf deren Äquator sich der Mond befindet, wurde im Zusammenhang mit dem Umstand eingeführt, daß die Umlaufbahn des Mondes mit der Ekliptik nicht übereinstimmt, sondern bald oberhalb, bald unterhalb davon verläuft. Die Achse dieser Sphäre war also mit der zweiten Sphäre entsprechend zu verbinden. Über die Dauer der Drehung dieser Sphäre wird in den Quellen nichts mitgeteilt; ebenso wie im Fall der dritten Sonnensphäre bezeichnet Simplicios ihre Drehung als »langsam«.

Diese Rekonstruktion unterscheidet sich etwas von der Schiaparellis; sie steht im Einklang mit den Zeugnissen der alten Autoren, die über Eudoxos geschrieben haben.

Noch komplizierter liegen für den Beobachter die Verhältnisse bei den fünf Planeten, die bei ihrer Bewegung von der Ebene der Ekliptik bald in nördliche, bald in südliche Richtung abweichen und nach bestimmten Zeitabschnitten in ihrer Bewegung längs des Tierkreises innehalten, »rückläufig« werden, um dann nach einiger Zeit, die bei den verschiedenen Planeten stark differiert, ihre normale, »rechtläufige«, Bewegung von West nach Ost fortzusetzen.

Jetzt wissen wir, daß dieses Phänomen mit der Bewegung der Erde um die Sonne zusammenhängt. Die Aufgabe der Darstellung einer solchen Bewegung durch die Kombination einiger gleichmäßiger Kreisbewegungen scheint auf den ersten Blick sehr kompliziert.

Eudoxos hat diese Aufgabe genial einfach gelöst. Für jeden Planeten hat er vier sich gleichmäßig drehende Sphären eingeführt. Die erste Sphäre entsprach wieder einer Tag- und-Nacht-Drehung des Himmelsgewölbes um die Weltachse. Die zweite Sphäre diente der Beschreibung der »rechtläufigen« Bewegung des Planeten in siderischer Periode (diese Periode bezeichnet den Zeitraum, nach dessen Ablauf der Planet wieder am selben Punkt des Tierkreises erscheint). Als Sonderfall erscheinen Merkur und Venus, die nie in Opposition zur Sonne gelangen und also mit ihr im Jahresrhythmus die Sternbilder des Tierkreises passieren. Aus diesem Grund nahm Eudoxos an, daß die siderische Periode für diese beiden Planeten mit dem Sonnenjahr zusammenfällt (in Wirklichkeit beträgt sie 88 Tage für den Merkur und 225 Tage für die Venus). Die siderischen Perioden der übrigen Planeten gibt Eudoxos in ziemlich guter Übereinstimmung mit den modernen Werten an.

Für die Darstellung des »schleifenförmigen« Laufes der Planeten längs der Ekliptik benutzte Eudoxos die dritte und vierte Sphäre. Die dritte Sphäre besitzt Pole, die starr an zwei Äquatorpunkte der zweiten Sphäre (d.h. der Ekliptik) gebunden sind, und bewegt sich, ähnlich wie die zweite Sphäre, von Westen nach Osten. Die Pole dieser Sphäre sind für die verschiedenen Planeten unterschiedlich, nur für den Merkur und die Venus erweisen sie sich als übereinstimmend. Die vierte Sphäre dreht sich entgegengesetzt, aber in der gleichen Periode wie die dritte, nämlich in synodischer Periode. Nach Ablauf dieser Zeit nimmt der Planet wieder die gleiche Stellung relativ zur Sonne ein. Die für Saturn, Jupiter, Venus und Merkur überlieferten Werte stimmen recht gut mit den modernen überein.

Es läßt sich zeigen, daß durch diese Kombination der dritten und vierten Sphäre der Planet um die Ekliptik eine eigentümliche Kurve beschreibt, die an eine Acht erinnert (Abb. 5). Diese Kurve nannte Eudoxos Hippopede (»Pferdefessel«); heute nennt man sie Lemniskate. Wenn man die entsprechenden Winkel der Neigung zwischen den Achsen der dritten und der vierten Sphäre addierte, konnte man

ziemlich genau die schleifenförmige Bewegung des Jupiters und des Saturns wiedergeben. Für die übrigen Planeten allerdings waren die Ergebnisse bedeutend weniger zufriedenstellend; so kann man die rückläufige Bewegung des Mars und der Venus aus dem Modell des Eudoxos überhaupt nicht gewinnen. Wir wissen nicht, inwieweit sich Eudoxos der Mängel seines Modells bewußt war. Offenbar sind sie bald augenscheinlich geworden, denn einige Zeit später bot Kallippos ein verbessertes, wenn auch etwas komplizierter gestaltetes (im Vergleich zu dem von Eudoxos) Modell des Kosmos an, von dem noch die Rede sein wird.

Fassen wir noch einmal die prinzipiellen Besonderheiten des Modells von Eudoxos zusammen, die sich in allen spä-

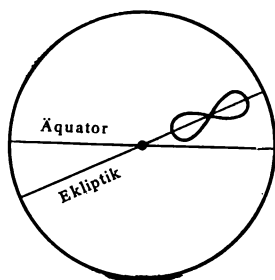


Abb. 5. Die »Hippopede« des Eudoxos

teren homozentrischen Kosmosmodellen wiederholen. Jedem Himmelskörper (mit Ausnahme der Fixsterne) wird eine bestimmte Anzahl sich gleichmäßig drehender Sphären zugeweiht. Diese Sphären sind miteinander verbunden, aber völlig unabhängig von den Sphären anderer Himmelskörper. Ihre Verbindung sieht so aus, daß die Pole der jeweils nächsten Sphäre an fixierten Punkten mit der vorangehenden Sphäre verbunden sind; dadurch beteiligt sich jede Sphäre außer an der Eigendrehung auch an den Drehungen aller vorangehenden (äußeren) Sphären. Der Himmelskörper selbst ist fest an einen bestimmten Punkt des Äquators der letzten (innersten) Sphäre angebracht. Die erste (äußerste) Sphäre ist in ihrer Bewegung den ersten Sphären aller übrigen Planeten sowie der Sphäre der Fixsterne gleich. Nach den Zeugnissen der antiken Autoren war Eudoxos nicht nur Theoretiker, sondern auch ein erstklassiger Beobachter. In Kyzikos erbaute er die erste griechische Sternwarte, von der aus seine Schüler systematisch den Himmel beobachteten. Er lieferte eine detaillierte Beschreibung der

Sternbilder für die geographische Breite Griechenlands und erstellte einen Katalog des Sternenhimmels. Überliefert wurden uns die Titel zweier astronomischer Schriften von Eudoxos — »Phainomena« (»Erscheinungen«) und »Enoptron« (»Spiegel«), die laut Hipparch ein und denselben Fragen gewidmet waren und sich nur in Details voneinander unterschieden. Aufgrund dieser Aufsätze schrieb der Schriftsteller Aratos im 3. Jahrhundert v. u. Z. ein Lehrgedicht, das die Sternbilder und die mit ihnen verbundenen Sagen kurzweilig beschreibt. Dieses Gedicht, das ebenfalls »Phainomena« heißt, erfreute sich im Altertum großer Beliebtheit, zumal es auch auf Fragen der Wetterprognose einging, es war lange die populärste Quelle astronomischer Kenntnisse.

Unter den direkten Schülern von Eudoxos nennen die alten Quellen zwei hervorragende Mathematiker, Menaichmos und Deinostratos, sowie den Astronomen Polemarch, der seinerseits Lehrer des Kallippos aus Kyzikos war. In den zwanziger Jahren des 4. Jahrhunderts v. u. Z. hielt sich Kallippos in Athen auf, wo er Aristoteles kennenlernte, von dem wir die Veränderungen erfahren, die Kallippos am Modell des Eudoxos vorgenommen hat. Laut Simplicios hat Kallippos keine Bücher geschrieben, in denen er seine Theorie darlegte.

Wie wir oben gesehen haben, hat das Modell von Eudoxos für den Jupiter und den Saturn gute Ergebnisse geliefert. Deshalb behielt Kallippos wohl auch die Zahl der Sphären für die beiden äußeren Planeten bei, fügte aber beim Merkur, bei der Venus und beim Mars je eine Sphäre hinzu. Über deren Funktion machen die antiken Quellen allerdings keinerlei Angaben. Außerdem nahm Kallippos für die Sonne und den Mond noch je zwei weitere Sphären an. So konnte er die unterschiedliche Dauer der Jahreszeiten erklären, die seit der Zeit Euktemons gut bekannt waren, sowie die Unregelmäßigkeiten der Mondbewegung berücksichtigen, die in Eudoxos' Modell unerklärt blieben.

Die Gesamtanzahl der Himmelssphären einschließlich der Fixsternsphäre betrug also bei Kallippos 34.

Den nächsten wichtigen Schritt auf dem Weg der Konstruktion eines allgemeinen Bildes der Welt tat der Platonischüler Herakleides Pontikos, der in Herakleia, einer Stadt an der Südküste des Schwarzen Meeres, geboren wurde. Die Werke dieses außergewöhnlichen Denkers sind uns nicht überliefert. Wir wissen jedoch aus indirekten Zeugnissen,

daß er die sichtbare tägliche Bewegung des Himmelsgewölbes nicht mit Drehungen von äußeren Himmelsphären um die Erde erklärte, sondern mit der Drehung der Erde um ihre eigene Achse. Die alten Quellen berichten, daß die Hypothese von der Drehung der Erde um ihre eigene Achse schon lange vor Herakleides von dem Pythagoreer Ekphantos aus Syrakus aufgestellt wurde. Doch über den letzteren wissen wir sonst kaum etwas.

Herakleides von Pontikos wird noch eine andere kühne Hypothese zugeschrieben. Bekanntlich entfernen sich Merkur und Venus nicht weit von der Sonne, sondern befinden sich bald auf der einen, bald auf der anderen Seite davon. In diesem Zusammenhang soll Herakleides angenommen haben, daß sich Merkur und Venus auf eigenen Kreisen bewegen, deren Mittelpunkte ihrerseits mit der Sonne gleichläufig um die Erde kreisen. Wenn diese Überlieferungen auf Tatsachen beruhen und richtig interpretiert sind, hat Herakleides Pontikos also viel zur Vorbereitung des heliozentrischen Systems von Aristarch beigetragen. Eine solche Annahme war unter einem weiteren Aspekt bedeutsam. Der auffälligste Mangel der Modelle von Eudoxos und Kallippos bestand nämlich darin, daß sie die deutlichen Helligkeitsschwankungen der Planeten unerklärt ließen, da sich in diesen Modellen die Planeten immer in ein und demselben Abstand von der Erde befinden. Besonders augenfällig waren diese Schwankungen aber für Merkur und Venus, was sich durch die Annahme ihrer Bewegung »um die Sonne« zwanglos erklärte.

Die Schaffung von Kosmosmodellen, die auf der Vorstellung sich gleichmäßig drehender Sphären fußen, stimuliert die Entwicklung der sphärischen Geometrie sowie der Kinematik beweglicher Punkte, Kreise und Sphären. Es besteht kein Zweifel, daß derartige Untersuchungen in der Schule von Eudoxos und möglicherweise sogar in der platonischen Akademie durchgeführt wurden. Doch darüber wissen wir nichts. Wir sind lediglich im Besitz von zwei kurzen Aufsätzen, die Ende des 4. Jahrhunderts v. u. Z. von einem gewissen Autolykos von Pitane geschrieben wurden. Der erste lautet »Über die rotierende Kugel« und enthält eine rein abstrakte Behandlung der Lageveränderung von Punkten und Kreisen auf einer Sphäre, die sich mit gleichbleibender Geschwindigkeit dreht. Reale astronomische Objekte werden in diesem Aufsatz nicht erwähnt. Der zwei-

te Aufsatz, »Über den Auf- und Untergang der Fixsterne«, ist konkreter; er handelt von der Sonne und den zwölf Tierkreiszeichen, von den Aufgängen und Untergängen der Sterne, die sich auf dem Tierkreis und unterhalb davon befinden. Diese kurzen Traktate des Autolykos sind die frühesten griechischen Arbeiten astronomisch-theoretischen Charakters, die bis in unsere Zeit überliefert wurden.

## Aristoteles

Das allumfassende wissenschaftlich-philosophische System des Aristoteles stellte eine Synthese aller Errungenschaften der griechischen Wissenschaft der vorangegangenen Periode dar. Obwohl es weit über die frühe Naturlehre hinausging, kann man es in gewisser Hinsicht doch als ihren Höhepunkt ansehen. Im System des Aristoteles spiegelte sich das Weltbild wider, das der Erkenntnis zur Zeit der Antike am meisten entsprach. Die Physik, die Ethik, die Politik, die naturwissenschaftlichen und humanwissenschaftlichen Bestrebungen wurden von Aristoteles zu einer Einheit geführt, die, wenn auch nicht fehlerlos, in ihrer Universalität begeisternd war. Gerade diese Universalität sicherte der Lehre von Aristoteles eine ungewöhnliche Langlebigkeit, besonders in jener Epoche (Mittelalter), als die einzelwissenschaftlichen Disziplinen (deren erfolgreiche Entwicklung im 3. Jh. v. u. Z. bis 3. Jh. u. Z. begann) sich im Zustand der Stagnation und des Verfalls erwiesen.

Aristoteles, Sohn des Nikomachos, des Leibarztes des makedonischen Königs Amyntas, wurde 384 v. u. Z. in Stageiros, einem kleinen Städtchen auf der Chalkidike, geboren. Im Alter von 17 Jahren kam er nach Athen, wo er in Platons Akademie ungefähr zwanzig Jahre lernte und lehrte. Bereits zu dieser Zeit schrieb er einige Dialoge, von denen uns aber nur geringfügige Fragmente erhalten geblieben sind. Im Jahre 348 verließ er nach Platons Tod Athen und verbrachte einige Jahre am Hellespont und auf der Insel Lesbos. Bald erhielt er eine Einladung des makedonischen Königs Philipp II., um dessen Sohn Alexander zu erziehen. Diese Stellung hatte er über drei Jahre inne (343—340); im Jahre 335 kehrte er nach Athen zurück, wo er eine eigene wissenschaftliche Schule, das Lykeion, gründete, das er fast bis an das Ende seines Lebens leitete. Nach dem Tod Alexanders und dem Zusammenbruch des makedoni-

schen Imperiums (323) war Aristoteles gezwungen, Athen zu verlassen; er ging auf die Insel Euböa ins Exil, wo er 322 in Chalkis starb.

Die Schriften des Aristoteles, die uns als Bestandteile des sogenannten Corpus Aristotelicum überliefert sind, entstanden offensichtlich zu jener Zeit, als Aristoteles im Lykeion lehrte. Viele dieser Schriften waren nichts anderes als die Konspekte dieser Vorlesungen, und einige davon werden überhaupt fälschlicherweise Aristoteles zugeschrieben. Die erste wissenschaftliche Ausgabe des »Corpus Aristotelicum« ist die der Preußischen Akademie der Wissenschaften, Berlin 1831—1870.

Die naturwissenschaftlichen Anschauungen Aristoteles' sind nicht von seinen philosophischen Prinzipien zu trennen; deshalb macht es sich erforderlich, wenigstens in Kürze auf die Grundthesen seiner Philosophie einzugehen.

Eckstein der Philosophie Aristoteles' ist die Lehre von Materie und Form. Im Unterschied zu Platon war Aristoteles der Ansicht, daß nicht das Allgemeine, nicht die Idee, nicht die Zahl wahres Sein besitzen, sondern ein konkretes einzelnes Ding. Nur so ein Ding kann ein Wesen (Substanz) sein, d. h. etwas Eigenständiges, in sich Wesentliches, das in unserem Denken als Subjekt des Urteils und nicht als sein Prädikat oder Attribut fungiert. Jedes einzelne Ding stellt eine Einheit von Materie und Form dar. Die Materie ist das, woraus das Einzelding entsteht, was als Material (Substrat) angesehen werden kann, aus dem es besteht. Aber das Ding ist nicht auf die bloße Materie reduziert: Damit es ein Ding wird, muß die Materie eine Form annehmen; ohne Form ist die Materie nur ein mögliches Ding, aber kein wirkliches. Andererseits kann die Form allein kein Ding in seiner lebendigen, einzelnen Aktualität werden: Form ohne Materie ist auf der Ebene der Erkenntnis nur der Begriff des Dinges und auf der Ebene des Seins das Wesen des Dinges. Die Form für sich allein ist etwas Allgemeines. Damit sie ein einzelnes Ding werden kann, muß sie sich mit der Materie verbinden; die Verbindung der Materie mit der Form ist die Realisierung des Möglichen, d. h. die Entstehung eines real existierenden konkreten Dinges.

Die Begriffe Materie und Form sind nach Aristoteles nicht absolut, sondern bedingen sich gegenseitig. Das, was in einer Beziehung Materie ist, kann in einer anderen Be-

ziehung Form sein. Als Beispiel der Einheit von Materie und Form führt Aristoteles die Bronzestatue an. Als Materie der Statue dient in dem gegebenen Fall Bronze. Aber der Bronzeklumpen, aus dem die Statue gegossen wurde, war doch auch ein einzelnes, aktuell existierendes Ding und hatte folglich ebenfalls eine Form, eine äußere Gestalt oder ein Wesen (*eidos*), dessen Stoffgrundlage die Elemente Feuer, Luft, Wasser und Erde sind, aus deren Verbindung in bestimmten Proportionen ein Stoff entsteht, den man als Bronze bezeichnen kann. Aber auch diese vier Elemente sind nicht ohne Form; jedes Element ist durch eine bestimmte Kombination von Qualitäten gekennzeichnet und hat folglich auch ein Wesen. Nur die Urmaterie (*protē hylē*), der man überhaupt keine Qualität zuschreiben kann, ist absolut formlos; sie kann nicht als einzelnes, aktuell existierendes Ding erscheinen, sie ist die reine Möglichkeit.

Und so stehen in der Hierarchie der Welt der Dinge auf der untersten Ebene nach der Urmaterie die vier »Elemente« oder, wie sie Aristoteles nannte, die vier *stoicheia* (»Buchstaben«); diese Bezeichnung deutet darauf hin, daß die Dinge aus Verbindungen von Elementen entstehen, so wie die Wörter aus Verbindungen von Buchstaben entstehen. Jedes Element ist eine Urmaterie, die unter Einwirkung von Heißem, Trockenem, Kaltem, Feuchtem eine Form erhält. Aus der Verbindung des Trockenen und des Heißen entsteht Feuer, das Trockene und das Kalte ergibt die Erde, das Heiße und das Feuchte die Luft, das Kalte und das Feuchte das Wasser. Im Unterschied zu den vier »Wurzeln« des Empedokles können die Elemente des Aristoteles im Prinzip ineinander übergehen (diese Übergänge wurden bei ihm mit dem Terminus *alloiosis* bezeichnet). Des weiteren können die Elemente alle möglichen Verbindungen eingehen und dabei verschiedene Stoffe bilden, die bei Aristoteles *Homöomeren* (*ta homoiomere*) heißen. In der organischen Natur gelten als homogene Substanzen das Fleisch, das Blut, das Holz und andere Gewebe oder Flüssigkeiten des tierischen oder pflanzlichen Organismus. Auf der nächsten Ebene in der Hierarchie des Seins befinden sich die Dinge, die sich nicht in gleichartige Teile zerlegen lassen; zu diesen gehören zum Beispiel einzelne Organe, das Auge, die Hand, das Herz usw., sowie Dinge, die der Mensch geschaffen hat, Haus, Tisch, Statue usw.

Für die Erklärung der Bewegung, Veränderung und Ent-

wicklung in der Welt nimmt Aristoteles vier Ursachen an: Material-, Formal-, Wirk- und Zweckursache. So sind die Ursachen dafür, daß aus der Bronze eine Statue wird, erstens die Bronze selbst (Materialursache), zweitens die Tätigkeit des Bildhauers (Wirkursache), drittens die Form, die die Bronze im Ergebnis dieser Tätigkeit annimmt (Formalursache) und viertens das Ziel, das sich der Bildhauer gestellt hat (Zweckursache oder das »Weswegen«, wie Aristoteles gewöhnlich sagt). Es läßt sich leicht erkennen, daß die drei letzten Ursachen sich überschneiden und der ersten, der Materialursache, gegenüberstehen. Denn das Ziel, das sich der Bildhauer gestellt hat, bestand ja darin, der Bronze eine bestimmte Form zu verleihen, aber die Formgebung und folglich auch die Erreichung des Ziels konnten nur durch eine bestimmte Tätigkeit verwirklicht werden.

Analog betrachtet Aristoteles die Prozesse in der organischen Welt; nur befindet sich dort die Quelle der Bewegung, der Veränderung oder des Wachstums — nicht außerhalb des Dinges (wie im Fall der Statue), sondern in ihm selbst. Diese Quelle ist die »Natur« (physis). Aristoteles analysierte die unterschiedliche Verwendung von »physis« und legte dar, daß Natur in seinem Verständnis ein den Dingen innewohnendes Prinzip (Gesetz) der Bewegung oder der Veränderung ist. In diesem Punkt ist Aristoteles ein direkter Nachfolger der Denker der vorsokratischen Epoche.

Im Zusammenhang mit dem Begriff der Natur führt Aristoteles die erste Definition der Wissenschaft Physik an. Die Physik sei die Wissenschaft über die Natur, d. h., sie untersuche eine bestimmte Art des Seins, die in sich das Prinzip der Bewegung und der Ruhe birgt. Hieraus folgt, daß sie keine Wissenschaft über eine Tätigkeit (wie z. B. die Politik) oder eine Wissenschaft über das Schöpfertum (z. B. die Poetik) sei, da in diesen Wissenschaften das Prinzip oder der Beginn entweder in dem Tätigen ist, der eine Entscheidung trifft, oder in dem Schöpfer, der der Materie diese oder jene Form verleiht. Wie auch die Mathematik sei die Physik eine theoretische Disziplin. Ihr Unterschied zur Mathematik bestehe jedoch darin, daß sie es mit einem solchen Sein zu tun habe, das sich bewegen kann, und mit solchen Formen und Gestalten, die nicht von der Materie zu trennen sind. Wenn wir der Physik des Aristoteles unser heutiges Verständnis gegenüberstellen, so sehen wir, daß Aristoteles zur Physik nicht nur die ganze anorganische,

sondern auch die ganze organische Natur — einschließlich des Menschen und seiner Seele — zählt.

Auf diese Weise kann man die Aristotelische Physik als Synonym für Naturwissenschaft im weitesten Sinne dieses Wortes betrachten.

Grundsätzlich neu war bei Aristoteles — im Vergleich zu seinen Vorgängern — die Verwendung der Idee der Natur zur Erklärung der mechanischen Formen der Bewegung. Jeder Körper besitzt nach Aristoteles eine natürliche, ihm von Natur aus (physei) eigene Form der Bewegung. Für die irdischen Körper sei solch eine natürliche Bewegung die Bewegung entlang einer geraden Linie zum Zentrum des Kosmos oder vom Zentrum zur Peripherie. Schwere Dinge, die Erde, das Wasser sowie die aus ihnen zusammengesetzten Körper, bewegen sich von Natur aus zum Zentrum des Kosmos, d. h., sie fallen nach unten; das Feuer hingegen, die Luft und alle leichten Dinge, die vorwiegend aus diesen zwei Elementen bestehen, entfernen sich von Natur aus vom Zentrum, d. h., sie steigen nach oben. Eine dieser natürlichen Richtung entgegengesetzte Bewegung sowie jede andere Form der Bewegung, zum Beispiel im Kreis oder in irgendeiner anderen Kurve, ist der Natur dieser Körper nicht gemäß und kann nur gewaltsam vonstatten gehen. Ein anderes Bild bietet sich uns in der supralunaren Welt: Die natürliche Bewegung für die Himmelskörper ist die gleichmäßige Drehung auf einem Kreis um das Zentrum des Kosmos, d. h. um die Erde.

Das Gesagte bildet die Grundlage für Aristoteles' Kosmologie, die am ausführlichsten in seiner Schrift »Über den Himmel« dargelegt ist. Bleiben noch zwei Thesen hinzuzufügen, die in seinem System von fundamentaler Bedeutung sind. Die erste besteht in der Negierung der aktuellen Unendlichkeit, die die Vorstellung von einer begrenzten und endlichen Welt notwendig macht; die zweite in der Negierung der Leere. Diese beiden Thesen stehen den kosmologischen Prinzipien des Demokrit, mit dem Aristoteles viel und ausführlich polemisierte, diametral gegenüber. Der Kosmos ist bei Aristoteles begrenzt, er hat die Form einer Kugel, außerhalb welcher weder Raum noch Zeit existieren. Dieser Kosmos sei ewig und unbeweglich; er sei weder als Ergebnis des Schöpfungsaktes (wie bei Platon) noch im Laufe des natürlichen kosmogonischen Prozesses (wie bei den Vorsokratikern) entstanden. Er sei angefüllt mit materiellen

Körpern, die im sublunaren Bereich aus den vier Elementen Feuer, Luft, Wasser, Erde gebildet wurden. Das sei der Bereich des Veränderlichen und Vergänglichen; in ihm verlaufen die Prozesse der Entstehung, des Wachstums und des Untergangs aller möglichen Dinge, auch der Lebewesen. Davon verschieden sei der »supralunare« Bereich, in dem weder Platz für die Entstehung noch für den Untergang ist, in dem sich nur die Himmelskörper befinden — die Sterne, die Planeten, der Mond und die Sonne, die ihre ewigen Kreisbahnen ziehen. Es ist der Bereich des fünften Elements, des Äthers, den Aristoteles gewöhnlich als »ersten Körper« (proton soma) bezeichnete. Der Äther sei gänzlich ungemischt, ewig und gehe in keine anderen Elemente über, er besitze weder Schwere noch Leichtigkeit, und seine natürliche Bewegung sei die Kreisbewegung. Er sei nicht überall gleich rein; das treffe besonders für die Grenzschicht mit dem Mondbereich zu, wo er mit dem Feuer und der Luft benachbart ist, im ganzen jedoch sei er das »göttlichste« aller fünf Elemente.

Im Zentrum des Kosmos befinde sich in Form einer Kugel die Erde. Die Kugelförmigkeit der Erde wird von Aristoteles sowohl deduktiv als auch durch Argumente, die auf Beobachtungen beruhen, bewiesen. Bei Aristoteles findet sich der erste Beleg einer Schätzung der Dimensionen der Erdkugel, deren Durchmesser bei ihm etwa zweimal größer ist als in der Realität. Außerdem behauptete er, daß die Erde unbeweglich sei und sich nicht um ihre Achse drehe. Den Himmelskörpern sei ebenfalls die Kugelform (als die vollkommenste aller möglichen Formen) eigen. Was die Bewegung der Himmelskörper betrifft, so stützte sich Aristoteles auf die Ergebnisse von Eudoxos und Kallippos. Allerdings wurde das, was bei den Astronomen nur Modell war, bei Aristoteles zum realen Mechanismus der Bewegung der Himmelskörper. Den supralunaren Bereich des Kosmos stellte er in Form sich berührender Sphären dar, die von Äthernatur sind und sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten gleichmäßig um die verschiedenen Achsen drehen. An einigen dieser Sphären seien Himmelskörper befestigt, die ebenfalls aus Äther bestehen (allerdings nicht aus durchsichtigem, sondern aus leuchtendem). Die äußere Sphäre, die Fixsternsphäre, teile ihre tägliche Bewegung der ihr folgenden Sphäre mit, die die äußere Sphäre des Saturns ist, diese wiederum übertrage ihre Bewegung auf die zwei-

te Sphäre des Saturns, die ihrerseits eine Eigenbewegung um die zur Ebene der Ekliptik orthogonale Achse besitzt, usw. Nachdem wir die Bewegung der vier Sphären des Saturns betrachtet haben, wollen wir zum Jupiter übergehen. Es ist klar, daß die Sphären des Saturns die Drehung der Sphären des Jupiters auf keine Weise beeinflussen dürfen, denn sonst würde das heißen, daß der Jupiter außer seinen Eigenbewegungen alle Bewegungen des Saturns wiederholt. Um dem zu entgehen, nimmt Aristoteles zwischen der inneren Sphäre des Saturns und der äußeren Sphäre des Jupiters drei weitere Sphären an, die die Drehungen der drei inneren Sphären des Saturns wiederholen, allerdings in umgekehrter Richtung, wodurch sie sie zurückrollen. Damit wird nur die Bewegung einer Sphäre — der äußeren Sphäre des Saturns, die sich in 24 Stunden einmal um die Weltachse dreht — auf die äußere Sphäre des Jupiters einwirken. Analog dazu führt Aristoteles nach jedem der fünf Planeten und nach der Sonne drei oder vier zurückrollende Sphären ein. Für den Mond erübrigt sich das, da er der letzte Himmelskörper ist, der eine Drehung auf einer Kreisbahn ausführt. Somit ergeben sich bei Aristoteles 56 Sphären (s. Tab. 2).

**Tabelle 2**

**Unterschiede in der Struktur der drei homozentrischen Kosmosmodelle**

| Himmelskörper | Zahl der Himmelssphären  |                            |                              |
|---------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|
|               | im Modell<br>des Eudoxos | im Modell<br>des Kallippos | im Modell<br>des Aristoteles |
| Fixsterne     | 1                        | 1                          | 1                            |
| Saturn        | 4                        | 4                          | 4+3 zurückrollende           |
| Jupiter       | 4                        | 4                          | 4+3                          |
| Mars          | 4                        | 5                          | 5+4                          |
| Venus         | 4                        | 5                          | 5+4                          |
| Merkur        | 4                        | 5                          | 5+4                          |
| Sonne         | 3                        | 5                          | 5+4                          |
| Mond          | 3                        | 5                          | 5                            |
| Insgesamt     | 27                       | 34                         | 56                           |

Die Frage nach der Quelle der Bewegung der Himmelskörper wurde bei Aristoteles nicht eindeutig beantwortet. In seiner Schrift »Über den Himmel« wird die Kreisbewegung der äußeren, der Fixsternsphäre, als ihr ursprüngliches, »göttliches« Merkmal behandelt. In den letzten Büchern der »Physik« und der »Metaphysik« entwickelt Aristoteles die Konzeption von dem ewig wirkenden »Ersten Bewegenden« (Gott), der, selbst unbeweglich, die Himmelsphären in Bewegung hält. Im achten Kapitel des Buches XII der »Metaphysik«, in dem sich direkte Verweise auf Eudoxos und Kallippos befinden, läßt Aristoteles dem höchsten Antrieb, der die Fixsternsphäre bewegt, die Existenz weiterer ewiger und unbeweglicher göttlicher Wesen zu, die für die Bewegung der übrigen Himmelsphären zuständig sind und in der Welthierarchie eine niedere Stellung einnehmen als der Erste Bewegter. Im Mittelalter wurde diese Konzeption, den Bedürfnissen der christlichen Theologie entsprechend, von Thomas von Aquin weiterentwickelt.

Während für den »supralunaren« Bereich ewige, gleichmäßige Kreisbewegungen charakteristisch sind, können beliebige Bewegungen im »sublunaren« Bereich lediglich örtlich und zeitweilig sein. Sie werden in natürliche Bewegungen unterteilt, deren Ursache in der Natur des sich bewegenden Körpers liegt, sowie in gewaltsame, d. h. solche, die nur unter Einwirkung einer äußeren Kraft vor sich gehen. Die Analyse der gewaltsamen Ortsveränderungen brachte Aristoteles auf das erste Konzept der Dynamik, deren Grundbegriffe Kraft, Geschwindigkeit und Widerstand sind. Die Kraft wird von Aristoteles als Ursache der Bewegungen definiert. Da Aristoteles der Ansicht war, daß mit dem Aufhören der Ursache auch ihre Wirkung aufhört, muß in seiner Dynamik die Bewegung eines Körpers durch eine auf ihn ständig wirkende Kraft aufrechterhalten werden. Die Geschwindigkeit des in Bewegung gebrachten Körpers ist der auf ihn wirkenden Kraft proportional; eine Veränderung der Kraft bringt eine entsprechende Veränderung der Geschwindigkeit des Körpers mit sich. Als Ursache dafür, daß sich ein in Bewegung gebrachter Körper auch weiter bewegt, wenn er von der Quelle der Bewegung getrennt wurde, sieht Aristoteles in der den Körper umgebenden Luft. Ohne Luft oder ein anderes transportierendes Medium also keine Bewegung! Zugleich aber hemmt das den Körper umgebende Medium die Bewegung des Körpers. Die Geschwin-

digkeit des Körpers ist dem Verhältnis der auf ihn einwirkenden Kraft zum Widerstand des Mediums proportional. Wenn es keinen Widerstand des Mediums gäbe, könnte eine beliebige Kraft dem Körper eine unendlich hohe Geschwindigkeit verleihen. Das ist eines der Argumente von Aristoteles für die Unmöglichkeit der Existenz der Leere. Die Aristotelische Dynamik ist eine Dynamik der Körper, die sich in einem materiellen Medium bewegen.

Neben der Betrachtung der mechanischen Bewegungen entwickelte Aristoteles eine allgemeine Theorie der qualitativen Veränderungen und Verwandlungen der Körper, die er in der Schrift »Über Entstehen und Vergehen« sowie im vierten Buch der »Meteorologie« darlegte.

Aristoteles hat zwar kein speziell mathematisches Werk verfaßt, doch er war mit der Mathematik bestens vertraut, so daß sich in seinen Büchern viele wichtige Hinweise finden, die einen unmittelbaren Bezug auf die mathematischen Wissenschaften haben. Die Mathematik rechnete er neben der Physik und der »ersten Philosophie« zu den theoretischen Disziplinen. Gegenstand der Mathematik ist seines Erachtens nicht irgendeine Klasse von sinnlich wahrnehmbaren Objekten, sondern gewisse Eigenschaften, die allen Objekten eigen sind — jene Eigenschaften, die etwas mit der Kategorie der Quantität zu tun haben. Unter die Kategorie der Quantität fallen die diskreten und die kontinuierlichen Größen. Die quantitativen Eigenschaften untersucht die Mathematik, indem sie sich von allen sinnlich wahrnehmbaren Eigenschaften der Gegenstände abstrahiert. Deshalb werden mathematische Wahrheiten nicht durch die Sinnesorgane, sondern durch die Vernunft erkannt. Das bestimmt auch die Besonderheiten der mathematischen Methode: Die Mathematik geht von Definitionen und Axiomen aus, d. h. von unbestreitbaren Prämissen, von denen — auf dem Wege des logischen Schließens — Theoreme und andere Folgerungen abgeleitet werden. Charakteristisch ist, daß Aristoteles bei seiner Beweisführung in der »Zweiten Analytik« fast nur mathematische Beispiele verwendete.

Neben der reinen Mathematik unterschied Aristoteles auch eine Reihe von Disziplinen, die die quantitativen Eigenschaften von Objekten bestimmter Klassen untersuchen. Das sind die Astronomie, die Mechanik, die Optik, die Harmonielehre usw. Diese Wissenschaften haben sowohl eine Beziehung zur Physik als auch zur Mathematik: Ihrem Ge-

genstand nach stehen sie der Physik, ihren Methoden nach der Mathematik näher.

Einen wichtigen Platz nehmen im wissenschaftlichen Nachlaß des Aristoteles seine Aufsätze über die Lebewesen ein; vier große und elf kleine biologische Schriften wurden uns überliefert. In diesen Schriften tritt Aristoteles als Begründer der biologischen Wissenschaft hervor, so daß die Behauptung, Aristoteles wäre trotz seiner Universalität als Gelehrter vor allem und in erster Linie Biologe, zutreffen, dürfte.

Aristoteles' Aufmerksamkeit gehörte sowohl der Tier- als auch der Pflanzenwelt. Doch die botanischen Schriften des Aristoteles waren von geringerer Bedeutung und sind nicht überliefert worden. Letzteres läßt sich auch dadurch erklären, daß sein Schüler Theophrastos das Studium der Pflanzen in hervorragender Weise fortsetzte und seinen Lehrer darin weit übertraf. Alle zoologischen Schriften blieben dagegen erhalten und vermitteln eine Vorstellung über Aristoteles' Wirken als Naturforscher.

Beeindruckend ist vor allem der Umfang des Materials, das Aristoteles zur Verfügung stand. Er schöpfte nicht nur aus eigenen Beobachtungen, sondern auch aus Erzählungen von Jägern, Fischern, Hirten, Ärzten usw. In seinen Arbeiten beschrieb er 495 verschiedene Tierarten, darunter 160 Vogelarten, 120 Fischarten, 60 Säugetierarten, 60 Insektenarten usw. (das übersteigt die Anzahl der Arten, die wir in der »Naturgeschichte« des Plinius finden, die mehrere Jahrhunderte später geschrieben wurde). Das Verbreitungsgebiet der von Aristoteles untersuchten Fauna erstreckte sich auf die Inselgruppen des Ägäischen Meeres, vor allem Makedonien, Troas und die Insel Lesbos.

Aristoteles schuf die erste Klassifikation der Tierwelt. Er unterschied blutlose (*ta enaima*) und blutführende (*ta anaima*) Tiere. Da Aristoteles unter Blut nur das rote Blut verstand, fiel diese Unterteilung mit der in Wirbeltiere und Wirbellose zusammen. Aristoteles verwies unter anderem auch darauf, daß die Tiere mit Blut eine Wirbelsäule und in der Regel vier Gliedmaßen haben, doch er legte diese Fakten nicht seiner Klassifizierung zugrunde. Die Tiere mit Blut wurden in lebendgebärende Vierbeiner, eierlegende Vierbeiner, Zweibeiner (Vögel) und Beinlose (Fische) unterteilt. Außerdem hob Aristoteles zwei Gruppen heraus, die nicht in seine Klassifizierung paßten: die im Wasser Lebendgebärenden (Wale, Delphine), die fliegenden Lebendgebä-

renden (Fledermäuse) und die Schlangen. Jedoch ordnete er diese Gruppen nach anderen Merkmalen, entweder zu den lebendgebärenden Vierbeinern (Säugetieren) oder zu den eierlegenden Vierbeinern (Kriechtieren). Der Vergleich der Tiere nach ihrem inneren Aufbau brachte Aristoteles darauf, die Lebewesen hierarchisch nach einer bestimmten Skala anzuordnen (das war der früheste Versuch, eine »Leiter der Natur« aufzustellen).

Die biologischen Schriften von Aristoteles (und vor allem die fundamentale »Tiergeschichte«) enthalten eine Menge von Informationen über die Lebensweisen und Gewohnheiten der Tiere, über die Art und Weise ihrer Vermehrung, über die Zeiten der Begattung und den Verlauf der Trächtigkeit bei den lebendgebärenden Tieren, über den Bau von Nestern und das Eierlegen der Vögel, über die Entwicklung der Fische usw. Aristoteles beschreibt die Lebensräume der Tiere, ihre Ernährung, ihre Wanderungen, ihren Winterschlaf, das Haaren, Federn, Häuten sowie die Brutpflege und untersucht günstige und ungünstige Lebensbedingungen für die Tiere.

In seiner Schrift »Über die Entstehung der Tiere« analysiert Aristoteles die Embryologie des Menschen und der Tiere. Es werden auch die Geschlechtsunterschiede, die Erbfolge von Merkmalen, die Entstehung von Miß- und Mehrlingsgeburten oder die Formierung von Merkmalen in der nachembryonalen Entwicklung behandelt.

Von der Genauigkeit der Angaben, über die Aristoteles verfügte, zeugt folgende Tatsache: Er schrieb, daß es eine Gruppe lebendgebärender Fische gibt (Haie und Rochen) und vermerkte, daß bei einem Haifisch (galeios) die Eier durch ein Organ in der Gebärmutter befestigt werden, das der Plazenta der lebendgebärenden Vierbeiner ähnelt. Diese Beobachtung wurde jahrhundertlang für falsch gehalten, und erst Mitte des 19. Jahrhunderts bewies der deutsche Zoologe Johannes Müller ihre Richtigkeit.

Ein anderes Beispiel. In einem Kapitel der »Tiergeschichte« schreibt Aristoteles, daß Sepien, Kalmare und Tintenfische zwei lange Saugrüssel haben, die die Achtfüßer nicht besitzen, mit deren Hilfe sie Nahrung packen, zum Maul führen, sich im Winter an Felsen festsaugen und in dieser Lage gleich vor Anker liegenden Schiffen verharren. Diese Beobachtung blieb lange Zeit unbelegt, aber am Ende erwies sie sich als absolut richtig. Der große Naturforscher

des 19. Jahrhunderts, G. Cuvier, der die Anatomie der Kopf-  
füßer untersuchte, überzeugte sich von der Vollständigkeit  
und Genauigkeit der Aristotelischen Beschreibungen.

Nicht weniger genau (wenn auch nicht immer so voll-  
ständig) beschrieb Aristoteles auch andere Klassen von  
Tieren: Krebse, Gastropoden, Stachelhäuter, Insekten, Vögel  
usw. Es muß dabei betont werden, daß er zahlreiche Se-  
zierungen der Tiere vornahm, ihre Verdauungs- und Fort-  
pflanzungsorgane sowie andere Körperteile auf das sorg-  
fältigste studierte und seine Beobachtungen in Zeichnungen  
festhielt, die leider restlos verlorengegangen sind.

Fragen, die mit den Sinnesorganen, mit dem Ursprung  
und den Besonderheiten von Wahrnehmungen sowie mit  
der geistigen Tätigkeit des Menschen zusammenhängen,  
werden von Aristoteles in mehreren Schriften, vor allem in  
der Schrift »Über die Seele« behandelt. Laut Aristoteles hat  
die menschliche Seele einen dreifachen Charakter; sie be-  
steht aus einer pflanzlichen oder nährenden Seele, aus einer  
fühlenden sowie aus einer denkenden Seele. Die denkende  
Seele existiert nur beim Menschen, den Tieren sind die  
nährende und fühlende Seele, den Pflanzen nur die näh-  
rende Seele eigen.

Unsere Darlegung der wissenschaftlichen Ansichten von  
Aristoteles wäre unvollständig, wenn wir seine Schriften  
zur Logik unbeachtet ließen. Es ist allgemein bekannt, daß  
Aristoteles als Begründer der formalen Logik gilt. Diese  
Lehre, die von ihm als »Analytik« bezeichnet wurde, legte  
er in einer speziellen Schrift dar, die aus zwei Teilen be-  
steht — »Erste Analytik« und »Zweite Analytik«. Aristote-  
les selbst jedoch sah die Logik nicht als Einzelwissenschaft  
an; seiner Meinung nach sei sie eher ein Werkzeug (»Or-  
ganon«) einer jeden Wissenschaft, denn keine Wissenschaft,  
die diesen Namen verdient, könne ohne Schlußfolgerungen  
und Beweisführungen auskommen. Allerdings ging Aristote-  
les in seinen Schriften über den Rahmen der rein forma-  
len Logik hinaus; das macht sich besonders bemerkbar bei  
der Lektüre des »Topik« — einer der interessantesten logi-  
schen Schriften Aristoteles, in der er die Grundprinzipien  
der Erlangung des wahrscheinlichen Wissens (nicht des  
wahren) entwickelte. Diesen Abschnitt seiner logischen Be-  
trachtungen nannte er »Dialektik«.

In seinen logischen Schriften tritt Aristoteles als Schöp-  
fer eines neuen Wissensgebiets hervor. Alles, was in der

Logik vor ihm — von den Eleaten, von den Sophisten, von Platon — getan wurde, war, einzelne Prinzipien und Methoden zu ergründen, ohne sie zu systematisieren und zu einem einheitlichen System zu verbinden. Nicht zufällig und nicht ohne berechtigten Stolz schreibt Aristoteles in seiner Schrift »Über sophistische Widerlegungen«: »In der Kunst der Beredsamkeit gab es schon Vieles und vor langer Zeit Gesagtes. Was jedoch die Lehre von den Schlüssen anbetrifft, so haben wir nichts gefunden, was bereits vor uns gesagt worden wäre, sondern mußten selbst diese unter einem großen Aufwand an Zeit und Kraft schaffen.«

### Die peripatetische Schule

Aristoteles wurde zum Begründer einer der wichtigsten antiken wissenschaftlich-philosophischen Schulen, die den Namen peripatetische Schule erhielt. Sie wurde vielleicht deshalb so benannt, weil Aristoteles oft im Garten des Lykeions mit seinen Schülern spazierenging, um diese oder jene Fragen zu erörtern (peripateō — ich gehe spazieren). Als die bedeutsamsten Schüler des Aristoteles gelten: Theophrast aus Eresos (auf der Insel Lesbos), Eudemos von Rhodos, Aristoxenos von Tarent und Dikaiarchos von Messene. Sie alle waren eigenständige Gelehrte, die aber den allgemeinen Geist des Gründers der Schule beibehielten.

Der talentierteste von ihnen war zweifelsohne Theophrast (372—287 v. u. Z.), der die Schule übernahm, als Aristoteles kurz vor seinem Tod Athen verließ, und sie 36 Jahre leitete. Theophrast verfaßte zahlreiche Schriften zu den unterschiedlichsten Wissensgebieten, von denen uns aber nur zwei große Schriften zur Botanik (»Historia plantarum« — Pflanzenkunde und »Gausae plantarum« — Ätiologie der Pflanzen) fast vollständig überliefert wurden. Sie haben für die Herausbildung dieser Wissenschaft eine ebenso große Bedeutung wie Aristoteles' »Tiergeschichte« für die Zoologie. Außerdem sind wir neben anderen naturwissenschaftlichen Schriften von Theophrast (z. B. »Über die Steine«, »Über die Winde« usw.) im Besitz einer Reihe von Fragmenten aus seiner großen Arbeit »Die Meinung der Physiker«, in der die Ansichten der Vorsokratiker systematisch dargelegt sind. Anhand des erhalten gebliebenen Auszugs »Über die Empfindungen« kann man sich ein Bild über dieses Werk machen. Sein Verlust ist besonders zu bedauern, weil es

Hauptquelle der Informationen über die Vorsokratiker für alle späteren antiken Autoren war (Aetios, Diogenes Laërtios, Plutarch, Stobaios u. a.), die historisch-philosophische oder philosophisch-biographische Kompilationen schrieben, die uns nur zum Teil überliefert wurden. In bezug auf die »Charaktere« von Theophrast, die sich in der Vergangenheit (insbesondere im 18. Jh.) einer kolossalen Popularität erfreuten, läßt sich sagen, daß sie offensichtlich als Auszüge aus einem großen Werk zur Ethik zu betrachten sind.

Eudemos, über dessen Leben fast nichts bekannt ist, war ein weniger produktiver und selbständiger Denker als Theophrast. In den ersten Jahren nach dem Tod von Aristoteles arbeitete er zusammen mit Theophrast an der Weiterentwicklung der Aristotelischen Logik und kehrte dann in seine Heimat zurück, wo er eine Art Nebenschule eröffnete. Von großem Interesse dürften seine Arbeiten zur Geschichte der Astronomie und der Mathematik gewesen sein, auf die sich später der Neuplatoniker Proklos wiederholt bezog.

Aristoxenos ging aus der pythagoreischen Schule hervor, deren Einfluß sich in seinen Werken wahrscheinlich sehr bemerkbar machte. So spielte in seinen Überlegungen über das Verhältnis zwischen Seele und Körper der pythagoreische Begriff von der Harmonie eine große Rolle. Er schrieb einiges zur Geschichte und Theorie der Musik; leider sind nur einige Fragmente erhalten geblieben.

Dikaiarchos befaßte sich hauptsächlich mit Geographie, Geschichte und Politik. Auf seine geographischen Arbeiten werden wir später eingehen.

Neben den unmittelbaren Schülern von Aristoteles soll auch Straton aus Lampsakos erwähnt werden, der nach dem Tod Theophrasts die Schule in den Jahren 287—269 v. u. Z. leitete. Straton war zweifelsohne ein hervorragender Wissenschaftler. Seine Interessen lagen hauptsächlich auf dem Gebiet der Physik und der Psychologie; leider wurden uns nur wenige und nicht sehr bedeutungsvolle Fragmente seiner Werke überliefert. Wie indirekte Quellen bezeugen, wich Straton von Aristoteles in einigen wichtigen Punkten ab. Hauptbegriff seiner Lehre war der Begriff der »Natur« (physis), die er für eine universelle, von der Materie untrennbare Kraft hielt; Gott und Seele hingegen wurden von ihm als selbständig agierende Kräfte entschieden negiert. Er lehnte die Aristotelische Lehre von den natürlichen Orten ab und nahm an, daß alle vier Elemente verschiedene Grade

der Schwere aufweisen. Straton setzte die atomistische Lehre seines Zeitgenossen Epikur einer umfassenden Kritik aus, übernahm aber gleichzeitig einige Lehrsätze der Atomistik. Die Materie besteht seiner Meinung nach aus Teilchen, die im Prinzip teilbar und durch Zwischenräume voneinander getrennt sind. Die Zwischenräume nehmen ein kleineres Volumen als die Teilchen in Anspruch. (Damit erklärte Straton die Eigenschaft der Kompressibilität, die vielen Körpern eigen ist und für eine der wichtigsten empirischen Argumente zugunsten der Atomistik gehalten wurde.) Neben dem Schlag und der Schwere ließ Straton auch die Existenz anderer einwirkender Kräfte (insbesondere die Wärme und die Kälte) zu. Im Unterschied zu Platon und Aristoteles hielt Straton die Seele für einheitlich; seiner Meinung nach ist sie sowohl Quelle der Wahrnehmungen und Empfindungen als auch des Denkens und befindet sich im Vorderteil des Kopfes, zwischen den Augenbrauen. Es scheint uns nur, daß die Empfindungen in den Sinnesorganen entstehen; letztere dienen nur als Wahrnehmer von äußeren Reizen, die der Seele mit Hilfe eines Zwischenagenten, des Pneumas (der Luft), übertragen werden. Es ist unbekannt, ob Straton auch der Seele selbst eine Luftnatur zuschrieb. Die Empfindungen können in der Seele lange Zeit erhalten bleiben; als Folge ihrer Bewegung entsteht das Denken (da wir über nichts denken können, was wir nicht zuvor empfunden haben).

Im großen und ganzen stellte Stratons Lehre eine originelle materialistische Überarbeitung der peripatetischen Physik und Psychologie dar und enthielt eine Reihe progressiver Thesen. Daß sowohl diese Lehre als auch Straton selbst vollständig in Vergessenheit geraten sind, ist auf eine Verkettung von Umständen zurückzuführen, unter denen auch die historische Zufälligkeit eine Rolle gespielt haben muß.

Stratons Nachfolger als Leiter der Schule, Lykon von Troas (er starb 225 v. u. Z.), war kein großer Gelehrter. Seine Werke zeichnen sich weniger durch inhaltliche Tiefe als durch die Schönheit ihrer Form aus. Danach trat eine lange Periode des Verfalls der peripatetischen Schule ein. In dieser Periode blieben die heute zum Bestand des »Corpus« von Aristoteles zählenden Werke praktisch unbekannt; populär waren lediglich die frühen Werke des Philosophen, die er noch als Mitglied der Platonischen Akademie verfaßt hatte (gerade auf sie bezieht sich beispielsweise Cicero in

seinen philosophischen Schriften). Die Situation änderte sich, als Ende des 1. Jahrhunderts v. u. Z. die Sammlung der Manuskripte von Aristoteles nach Rom gelangte, Andronikos von Rhodos sie ordnete und redaktionell bearbeitete. Es begann eine neue Etappe der peripatetischen Schule, in der sich die Bemühungen auf das Studium und das Kommentieren von Texten des großen Begründers der Schule richteten.

## DER HELLENISMUS

Die Gründung des Imperiums Alexanders des Großen bedeutete den endgültigen Zusammenbruch der griechischen gesellschaftlich-politischen Form des Stadtstaates und war ein Wendepunkt und zugleich der Beginn einer neuen Ära in der politischen und kulturellen Geschichte des Altertums. Wir sprechen von der Ära des Hellenismus. Die Feldzüge Alexanders dehnten die den Griechen bekannte Welt nach allen Seiten aus, erweiterten ihren Horizont und förderten die Festigung einer neuen Weltanschauung, die den Bewohnern von Hellas in der klassischen Epoche nicht eigen war. Die Griechen blieben zwar auch früher nicht nur in ihren Städten, sie unternahmen Seereisen und gründeten Kolonien an der Küste des Schwarzen Meers und des Mittelmeers. Diese Kolonien stellten rein griechische Siedlungen in einer fremden Umgebung dar, und bis auf wenige Ausnahmen (Naukratis in Ägypten) konnte von einem spürbaren Einfluß dieser Umgebung auf die Bräuche, auf die Weltsicht und auf die kulturellen Interessen der griechischen Kolonisten keine Rede sein. Jetzt aber gerieten große uralte Zivilisationen unter die Macht Alexanders. Diese waren der griechischen Zivilisation in vieler Hinsicht überlegen, so daß ein unmittelbarer Kontakt unweigerlich zu ersten Folgen für die griechische Kultur, vor allem für die Beziehungen der Griechen zu der Außenwelt führen mußte. Die den Griechen der klassischen Epoche eigenen Züge des Partikularismus und des Nationalstolzes wichen einem Kosmopolitismus, der zu einem besonderen Charakteristikum der ganzen Spätantike wurde; die Entstehung des Römischen Weltreiches und der Sieg des Christentums haben diese kosmopolitischen Tendenzen nicht gehemmt, sondern noch verstärkt. Dazu kam, daß das Alte Griechenland seine ehemalige kulturelle Hegemonie verlor. Während Athen nach wie vor Domizil der wichtigsten philosophischen

Schulen war, fanden die Spezialwissenschaften, die sich zu jener Zeit herausgebildet hatten, in den Hauptstädten der neuen Staaten, in die das Imperium nach Alexanders Tode zerfiel, günstigeren Nährboden für ihre Entwicklung. Diese Staaten stellten ein besonderes Konglomerat griechischer und regionaler Elemente dar, wobei ihre kulturelle Elite fast ausschließlich aus Griechen bestand und die griechische Sprache sich immer mehr durchsetzte. Unter den neuen Metropolen nahm Alexandria bald den ersten Platz ein. Hier hatte bereits der Gründer der Dynastie, Ptolemaios I. Soter (um 367—283 v. u. Z.), den Theophrastschüler Demetrios von Phaleron zu sich genommen, der als erster »Transporteur« der Aristotelischen Traditionen nach Alexandria angesehen werden kann. Etwas später wurde Straton von Lampsakos als Erzieher des Thronfolgers, des künftigen Ptolemaios II., nach Alexandria eingeladen (ähnlich wie Aristoteles an der Erziehung Alexanders des Großen beteiligt war). Straton hielt sich in Alexandria bis zum Tode Theophrasts (287 v. u. Z.) auf, kehrte dann aber nach Athen zurück, um die Leitung der Schule zu übernehmen. Unter den ersten Regenten der Dynastie der Ptolemäer wurde die berühmte Alexandrinische Bibliothek gegründet, deren Grundstein Demetrios legte. Es wurde auch das Museion eröffnet — eine wissenschaftliche Einrichtung, an der die größten Gelehrten und Literaten arbeiteten und lebten und Staatsgehälter erhielten, die ausreichten, um sich voll und ganz wissenschaftlichen Studien widmen zu können. Eine rasche Entwicklung nahm auch die Buchproduktion; dazu trug in erheblichem Maße das Monopol Ägyptens auf den Papyrus bei, den einzigen Beschreibstoff, der in jener Zeit breite Verwendung fand. Infolge dieser Entwicklung wurde Alexandria bald zum größten Zentrum des Buchhandels. Dank dieser Faktoren erreichte die Alexandrinische Wissenschaft bereits im 3. Jahrhundert v. u. Z. eine Blütezeit in fast allen Wissensbereichen.

Nicht nur Ptolemaios Soter und seine Nachfolger, sondern auch andere »Diadochen« (so hießen ehemalige Heerführer Alexanders des Großen, die sein Imperium nach seinem Tode untereinander aufteilten) waren Förderer der Wissenschaften und Künste. Dazu animierte sie das Streben nach Prestige genauso wie persönliches Interesse. Es entstanden große Bibliotheken bzw. wissenschaftliche Zentren in Pella (Mazedonien), Pergamon (Westliches Kleinasien),

Antiochia (Syrien) sowie in Städten, die keine Hauptstädte der Diadochen waren; in Rhodos (auf der gleichnamigen Insel), Smyrna, Ephesos — ebenso auf Sizilien, wo Platon einst versucht hatte, seine Staatstheorie umzusetzen. Hier wurde nun Hieron, der 269 v. u. Z. in Syrakus die Macht ergriff, zum Gönner des Archimedes.

Was zeichnete die Wissenschaften aus, die sich in den obengenannten wissenschaftlichen Zentren mehr oder weniger erfolgreich entwickelten und die Gunst der regierenden Herrscher genossen? Ditse Wissenschaften hatten bereits keinerlei Ähnlichkeit mit der frühen griechischen Naturlehre. Für sie war einerseits eine scharfe Abgrenzung von der Philosophie, andererseits eine deutliche Differenzierung und Spezialisierung charakteristisch. Die Mathematik und die Astronomie, die Mechanik und die Optik, die Physiologie und die Embryologie, die Geographie und die Geschichte und schließlich eine Reihe humanistischer Disziplinen wie die Philologie entwickelten sich selbständig, indem jede eine spezifische Problematik und eine ihr eigene wissenschaftliche Methodologie der Forschung aufwies. Dazu stand natürlich nicht im Widerspruch, daß einige große Wissenschaftler der Epoche des Hellenismus (Euklid, Archimedes, Eratosthenes) mit Leistungen auf mehreren Gebieten des Wissens gleichzeitig berühmt wurden.

Aus diesem Grunde wird im nun folgenden Teil unseres Buches auch die Art der Darlegung eine gewisse Änderung erfahren: Das Material wird nicht mehr nach Lehren der einzelnen Denker, sondern nach Fachgebieten geordnet sein.

## **Die wichtigsten philosophischen Lehren**

Im Unterschied zu den Einzelwissenschaften fand die Philosophie der hellenistischen Epoche in den Metropolen der neuen Staaten keinen fruchtbaren Boden, und Athen blieb ihr Zentrum. Neben der Akademie und dem Peripatos (Lykeion) verschafften sich im 3. Jahrhundert v. u. Z. vor allem die epikureische und die stoische Schule Geltung.

Der Gründer der ersten Schule, Epikur (342—271 v. u. Z.), war der Sohn des Atheners Neokles, der auf der Insel Samos lebte. Mit 18 Jahren wurde er Schüler des Nausiphanes, der sich zur Lehre des Demokrit bekannte, und übernahm die grundlegenden Thesen der Atomistik. Einen

großen Einfluß (insbesondere in ihrem ethischen Teil) übte die Lehre des Begründers der skeptischen Schule, Pyrrhon, auf ihn aus, der ungefähr zur selben Zeit mit einigen Schülern in Elis lebte. Nachdem Epikur ein eigenes System entwickelt hatte, lehrte er einige Jahre lang in Lampsakos und Mytilene (auf der Insel Lesbos) und verlegte dann im Jahr 306 v. u. Z. seine Schule nach Athen, wo er zusammen mit seinen Schülern und Freunden in einem »Garten« lebte, der auch nach seinem Tode als Stätte der epikureischen Schule diente. Epikur übernahm die Atomistik von Demokrit, doch er versuchte, diese in jenen Fragen zu vervollkommen, die auf die schärfste Kritik ihrer Gegner stießen. So erkannte er die Existenz eines absoluten Gegensatzes von oben und unten an und behauptete, die Atome würden durch ihr Gewicht abwärts getrieben. Die Schwere der Atome sei ihrer Größe proportional, jedoch hätten die Unterschiede in ihrer Schwere auf ihre Fallgeschwindigkeit im leeren Raum keinen Einfluß; diese These leitete Epikur aus den Vorstellungen von der diskreten Struktur des Raumes ab (er war der Ansicht, daß aus der unendlichen Teilbarkeit räumlicher Intervalle unvermeidlich — in Übereinstimmung mit den Argumenten des Zenon von Elea — die Unmöglichkeit einer jeden Bewegung sich ergeben müßte). Mit derselben Geschwindigkeit könnten die Atome in ihrem Fall von einer streng vertikalen Bewegungsrichtung abweichen. Diese Abweichung, die später von Lukrez mit dem lateinischen Terminus *clinamen* benannt wurde, sei nicht groß, würde aber spontan und in keine bestimmte Richtung erfolgen. Indem die Atome abweichen, könnten sie miteinander zusammenprallen, sich verbinden und Anhäufungen und Wirbel bilden, die zur Entstehung von Welten führen.

Laut Epikurs Lehre sind sinnliche Wahrnehmungen die Quelle jeden Wissens; in dieser Hinsicht war Epikur ein Vertreter des konsequenten Sensualismus in der griechischen Philosophie. Die Adäquatheit der Empfindungen mit den sie auslösenden äußeren Objekten wurde von Epikur mit Hilfe der Demokritschen Theorie der »Ausflüsse« und »Bildchen« begründet.

In Übereinstimmung mit den Anschauungen der Schöpfer der Atomistik hielt Epikur die Seele, die für ihn aus den leichtesten und beweglichsten Atomen bestand, für körperlich. Dabei teilte er sie in einige Bestandteile mit verschiedenen Funktionen. Die Einheit der Seele sei durch

die sie zusammenhaltende körperliche Hülle bedingt. Wenn letztere stürbe, verflüchtigte sich die Seele, indem sie in einzelne Atome zerfallen würde. Im ganzen wurde die Lehre über die Seele von Epikur äußerst gründlich ausgearbeitet, da sie das Fundament seiner Ethik lieferte, die den Kern und den wichtigsten Teil seines ganzen philosophischen Systems ausmachte.

Epikur erkannte ebenso wie Demokrit die Existenz der Götter an. Er negierte jedoch ihren Einfluß auf den Weltprozeß: In den Räumen zwischen den Welten befinden sich die Götter im Zustand ewiger Seligkeit, die von keinerlei Sorgen oder Leidenschaften getrübt wird.

Es sind uns nur einige Texte von Epikur überliefert: drei philosophische Briefe (an Pythokles, an Herodot und an Menoikeus), eine Sammlung der wichtigsten epikureischen Maximen, die Kyriai doxai und eine Reihe von Fragmenten. Der Einfluß des Epikureismus in den späteren Epochen wurde nicht nur durch die Werke des Epikur selbst, sondern vom Lehrgedicht »Über die Natur der Dinge« bestimmt, das von Epikurs Anhänger, dem römischen Dichter Lukrez, geschrieben wurde.

Während der Epikureismus in jeder Beziehung ein Produkt des hellenistischen Geistes war, nahm die populärste philosophische Schule dieser Epoche, die Stoa, viele orientalische Elemente in sich auf. Es ist bezeichnend, daß fast alle herausragenden Vertreter dieser Schule auf irgendeine Weise mit dem Orient verbunden waren. Ihr Begründer Zenon (um 335—263 v. u. Z.) wurde in der phönizischen Kolonie Kition auf Zypern geboren. Seine Schule wurde nach dem Ort benannt, wo der Unterricht stattfand (stoa — Säulenhalle). Einen großen Einfluß erlangte die Schule der Stoiker Ende des 3. Jahrhunderts v. u. Z., als ihre Leitung von Chrysippos von Soli (Kilikien) übernommen wurde. Chrysippos' Nachfolger war Diogenes Babylonios, und der letzte große Stoiker griechischer Schule, Poseidonios (etwa 135—51 v. u. Z.) stammte aus Syrien.

Nach Meinung der Stoiker zerfällt die Philosophie in drei Hauptbereiche — in die Logik, in die Physik und in die Ethik. Im Gegensatz zu Aristoteles, der die Bedeutung der Logik nur als Hilfsmittel aller Erkenntnisse anerkannte, betrachteten die Stoiker die Logik als eine selbständige Wissenschaft. Diese Wissenschaft untersucht sowohl Wortzeichen (Laute, Silben, Wörter, Sätze) als auch ihre Be-

deutung (Begriffe, Urteile, Schlüsse). Logik schließt in der Stoa Grammatik und Philologie ein. In den Überlegungen der Stoiker, die sich auf die Logik beziehen, gibt es viele sehr interessante Gedanken, auf die wir allerdings im Rahmen dieses Buches verzichten müssen.

Die physikalisch-kosmologischen Anschauungen der Stoiker sind ebenfalls von sehr originellem Charakter. Die Stoiker nahmen wie Empedokles, aber anders als Aristoteles, vier Elemente als die Bestandteile des gesamten Seins an. Von diesen Elementen hoben sie die »höheren«, Feuer und Luft, hervor und stellten sie den niederen, Wasser und Erde, gegenüber. Die Verbindung von Feuer und Luft bildet das »Pneuma« — eine Art Seele, die alle Dinge und die Welt im ganzen durchdringt. Und obwohl diese Seele materiell ist, ist sie aktiv und besitzt formbildende Fähigkeit; im Gegensatz dazu sind das Wasser und die Erde passiv, träge, sie erhalten ihre Form vom Pneuma. Die gegenseitige Durchdringung von Pneuma und Materie geschieht auf spezifische Art und Weise; das Pneuma ist kontinuierlich und füllt den ganzen Raum aus, darunter auch jene Punkte, die von materiellen Dingen bereits besetzt sind. In diesem Sinne kann man das Pneuma mit dem Äther (oder dem Feld) der Physik der Neuzeit vergleichen. Dieser Vergleich scheint um so mehr am Platze, als das Pneuma kraft eigener innerer Bewegungen immer im Zustand einer gewissen Spannung (tonos) begriffen ist, der Grad dieser Spannung bestimmt die unterschiedlichen Graduierungen der Pneumaformen. Die Größe und die Figur der Körper sowie alle deren Qualitäten — all das ist Wirkungsergebnis des Pneumas. In der Welt der organischen Natur bedingt das Pneuma die Lebensfunktionen der Lebewesen, wobei von der Feinheit der »pneumatischen« Form der Grad der Organisiertheit der jeweiligen Tier- oder Pflanzenklasse abhängt. Der Kosmos im ganzen wird vom Pneuma durchdrungen, das ihm Einheit verleiht und alles umfaßt, was in ihm enthalten ist. Es gibt nur einen Kosmos; er ist kugelförmig und vom unendlichen leeren Raum umgeben. Der Kosmos ist ein vernünftiges lebendiges Wesen, das einen zyklischen Entwicklungsweg durchläuft. Er entsteht aus dem Urfeuer, durchläuft die Stadien, in denen die ganze Vielfalt des Seins zur Entfaltung kommt und geht dann wieder im Element des Feuers als Folge des allgemeinen Entflammens (ekpyrosis) auf. Dieser Prozeß ist kausal bedingt wie auch alle einzelnen

Vorgänge des Weltprozesses, einschließlich der willkürlich erscheinenden Handlungen der Lebewesen. Diese einheitliche und ursächliche Verbindung alles Geschehens nannten die Stoiker »Verhängnis« oder »Schicksal« (heimarmenē).

Im Mittelpunkt der Philosophie der Stoiker stand die Ethik. Und obwohl die Probleme der Ethik und der historisch-philologischen Wissenschaften überhaupt außerhalb unseres Betrachtungsfeldes liegen, scheint es notwendig, auf die wichtigsten Maximen der Ethik der Stoiker einzugehen.

Ähnlich wie die Epikureer (und in voller Übereinstimmung mit der in der Antike allgemein akzeptierten Auffassung) hielten die Stoiker das Glück (eudaimonia) für das Hauptziel des menschlichen Lebens. Während jedoch die Epikureer unter dem Glück die Lust oder aber den Mangel an Schmerz verstanden, war für die Stoiker das höchste Glück des Menschen ein Leben, das mit seiner »Natur« harmoniert. Das bedeutete, daß der Mensch nach Vollkommenheit streben soll, indem er seine natürlichen Anlagen und Gaben entwickelt. Der höchste Grad der Vollkommenheit des Menschen ist die Tugend; folglich ist ein mit der »Natur« übereinstimmendes Leben den Stoikern zufolge nichts anderes als ein tugendhaftes Leben. In dieser Frage unterschieden sie sich grundlegend von der Schule der Kyniker, die von dem Sokratesschüler Antisthenes gegründet wurde. Nach Auffassung der Kyniker bedeutete Übereinstimmung mit der »Natur« Verzicht auf Wohlstand und strikte Ablehnung gesellschaftlicher Konventionen; deshalb propagierten die Kyniker, nur natürlichen Trieben zu folgen. (Gerade darum rankten sich viele Anekdoten, die über Diogenes von Sinope, dem markantesten Vertreter der kynischen Schule, im Umlauf waren.)

Während also die Kyniker die von den Sophisten entwickelte Doktrin von dem Gegensatz von »Natur« und »Gesetz« (physis — nomos) bis zum Extrem führten, wurde der Begriff der »Natur« von den Stoikern radikal uminterpretiert. Dadurch, daß die Stoiker die »Natur« mit dem Streben nach der Tugend identifizierten, hoben sie den genannten sophistischen Gegensatz im Prinzip auf.

## Geographie

Die Geographie war jene Wissenschaft, auf die sich die Feldzüge Alexanders des Großen unmittelbar auswirkten.

Bis dahin unterschied sich der geographische Horizont der Griechen nicht wesentlich von den Vorstellungen über die Ökumene, die Herodot in seinen Büchern dargelegt hatte. Allerdings werden im 4. Jahrhundert v. u. Z. mehr Reisen in ferne Länder unternommen und fremde Gegenden beschrieben als im vorhergehenden Jahrhundert. In der berühmten »Anabasis« von Xenophon finden sich viele interessante Angaben über die Geographie und Ethnographie Kleinasiens und Armeniens. Ktesias von Knidos, der 17 Jahre lang (415—399 v. u. Z.) Arzt am persischen Hof war, schrieb eine Reihe von historischen und geographischen Aufsätzen, von denen außer der Beschreibung Persiens die Beschreibung Indiens im Altertum und im Mittelalter besonders populär war. Sie enthielt wohl mehr Legenden als genaue Daten über die Natur und die Bewohner dieses Landes. Später (um 330 v. u. Z.) unternahm ein gewisser Pytheas von Massalia eine Reise entlang der Westküste Europas; nachdem er Gibraltar passiert und die Bretagne entdeckt hatte, erreichte er zu guter Letzt das halblegendäre Thule, das einige Forscher für das heutige Island, andere für Norwegen halten. Fragmente aus Pytheas' Schriften werden in den Arbeiten von Polybios und Strabon angeführt.

Und dennoch, als Alexander der Große seine Feldzüge begann, hatten er und seine Feldherren nur sehr vage Vorstellungen von den Ländern, die sie zu erobern trachteten. Alexanders Heer wurde von »Schrittzählern« (βηματιστοί) begleitet, die die Marschroute festhielten und die entsprechenden Territorien auf eine Karte eintrugen. Als Alexander aus Indien heimzog, schickte er einen Teil der Krieger übers Meer, wobei der Kommandeur der Flotte, Nearchos, den Befehl erhielt, dem Küstenstreifen des Indischen Ozeans zu folgen. Nachdem er die Mündung des Indus hinter sich gelassen hatte, erreichte Nearchos wohlbehalten das Zweistromland und verfaßte einen Bericht über diese Reise, der später von den Historiographen der Feldzüge Alexanders, Arrianus und Strabon, benutzt wurde. Die Angaben, die während der Feldzüge Alexanders gesammelt wurden, erlaubten dem Aristotelesschüler Dikaiarchos aus Messene, eine Karte mit allen damals bekannten Gebieten der Ökumene zusammenzustellen.

Die Vorstellung von der Kugelförmigkeit der Erde, die sich in Griechenland in der Epoche von Platon und Aristoteles endgültig durchsetzte, stellte der griechischen Geo-

graphie neue grundlegende Aufgaben. Die wichtigste war die Bestimmung der Ausmaße der Erdkugel. Und so unternahm Dikaiarchos den ersten Versuch, diese Aufgabe mittels Zenitmessungen auf verschiedenen Breiten (in der Nähe von Lysinacheia bei den Dardanellen und bei Assuan in Ägypten) zu lösen. Dabei betrug der von ihm erhaltene Wert des Erdumfangs 300 000 Stadien. Die Breite der Ökumene bestimmte Dikaiarchos mit 40 000 Stadien und die Länge mit 60 000 Stadien.

Außerdem beschäftigte sich Dikaiarchos mit der Bestimmung der Höhe von Bergen; eine Beschreibung Griechenlands faßte er in drei Büchern zusammen. Insgesamt kann man Dikaiarchos mit Recht als den ersten professionellen Geographen der griechischen Wissenschaft ansehen.

Ein anderer Vertreter der peripatetischen Schule, Straton von Lampsakos, interessierte sich ebenfalls für Geographie. Er stellte die Hypothese auf, daß das Schwarze Meer irgendwann einmal ein See war und später, als es sich mit dem Mittelmeer verband, das überflüssige Wasser an das Ägäische Meer abgab (das Vorhandensein einer Strömung in den Dardanellen war bekannt und wurde insbesondere von Aristoteles diskutiert; es sei auch an die Geschichte der Brückenbauten über diese Meeresstraße für Xerxes' Krieger erinnert). Das Mittelmeer war Straton zufolge früher ebenfalls ein See; als er die schmale Straße von Gibraltar durchbrach (die damals Säulen des Herakles genannt wurde), senkte sich sein Wasserspiegel und legte dabei die Küste bloß, hinterließ Muscheln und Salzablagerungen. Diese Hypothese wurde später von Eratosthenes, Hipparch und Strabon diskutiert.

Die größten Leistungen der Alexandrinischen Geographie sind mit dem Namen des Eratosthenes von Kyrene verbunden, der viele Jahre (234—196 v. u. Z.) die Alexandrinische Bibliothek leitete. Eratosthenes war ein außergewöhnlich vielseitiger Mensch, der mathematische, astronomische, historische, philologische, ethische und andere Werke schrieb; seine geographischen Arbeiten jedoch waren wohl die bedeutendsten.

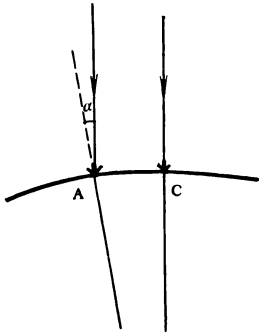
Ein großes Werk von Eratosthenes, »Die Geographie«, das aus drei Büchern bestand, wird recht vollständig von Strabon wiedergegeben. Im ersten Buch dieses Werkes gab Eratosthenes einen Abriß der Geschichte der Geographie. Darin äußerte er sich kritisch zu den geographischen Zeug-

nissen von Homer, den er nicht als geographische Autorität ansah, berichtete von den ersten geographischen Karten von Anaximander und Hekataios und verteidigte die Reisebeschreibungen des Pytheas, die von seinen Zeitgenossen oft belächelt wurden. Im zweiten Buch führte Eratosthenes Beweise für die Kugelförmigkeit der Erde an, erwähnte seine Methode der Messung der Erdkugelausmaße und entwickelte sein Bild von der Ökumene, die er für einen von allen Seiten vom Ozean umgebenen Kontinent hielt. Auf dieser Grundlage äußerte er zum ersten Mal die Vermutung, daß man Indien erreichen könne, wenn man von Europa aus westwärts mit dem Schiff fährt. Das dritte Buch enthielt einen ausführlichen Kommentar zu der von Eratosthenes erarbeiteten Karte.

Die Methode, die Eratosthenes zur Bestimmung des Erdumfangs anwendete, wurde in einer speziellen Arbeit ausführlich beschrieben; sie bestand in der Messung der Schattenlänge des Gnomons in Alexandria zur selben Zeit, wenn in Syene (Assuan), das etwa auf demselben Meridian liegt, die Sonne im Zenit steht (Abb. 6). Der Winkel zwischen der vertikalen und der Richtung der Sonne erwies sich (in Alexandria) als  $\frac{1}{50}$  des vollen Kreises. Wenn man als Entfernung zwischen Alexandria und Syene 5000 Stadien annahm, betrug also der Erdumfang 250 000 Stadien. Eratosthenes präzierte diesen Wert zu 252 000 Stadien. Das sind 39 690 km, falls er das ägyptische Stadion (157,5 m) benutzte. Eratosthenes' Messung blieb bis ins 17. Jahrhundert unübertroffen.

Hipparch kritisierte Eratosthenes' »Geographie«. Dabei bezog er sich hauptsächlich auf die Methoden der Lokalisierung geographischer Objekte. Hipparch hielt es für unzulässig, den Angaben von Reisenden oder Seeleuten über die Entfernung und die Lage dieser Objekte eine ernsthafte Bedeutung beizumessen; er erkannte nur solche Methoden an, die auf genauen objektiven Daten beruhten, wozu er die Höhe der Sterne über dem Horizont, die Länge des Schattens, den der Gnomon wirft, die Zeitunterschiede des Eintritts der Mondfinsternisse usw. zählte. Hipparch führte ein Netz von Meridianen und Parallelen als Ausgangspunkt für geographische Karten ein, er war somit der Begründer der mathematischen Kartographie.

Am Beispiel der Geographie sehen wir, daß sogar diese Wissenschaft, die früher eine rein beschreibende war, in der



**Abb. 6.** Methode zur Bestimmung des Erdumfangs nach Eratosthenes;  
A Alexandria, C Syene

Alexandrinischen Epoche der Mathematisierung unterzogen wurde. In noch stärkerem Maße war dieser Prozeß für die Astronomie, die Mechanik und die Optik charakteristisch. Deshalb können wir mit Recht behaupten, daß gerade in dieser Epoche die Mathematik zum ersten Mal als Königin der Wissenschaften anerkannt wurde. Deshalb sollten wir, bevor wir zu den anderen Wissenschaften übergehen, zunächst die bedeutenden Leistungen der hellenistischen Mathematik betrachten.

## Mathematik

Ende des 4. Jahrhunderts v. u. Z. faßte Euklid nahezu das gesamte mathematische Wissen seiner Zeit in den »Elementen« (stoicheia) zusammen, einem beeindruckenden Werk, das mehr als zweitausend Jahre wissenschaftliches Vorbild blieb.

Von Euklids Leben wissen wir fast nichts, nur daß er ein Zeitgenosse des Ptolemaios I. Soter war und in Alexandria Mathematik unterrichtete. Vermutlich erhielt er seine mathematische Bildung in Athen in der Akademie. Da Archimedes einen Satz aus den »Elementen« zitiert, war das Werk zu jener Zeit offenbar schon gut bekannt. Worin der eigene Beitrag Euklids besteht, ist nicht leicht abzuschätzen, da er anscheinend vor allem ein glänzender Pädagoge war, eben der Schöpfer eines umfassenden mathematischen Systems. Den Hauptinhalt der »Elemente« machen die Entdeckungen des Hippokrates von Chios, des Theaitetos, des Eudoxos und anderer Mathematiker der vorangegangenen Epoche aus, wobei Euklid dem dargelegten Material

logische Strenge und formale Abgeschlossenheit verlieh.

Der uns überlieferte Text der »Elemente« besteht aus fünfzehn Büchern, wobei die beiden letzten nicht von Euklid geschrieben, sondern später hinzugefügt wurden.

Die ersten vier Bücher der »Elemente« sind der Geometrie der Ebene gewidmet — sie enthalten dasselbe Material, das wahrscheinlich schon in dem Buch des Hippokrates von Chios stand. Daraus folgt aber nicht, daß Euklid Hippokrates einfach wiederholt hat. Besonders trifft das für Buch I zu, das mit Definitionen, Postulaten und Axiomen beginnt. Unter den Postulaten ist auch das berühmte (fünfte) Postulat über die parallelen Linien, das in der Folge zur Entstehung der nichteuklidischen Geometrie führte. Dem schließen sich Theoreme über die wichtigsten Eigenschaften der Dreiecke, Parallelogramme und Trapeze an. Am Schluß des Buches wird der Satz des Pythagoras angeführt.

Im Buch II werden die Grundlagen der algebraischen Geometrie dargelegt. Das Produkt von zwei Größen wird als ein auf zwei Strecken beruhendes Rechteck angegeben. Es wird die Distributivität der Multiplikation bei der Addition festgestellt (d. h., wenn  $a = a_1 + a_2 + a_3$ , dann ist  $ba = ba_1 + ba_2 + ba_3$ ). Es werden einige wichtige Identitäten bewiesen, zum Beispiel

$$(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2.$$

Es wird die geometrische Formulierung für einige Typen von Aufgaben gegeben, die Quadratgleichungsaufgaben äquivalent sind. Das Buch III ist den Eigenschaften des Kreises, seiner Tangenten und Sehnen gewidmet.

Im Buch IV werden schließlich regelmäßige Vielecke behandelt. Regelmäßige  $n$ -Ecke mit  $n = 3, 4, 5, 10, 15$  werden konstruiert, wobei die Konstruktion des regelmäßigen Fünfzehnecks offensichtlich von Euklid selbst stammt.

Die Bücher V und VI der »Elemente« geben Eudoxos' Beitrag zur Theorie der Proportionen und ihre Anwendung bei der Lösung algebraischer Aufgaben wieder. Eine besondere Abgeschlossenheit zeichnet das Buch V aus, das der Theorie der Proportionen insgesamt gewidmet ist und sowohl rationale als auch irrationale Größen erfaßt.

In den Büchern VII, VIII und IX geht es um die Arithmetik, d. h. um die Theorie der ganzen und rationalen Zahlen, die im 5. Jahrhundert v. u. Z. von den Pythagoreern

ausgearbeitet wurde. Außer den Theoremen über die Addition und Multiplikation ganzer Zahlen und über die Multiplikation ihrer Verhältnisse werden Fragen der Zahlentheorie behandelt: der »Euklidische Algorithmus« wird eingeführt, die Grundlagen der Theorie der Teilbarkeit ganzer Zahlen werden nachgewiesen, und das Theorem über die Existenz einer unendlichen Menge von einfachen Zahlen wird bewiesen. Diese drei Bücher sind offensichtlich auf der Grundlage von nicht überlieferten Schriften von Archytas entstanden.

Das Buch X enthält eine Darstellung der Ergebnisse von Theaitetos und behandelt die quadratischen Irrationalitäten und ihre Klassifikation (Binominale, Apotome, Mediale usw.).

Im Buch XI werden die Grundlagen der Stereometrie erläutert: Theoreme über die Geraden und Ebenen im Raum, dreidimensionale Konstruktionsaufgaben usw.

Im Buch XII wird die Exhaustionsmethode von Eudoxos erklärt, mit deren Hilfe die Theoreme über die Fläche des Kreises und das Volumen einer Kugel bewiesen sowie die Verhältnisse der Volumina von Pyramiden und Kegeln zu den Volumina der entsprechenden Prismen und Zylinder abgeleitet werden.

Die Hauptergebnisse des Buches XIII, das fünf regelmäßigen Polyedern gewidmet ist, stammen von Theaitetos.

Später wurden den »Elementen« noch die Bücher XIV und XV hinzugefügt, die nicht von Euklid, sondern nach ihm (eins im 2. Jh. v. u. Z., das andere im 6. Jh. u. Z.) geschrieben wurden. Von ihrem Inhalt wird weiter unten die Rede sein.

Bei allem Reichtum des in den »Elementen« enthaltenen Materials war dieses Werk dennoch keine allumfassende Enzyklopädie der antiken Mathematik. So enthielt es zum Beispiel nicht die »Möndchen des Hippokrates« sowie die drei berühmten Aufgaben der Antike — die Verdopplung des Würfels, die Dreiteilung eines Winkels und die Quadratur des Kreises. Außerdem werden die Kegelschnitte mit keinem Wort erwähnt, obwohl zu dieser Zeit ihre Theorie bereits ausgearbeitet war.

Hatte man vor Euklid schon versucht, ein deduktives System der Mathematik aufzubauen? Zweifellos. Hippokrates von Chios haben wir schon genannt. In Proklos' Kommentar zum I. Buch von Euklids »Elementen« wird von analo-

gen Versuchen berichtet, die zwei Mathematiker des 4. Jahrhunderts v. u. Z. unternahmen, Leon und Theudios aus Magnesia, die in der Tradition der Akademie Platons standen. Es kann kein Zufall sein, daß sich gerade Euklids »Elemente« über die Jahrhunderte hielten, während die der Vorgänger vergessen wurden und es auch über ihren Inhalt keine Zeugnisse gibt.

Außer den »Elementen« werden Euklid noch einige andere Schriften zugeschrieben, die sich auf verschiedene Zweige der Mathematik beziehen. In den »Dedomena« hat Euklid 95 Fälle untersucht, in denen durch eine bestimmte Anzahl gegebener Größen andere Größen bestimmt werden (wozu Teile von Figuren, ihre Lagen, ihre gegenseitigen Verhältnisse usw. zählen). In einer kurzen Schrift über die Zerlegung von Figuren, »Peri diaireseōn«, die nur in arabischer Übersetzung erhalten geblieben ist, wird die Aufgabe der Teilung einer gegebenen geometrischen Figur in zwei, ein gegebenes Verhältnis aufweisende Teile mittels einer Geraden, deren Richtung gegeben ist oder die durch einen gegebenen Punkt geht, diskutiert. Einige mathematische Schriften Euklids sind uns nicht erhalten geblieben; davon nennen die alten Quellen die »Trugschlüsse« (»Pseudaria«) und ein Buch über die Kegelschnitte (»Kōnika«), das lange vor dem berühmten Werk von Apollonios zu diesem Thema geschrieben wurde.

Außer rein mathematischen verfaßte Euklid auch solche Schriften, deren Gegenstände heute zur Physik gehören. Überliefert sind »Phainomena«, wo es um mathematische Grundlagen der sphärischen Astronomie geht, die »Optik« und die »Katoptrik« sowie die musiktheoretische Schrift »Katatomē kanonos«, die zehn Thesen über die Intervalle enthält. Diese Abhandlungen sind ebenfalls axiomatisch-deduktiv angelegt.

Der bedeutendste Gelehrte der hellenistischen Epoche Archimedes gehörte formell nicht zur alexandrinischen wissenschaftlichen Schule; er wurde 287 v. u. Z. in Syrakus geboren und verlebte dort fast sein ganzes Leben. Als Sohn des Mathematikers und Astronomen Pheidias erhielt er gewiß schon in der Kindheit eine gute mathematische Ausbildung. Später befreundete er sich in Alexandria mit Konon von Samos, der Hofastronom von Ptolemaios III. Euergetes (246—211 v. u. Z.) war und dem er vermutlich die

entscheidenden Anregungen verdankte, sich mit rein mathematischen Problemen zu beschäftigen. Nach der Rückkehr aus Alexandria blieb er mit Konon und dessen Schüler Dositheos in Kontakt. Folgende an Dositheos adressierte Schriften des Archimedes sind überliefert:

1. »Die Quadratur der Parabel«,
2. und 3. »Über Kugel und Zylinder«,
4. »Über Konoide und Sphäroide«,
5. »Über Spiralen«.

Die Bedeutung dieser »Briefe« kann nicht hoch genug eingeschätzt werden; Archimedes geht darin unmittelbar zu den Methoden der höheren Mathematik über. Während sich Archimedes in der ersten Schrift, in der er die Aufgabe der Flächenbestimmung eines Parabelsegments löst, noch der Exhaustionsmethode des Eudoxos bedient, arbeitet er in den darauffolgenden seine eigene Methode aus, die er zur Berechnung der Oberflächen und der Volumina von geometrischen Körpern verwendet.

Die Methode des Archimedes stellt eine Weiterentwicklung und Vervollkommnung der Eudoxischen Methode dar. Eudoxos erhielt die gesuchte Größe einer Fläche (einer Oberfläche, eines Volumens), indem er die Zahl der Glieder einer Größenreihe vergrößerte, deren Summe gerade diese Größe als Grenzwert hatte. Dabei war aber das allgemeine Schema der Methoden von Eudoxos noch nicht formuliert worden, und die Überlegungen mußten für jeden konkreten Fall wiederholt werden. Im Gegensatz zu Eudoxos schloß Archimedes die zu bestimmende Größe zwischen zwei Partialsummen ein, deren Differenz kleiner als jede vorgegebene Größe gemacht werden konnte. Die gesuchte Größe wird dabei als die gemeinsame Grenze der beiden Summen bei unendlicher Vergrößerung der Zahl der Summanden gefunden, was der Berechnungsaufgabe eines bestimmten Integrals äquivalent ist. Bei der Bestimmung der Kugeloberfläche, bei der Berechnung der Segmente von Paraboloiden, Hyperboloiden oder Rotationsellipsoiden errechnete Archimedes faktisch die Integrale:

$$\int_0^{\alpha} \sin x \, dx \quad \text{und} \quad \int_0^{\alpha} (ax^2 + bx) \, dx.$$

Mit derselben Methode löste er auch kompliziertere Aufgaben — er bestimmte die Bogenlänge und die Flächen einer Reihe gekrümmter Oberflächen.

Alle diese Aufgaben finden wir in den Büchern »Über Kugel und Zylinder«, »Über Konoide und Sphäroide« sowie »Über Spiralen«. Es ist schwer zu sagen, ob sich Archimedes bewußt war, daß es in jeder von ihm behandelten Aufgabe um ein und denselben mathematischen Begriff ging — um den Begriff des bestimmten Integrals. Jedenfalls besaß er noch keine Mittel, um eine allgemeine Definition des Integrals zu geben. Außerdem interessierten Archimedes nicht in erster Linie die Methoden, sondern die Ergebnisse — zum Beispiel, daß die Oberfläche der Kugel viermal größer ist als die Fläche ihres Großkreises und daß das Volumen der Kugel zwei Drittel des Volumens eines sie umschreibenden Zylinders beträgt. Über das letzte Ergebnis war Archimedes besonders stolz; deshalb wurde auf seinem Grab ein Denkmal errichtet, das eine in einem Zylinder befindliche Kugel darstellt.

Außer den Methoden zur Berechnung der Flächen und Volumina erarbeitete Archimedes eine Methode zur Bestimmung der Tangente einer Kurve, die praktisch auf die Ermittlung des Differentialquotienten hinausläuft. Aus irgendwelchen Gründen wird diese Methode nur in der Schrift »Über Spiralen« dargelegt, wo sie für die Ermittlung der Tangente der Spirale  $\rho = a\varphi$  (der sog. Archimedischen Spirale, Abb. 7) verwendet wird, jedoch sind die Überlegungen von Archimedes allgemeinen Charakters und auf jede differenzierbare Kurve anwendbar. Dieselbe Methode verwendet Archimedes, um die Extremwerte algebraischer Ausdrücke zu ermitteln, die in Form von geometrischen Kurven dargestellt werden können. In der modernen Terminologie kann man sagen, daß Archimedes die Existenz der positiven Wurzeln von Kubikgleichungen eines bestimmten Typs vollständig erforscht hat. Das Problem der Bestimmung von Extremwerten ist bei Archimedes dem Problem der Ermittlung der Tangente der entsprechenden Kurve identisch.

Außer den an Dositheos gerichteten Schriften wurden uns vollständig oder partiell auch einige andere mathematische Arbeiten des Archimedes überliefert. So verfügen wir über ein Fragment aus seinem Buch »Kreismessung«, in dem eine Reihe von Theoremen bewiesen wird, die sich auf die Eigenschaften des Kreises beziehen (ein vollständigerer Text dieses Aufsatzes ist in arabischer Übersetzung erhalten geblieben). In einem

dieser Theoreme beweist Archimedes unter Verwendung der Exhaustionsmethode, daß die Fläche des Kreises der Fläche eines rechtwinkligen Dreiecks gleich ist, deren Katheten dem Radius bzw. dem Umfang des Kreises gleich sind. Dabei erhielt Archimedes einen Näherungswert für das Verhältnis von Kreisumfang und Durchmesser, d. h. die Zahl  $\pi$ . Die Berechnung der Umfänge der dem Kreis eingeschriebenen und umschriebenen Vielecke führte Archimedes zu der Ungleichung

$$3 \frac{10}{71} < \frac{\text{Kreisumfang}}{\text{Durchmesser}} < 3 \frac{1}{7} \cdot *$$

Neben den streng mathematischen Methoden bedient sich Archimedes auch heuristischer Verfahren. Bereits in der

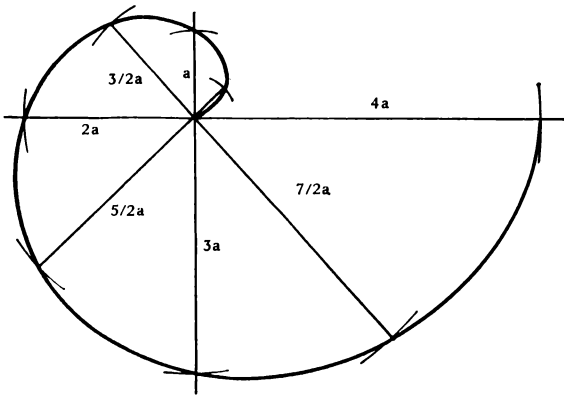


Abb. 7. Die Archimedische Spirale ( $\rho = a\varphi$ )

»Quadratur der Parabel« wird das parabolische Flächenstück nicht nur nach der Exhaustionsmethode, sondern auch »mechanisch« bestimmt. Die Begründung solcher Prozeduren ist in der Handschrift eines früher unbekanntes Werkes des Archimedes enthalten, die in Konstantinopel vom Privatdozenten der Petersburger Universität Popadopulo Karamews entdeckt und vom bekannten dänischen Philologen I. L. Heiberg in den Jahren 1906—1908 entziffert wurde. In dieser an Eratosthenes gerichteten »Methodenlehre« beweist Archimedes mittels des Hebelgesetzes eine Reihe von Theoremen, die in anderen Aufsätzen von ihm mathema-

\* Die beiden Brüche ergeben die ersten drei Ziffern der Zahl  $\pi : 3,14 \dots$

tisch streng bewiesen werden. Dabei schreibt Archimedes: »Einiges von dem, was ich früher mit Hilfe der Mechanik festgestellt hatte, wurde später auch auf geometrischem Wege bewiesen.« Solche »mechanischen« Methoden konnten selbstverständlich nicht auf alle Aufgaben dieser Art angewendet werden. Sie stellen ein Umgehen des Integrierens dar, wenn die einen Integrale durch andere, schon bekannte, ausgedrückt werden können. Dies steht nicht im Widerspruch zu der Tatsache, daß Archimedes die mechanischen Methoden verwendete, lange bevor er die Integralmethode ausarbeitete, die eine Weiterentwicklung der Exhaustionsmethode des Eudoxos war.

Archimedes' Schrift »Sandzahl«, die uns vollständig überliefert wurde, gehört zu den späten Werken des großen Mathematikers von Syrakus. Diese Schrift ist eng mit der astronomischen Problematik verknüpft. Der mathematische Gehalt der »Sandzahl« läuft auf die Entwicklung eines Systems der Klassifizierung von großen Zahlen hinaus. Diese Klassifizierung endet mit einer Zahl, die in moderner Schreibweise als

$$(10^8)^{10^{14}}$$

ausgedrückt werden kann.

Die Größe dieser Zahl muß die Menschen der Antike, die es nicht gewohnt waren, mit sehr großen Zahlen zu operieren, fasziniert haben. Im Vergleich zu dieser Zahl würde die Zahl der Sandkörner, die eine Kugel von der Größe der Fixsternsphäre füllen würden, nach Archimedes' Berechnungen der relativ kleinen Zahl  $10^{63}$  entsprechen.

Nicht alle mathematischen Schriften von Archimedes sind uns überliefert worden. So kennen wir die Bücher »Lemmata«, »Über das Siebneck« und »Über sich berührende Kreise« nur in arabischer Überlieferung; einige von Archimedes bewiesene geometrische Theoreme sind im mathematischen Traktat des mittelasiatischen Gelehrten Al-Biruni (973—1048) erhalten geblieben; von vielen anderen Büchern (darunter auch von der Schrift »Über die Parallellinien«) sind uns nur die Titel überliefert worden. Aber selbst das uns Bekannte reicht aus, um Archimedes als den größten Mathematiker des Altertums und Vorläufer der höheren Mathematik der Neuzeit anzusehen.

Der dritte große Mathematiker der Epoche des Hellenis-

mus, Apollonios von Perge (in Pamphylien, einem kleinen Gebiet an der Südküste Kleinasiens), arbeitete und lebte in Alexandria und Pergamon am Ende des 3. Jahrhunderts v. u. Z. Das berühmteste Werk des Apollonios, »Die Kegelschnitte« (Konika), ist der Theorie der Kurven zweiter Ordnung (Ellipse, Hyperbel und Parabel) gewidmet. Das Werk des Apollonios ist nicht vollständig überliefert; von seinen acht Büchern verfügen wir nur über vier in griechischer Originalsprache und über die arabische Übersetzung drei weiterer, das achte Buch hält man für verloren, obwohl man sich über seinen Inhalt in der »Mathematischen Sammlung« von Pappos ein Bild machen kann. Lange Zeit hatte das Werk von Apollonios keinen Einfluß auf die Entwicklung der Wissenschaft. Erst im 17. Jahrhundert, im Zusammenhang mit der Entwicklung der analytischen Geometrie, der Mechanik und der neuen Theorie der Planetenbewegung, die von Kepler entwickelt wurde, haben die Ideen von Apollonios wieder Geltung erlangt. Die Theorie der Kegelschnitte von Apollonios gehört zu den mathematischen Theorien, die geschaffen wurden, bevor in den mathematischen Naturwissenschaften die Notwendigkeit dafür bestand.

Von den anderen mathematischen Aufsätzen von Apollonios ist nur eine kleine Schrift in zwei Büchern (in arabischer Übersetzung) — »Über den Verhältnisschnitt« — vollständig erhalten geblieben. Darin wird folgende Aufgabe behandelt: Gegeben sind zwei Geraden in einer Ebene und auf jeder ein Punkt; durch einen dritten Punkt ist eine Gerade so zu legen, daß sie auf den gegebenen Geraden von den gegebenen Punkten aus Strecken in einem gegebenen Verhältnis abschneidet. Das erste Buch betrachtet den Fall, wenn die gegebenen Geraden parallel verlaufen, das zweite Buch ihre Kreuzung (Abb. 8). Apollonios zeigt, daß diese Aufgabe auf die Lösung einer Quadratgleichung hinausläuft.

Apollonios schrieb noch zwei weitere Bücher zu analogen Themen; davon wissen wir von Pappos.

Im Buch »Über den Schnitt mit einer vorgegebenen Fläche« wurde eine Aufgabe behandelt, die der vorhergehenden analog ist: Die beiden abgeschnittenen Strecken müssen nach ihrer Multiplikation ein Rechteck mit einer vorgegebenen Fläche ergeben.

Im Buch »Über einen bestimmten Schnitt« geht es um folgendes: Auf einer Geraden sind vier Punkte gegeben;

$A, B, C, D$ . Man soll den Punkt  $P$ , der auf derselben Geraden liegt, so bestimmen, daß das Produkt  $AP \cdot CP$  ein vorgegebenes Verhältnis zu  $BP \cdot DP$  hat.

Einige Schriften von Apollonios sind uns aus Literaturhinweisen von Pappos und anderen jüngeren Autoren bekannt.

Im Buch »Über das Tangieren« wird die bekannte Aufgabe von Apollonios gestellt: Gegeben sind drei Objekte, von denen jedes ein Punkt, eine Gerade oder ein Kreis sein kann. Es soll die Kreislinie gefunden werden, die durch alle

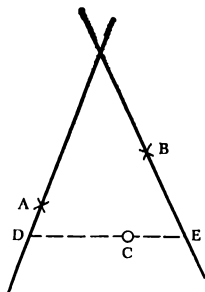


Abb. 8. Theorem des Apollonios über den Schnitt in einem gegebenen Verhältnis  $(AD/BE) = p, p$  — gegebene Zahl)

drei Punkte geht und die vorgegebenen Geraden oder Kreise tangiert.

Im Buch »Über ebene geometrische Orte« hat Apollonios eine Reihe von Sätzen bewiesen, die geometrische Orte von Geraden und Kreisen behandeln. Einige dieser Sätze werden von Pappos zitiert. Es ist interessant, daß in diesem Buch die Inversion in der Ebene und die Homothetie zum ersten Mal als Transformationen verwendet werden, die »ebene Orte« (Geraden und Kreise) in gleiche Orte überführen.

Das Buch »Über den Vergleich des Dodekaeders und Ikosaeders« wird von Hypsikles in der Einleitung zu dem Buch XIV der »Elemente« von Euklid erwähnt. Dort wird bewiesen, daß die Oberflächen von Dodekaeder und Ikosaeder im gleichen Verhältnis wie ihre Volumina stehen, wenn das Dodekaeder und das Ikosaeder in ein und dieselbe Kugel einbeschrieben sind.

Es sind auch noch die Titel einiger anderer Schriften von Apollonios bekannt, über ihren Inhalt aber liegen keine genauen Angaben vor. Darunter befand sich zum Beispiel die Schrift »Über nicht geordnete Irrationalitäten«, in der

vermutlich die in Euklids »Elementen« enthaltene Klassifizierung irrationaler Größen auf breitere Klassen von Irrationalitäten ausgedehnt wurde. Leider verfügen wir über keine Hinweise, wie weit Apollonios auf diesem Gebiet fortgeschritten war.

Zahlreiche Quellen, ob die Originaltexte von Apollonios oder die Zeugnisse von Mathematikern späterer Zeiten, bestätigen Apollonios' mathematische Fähigkeiten. Die griechische Algebra erreichte in seinen Werken ihren Höhepunkt. Für eine erfolgreiche Entwicklung nach Apollonios hätte die antike Mathematik neuer Impulse bedurft; diese Impulse konnten jedoch aus der damaligen Wirklichkeit nicht mehr geschöpft werden.

Neben Euklid, Archimedes und Apollonios lebten und arbeiteten in Alexandria und in anderen Kulturzentren des 3./2. Jahrhunderts v. u. Z. auch die sogenannten kleinen Mathematiker, die keine neuen Ideen hervorbrachten oder prinzipiell neue Theorien entwickelten. Trotzdem verdienen einige von ihnen, daß ihre Namen nicht in Vergessenheit geraten.

Konon von Samos, ein älterer Freund von Archimedes, haben wir bereits erwähnt. Über seine eigenen mathematischen Leistungen ist uns nichts bekannt; er dürfte allerdings eher Astronom als Mathematiker gewesen sein.

Die mathematischen Werke eines anderen Zeitgenossen von Archimedes, des Eratosthenes von Kyrene, waren nicht so bedeutsam wie seine Arbeiten auf dem Gebiet der Geographie und Chronologie, jedoch zeugen sie von der Originalität und vom schöpferischen Geist ihres Verfassers. So lieferte Eratosthenes eine mechanische Lösung der berühmten Aufgabe der Würfelverdopplung; diese Lösung im kurzen mathematischen Beweis und ein Epigramm wurden in Marmor gehauen. Eratosthenes befaßte sich mit der Zahlentheorie und schlug einen originellen Weg vor, wie man die Primzahlen aus der Folge aller ungeraden Zahlen aussondern kann (das sog. Sieb des Eratosthenes). Im Dialog »Platonikos« erörterte er arithmetische Grundprobleme mit dem Ziel, Regeln zur Bildung zweier mittlerer Proportionalen zu finden.

Nikomedes, ein älterer Zeitgenosse des Apollonios, ist hauptsächlich dadurch bekannt, daß er eine neue algebraische Kurve — die Konchoide — entdeckte. Sie wird erzeugt von den Enden der Strahlen, die von einem Punkt  $C$  aus-

gehen und eine Gerade schneiden, wobei die Entfernung

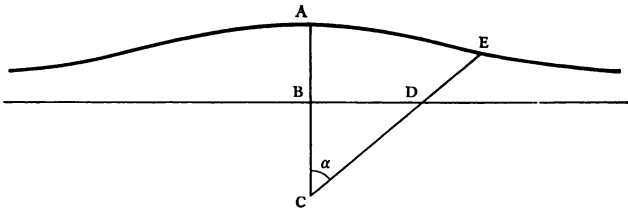


Abb. 9. Konchoide (oder Kochloide) des Nikomedes. Bei beliebigem  $\alpha$  (kleiner als  $90^\circ$ )  $\overline{AB} = \overline{DE}$

von dieser Geraden bis zum Strahlende immer gleich ( $\overline{AB} = \overline{DE}$ ) bleibt (Abb. 9). In Polarkoordinaten hat die Kurve die Gleichung:  $\varrho = \frac{\overline{BC}}{\cos \alpha}$

Wie die Quellen berichten, war Nikomedes sehr stolz auf seine Kurve und baute ein Gerät für ihre Konstruktion. Er wendete seine Kurve für die Lösung der Aufgabe der Würfelverdopplung und der Dreiteilung des Winkels an.

Auf die zweite Hälfte des 2. Jahrhunderts v. u. Z. geht das Schaffen von Diokles zurück, der eine andere algebraische Kurve, die Zissoide, untersuchte. Sie wird auf folgende Weise konstruiert: Gegeben sind zwei aufeinander senkrechtstehende Durchmesser eines Kreises  $AB$  und  $CD$ . Die Punkte  $K$  und  $L$  sollen sich von  $B$  nach beiden Seiten entfernen, jedoch immer in gleicher Entfernung vom Durchmesser  $AB$  bleiben. Errichten wir aus dem Punkt  $L$  auf den Durchmesser  $CD$  eine Senkrechte, so ergibt der Schnitt der Senkrechten mit der Geraden  $KD$  den Punkt, der im Zuge der Entfernung des  $K$  und des  $L$  von  $B$  eine Zissoide beschreiben wird (Abb. 10). Mittels dieser Kurve löste Diokles ebenfalls die Aufgabe der Würfelverdopplung. Außerdem schlug er seine Lösung der Archimedischen Kugelteilungsaufgabe in einem bestimmten Verhältnis vor; sie ging allerdings schon im Altertum verloren.

Zwischen dem 3. Jahrhundert v. u. Z. und dem Beginn unserer Zeitrechnung lebte Zenodoros, der Autor der Schrift »Über isoperimetrische Figuren« (das sind Figuren gleichen Umfangs), in dem unter anderem gezeigt wurde,

daß erstens von zwei regelmäßigen Vielecken mit gleichen Umfängen das Vieleck mit höherer Eckenzahl den größeren Flächeninhalt hat;

daß zweitens der Kreis eine größere Fläche einschließt als jedes regelmäßige Vieleck mit gleichem Umfang;

daß drittens unter allen Vielecken gleichen Umfangs und gleicher Eckenzahl das regelmäßige Vieleck den größten Flächeninhalt besitzt.

Die Folge dieser Theoreme ist, daß unter allen Figuren gleichen Umfangs der Kreis die größte Fläche hat. Zenodoros behauptete auch, daß unter allen Körpern mit gleicher Oberfläche die Kugel das größte Volumen hat. Diese Be-

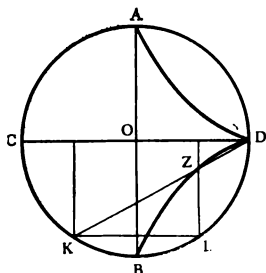


Abb. 10. Konstruktion einer Zissoide

hauptung bewies er nicht in ihrer Allgemeinheit, sondern nur folgende Theoreme:

1. Wenn man ein regelmäßiges Vieleck mit gerader Eckenzahl um seine längste Diagonale dreht, entsteht ein Körper, dessen Volumen kleiner ist als das einer Kugel mit gleicher Oberfläche.

2. Die Volumina der fünf regulären Polyeder sind kleiner als das einer Kugel mit der gleichen Oberfläche.

Schließlich soll der Name Hypsikles fallen, der im 2. Jahrhundert v. u. Z. in Alexandria lebte. Er schrieb über reguläre Polyeder und knüpfte dabei an das Buch XIII der »Elemente« von Euklid an. Vielleicht wurde er gerade deswegen später in die »Elemente« in Buch XIV aufgenommen und so bis in unsere Zeit überliefert. In dieser Schrift untersuchte Hypsikles Dodekaeder und Ikosaeder, die in ein und dieselbe Kugel einbeschrieben sind, und zeigte, daß sich ihre Volumina bzw. ihre Oberflächen zueinander verhalten wie die Würfelkante zur Ikosaederkante. Andere rein mathematische Arbeiten des Hypsikles kennen wir nicht; allerdings enthalten die Quellen einen Hinweis darauf, daß er über Polygonzahlen schrieb und somit an die pythagoreische Tradition anknüpfte.

Diokles, Zenodoros und Hypsikles (und überhaupt alle Mathematiker der hellenistischen Epoche nach Apollonios) werden gewöhnlich als »Epigonen« bezeichnet. Sie waren tatsächlich Epigonen — in dem Sinne, daß sie dem epochemachenden Massiv der antiken Mathematik, zusammengetragen von den Genies im 4. — 3. Jh. v. u. Z., nur Details hinzufügten, die nicht über den Rahmen der bereits bestehenden Ideen und Theorien hinausreichten.

## Astronomie

Im vorangegangenen Kapitel haben wir die Leistungen der antiken Astronomie der klassischen Periode dargelegt und auf eine wesentliche Schwäche des Sphärenmodells des Eudoxos hingewiesen. Die Helligkeitsschwankungen des Merkur und der Venus hatte vielleicht schon Herakleides richtig erklärt, aber dasselbe Phänomen machte sich auch bei den anderen Planeten bemerkbar, besonders beim Mars. Befindet er sich in Opposition zur Sonne, scheint er wesentlich heller als zur Zeit seiner Konjunktion, wobei die Oppositionen und Konjunktionen an beliebigen Stellen des Tierkreises stattfinden. Erklären ließ sich das auf zweierlei Weise: Entweder kreist der Mars um die Sonne, wobei die Sonne ihrerseits um die Erde kreist, oder aber kreist die Erde, zwischen Sonne und Mars stehend, um die Sonne. Zur ersten Erklärung entschloß sich schon in der Neuzeit der dänische Astronom Tycho Brahe: Bei ihm kreisten alle fünf sichtbaren Planeten um die Sonne, während die Sonne selbst — entsprechend der traditionellen geozentrischen Denkweise — um die Erde kreiste. Die zweite von diesen Annahmen, welche einen Übergang zum heliozentrischen Weltsystem bedeutete, gehörte dem großen Astronomen des Altertums, Aristarch.

Aristarch von Samos wurde in der zweiten Hälfte des 4. Jahrhunderts v. u. Z. geboren und starb vermutlich Mitte des 3. Jahrhunderts v. u. Z.; er war also ein Zeitgenosse des Euklid, Epikur und Straton. Über sein Leben wissen wir nichts bis auf die Tatsache, daß er um 288 bis 277 v. u. Z. in Alexandria astronomische Beobachtungen ausführte. Das Hauptwerk von Aristarch, in dem er sein Weltsystem darlegte, ist verlorengegangen; über seinen Inhalt berichtet Archimedes kurz in der »Sandzahl«. Auch Plutarch bezeugt, Aristarch habe nicht nur die Rotation der

Erde, sondern auch ihre Bewegung um die Sonne angenommen. Erhalten geblieben ist nur eine kurze Abhandlung von Aristarch »Über die Größen und Abstände der Sonne und des Mondes«. Sie wurde nach dem Muster der mathematischen Schriften jener Zeit abgefaßt und besteht aus einer Reihe voneinander abgeleiteter Theoreme, denen sechs grundlegende Prämissen oder »Hypothesen« vorausgeschickt wurden, die in der Hauptsache auf Daten beruhen, die beim Beobachten von Mondfinsternissen gewonnen wurden. Aufgrund dieser Daten kommt Aristarch zu folgenden Schlüssen: Erstens macht die Entfernung von der Erde bis zur Sonne ungefähr 18 bis 20 Entfernungen der Erde bis zum Mond aus; zweitens stehen die Durchmesser der Sonne und des Mondes in demselben Verhältnis zueinander wie ihre Entfernung zu der Erde; drittens muß das Verhältnis des Durchmessers der Sonne zu dem der Erde im Bereich zwischen  $19/3$  und  $43/6$  liegen. Daraus folgt, daß das Volumen der Sonne um  $(19/3)^3$  bzw. um das 250fache größer sein muß als das der Erde.

Auf welche Weise gelangte nun Aristarch zu diesen Werten, die sich, generell gesprochen, von den tatsächlichen Verhältnissen sehr stark unterschieden? Als Beispiel sehen wir uns das erste von den genannten Verhältnissen an — die Relation zwischen den Entfernungen Erde — Sonne und Erde — Mond. Aristarch fixierte den Moment, wenn der Mond sich im ersten (oder letzten) Viertel befindet, d. h., wenn wir eine Hälfte der Mondscheibe beleuchtet sehen. Es ist offensichtlich, daß in diesem Augenblick die Strecken Erde — Mond und Mond — Sonne einen rechten Winkel bilden. Darauf bestimmte Aristarch den Winkel, der in diesem Augenblick die Geraden bildete, die die Sonne mit dem Mond und mit der Erde verbanden (Abb. 11). Dieser Winkel entsprach nach seinen Beobachtungen  $1/30$  des rechten Winkels ( $\alpha = 3^\circ$ ). Die Aufgabe besteht — modern gesprochen — in der Bestimmung des Kehrwertes von  $\sin \alpha$ . Mit Hilfe geometrischer Konstruktionen ermittelte Aristarch Ungleichungen, die das Verhältnis Erde — Sonne/Erde — Mond in enge Grenzen setzte, und zwar

$$18 < \frac{E-S}{E-M} < 20.$$

Die mathematischen Überlegungen Aristarchs sind unanfechtbar. Warum erwies sich dann der von ihm ermittelte

Verhältnswert  $(\dot{E}-S)/(\dot{E}-\dot{M})$  als weit vom wirklichen Wert entfernt? Weil der von ihm angenommene Winkel  $\alpha$  etwa 18mal größer war als der tatsächliche (er beträgt nur ungefähr  $10'$ ). Mangelhaft waren nicht die mathematischen Methoden, sondern die Beobachtungstechnik.

Wenn wir das Verhältnis  $(E-S)/(E-M)$  kennen und die Tatsache berücksichtigen, daß die scheinbaren Durchmesser der Sonne und des Mondes ungefähr gleich sind, kommen wir unmittelbar zu dem Schluß, daß der Durchmesser der Sonne in Wirklichkeit 19mal größer sein muß als der des Mondes.

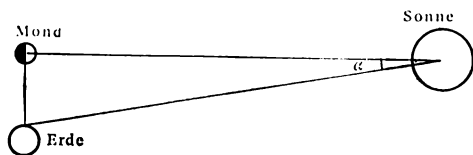


Abb. 11. Methode zur Bestimmung des Verhältnisses der Entfernungen Erde — Mond und Erde — Sonne nach Aristarch  
 $(E - M)/(E - S) = \sin \alpha \simeq \alpha$

Etwas komplizierter verhielt es sich mit der Bestimmung des Verhältnisses des Durchmessers der Sonne zum Durchmesser der Erde. Bei der Ermittlung dieses Verhältnisses machte sich Aristarch eine der sechs »Hypothesen« zunutze, die er am Anfang seiner Schrift formulierte, und zwar daß die Breite des Erdschattens zwei Monddurchmesser betrage. Mit Hilfe dieser Hypothese und des oben ermittelten Verhältnisses zwischen der Entfernung Erde — Mond und Erde — Sonne findet Aristarch das gesuchte Verhältnis (die Durchmesser von Sonne und Erde stehen in einem Verhältnis, das zwischen  $19/3$  und  $43/6$  liegt).

Unter den sechs »Hypothesen« von Aristarch findet man auch folgende Behauptung: »Der Durchmesser des Mondes ist gleich  $1/15$  eines Tierkreiszeichens«, d. h.  $2^\circ$ . Das ist ein großer Fehler, den man häufig zitiert, um die Unvollkommenheit der Beobachtungsmittel des Aristarch vor Augen zu führen (in Wirklichkeit beträgt der sichtbare Durchmesser des Mondes  $0,5^\circ$ ). Allerdings berichtet Archimedes in der »Sandzahl«, daß der Durchmesser des sichtbaren Kreises der Sonne (und folglich auch des Mondes?) nach Aristarch  $1/720$  des Kreises beträgt, was der Wirklichkeit entspricht. Wie erklärt sich aber dieser Fehler? Vielleicht resultiert

er aus einer Nachlässigkeit des Kopisten? Unabhängig von der Entscheidung dieser Teilfrage kann als sicher angenommen werden, daß Aristarch nicht sonderlich großen Wert auf die Genauigkeit der Beobachtungsergebnisse legte, die er sich zunutze machte. Der Lösung seiner astronomischen Aufgaben näherte er sich eher als Mathematiker denn als Astronom, für den es bei der Ausführung von Beobachtungen vor allem auf Genauigkeit ankommt.

Diese kritischen Bemerkungen sollen die Bedeutung des Aristarch für die Entwicklung der exakten Naturforschung keinesfalls schmälern. In der Geschichte der Mathematik besteht sein unverkennbares Verdienst darin, daß er — wenn auch noch in versteckter Form — die trigonometrischen Funktionen zum Ansatz brachte.

In der astronomischen Wissenschaft kommt die Größe von Aristarch vor allem darin zum Ausdruck, daß er als erster versuchte, anhand der durch die Beobachtung gewonnenen Angaben sowohl die relativen Größen der Himmelskörper (der Erde, des Mondes und der Sonne) als auch die relativen Entfernungen zwischen ihnen zu bestimmen. Das war ein Schritt von enormer Tragweite, der im Grunde genommen sogar bedeutsamer war als die Schaffung des ersten heliozentrischen Systems des Universums, was man traditionell als die wichtigste astronomische Errungenschaft des Aristarch betrachtet.

In der Tat, es gibt allen Grund zur Annahme, daß Aristarch das heliozentrische Kosmosmodell als selbstverständliche Folgerung aus den von ihm gewonnenen Erkenntnissen über die relativen Abmessungen der Sonne und der Erde ansah.

Im 5. Jahrhundert v. u. Z. äußerte Anaxagoras die Vermutung, daß die Sonne in ihrer Größe den Peloponnes übertreffen kann, was für jene Zeit eine kühne Behauptung war. Nicht viel weiter scheint Aristoteles gegangen zu sein. Und nun behauptete Aristarch, daß die Sonne 250mal größer ist als die Erde. Und obwohl diese Zahl weit unter dem wirklichen Wert lag (wissen wir doch heute, daß die Sonne die Erde in Wirklichkeit dem Volumen nach mindestens um das Millionenfache übertrifft), war sie groß genug, um Zweifel an der Richtigkeit des traditionellen geozentrischen Weltbildes hervorzurufen. Wenn die Sonne im Vergleich zu der Erde so groß ist, sollte sie dann nicht das Zentrum des Universums bilden? Diese Annahme war um so mehr ange-

bracht, weil sie zu einer radikalen Vereinfachung des Aufbaus des Kosmos geführt hätte und die Interpretationsschwierigkeiten im Zusammenhang mit der wechselnden Helligkeit einiger Planeten auf eine einfachere Art und Weise gelöst hätte. Und gerade diese Schwierigkeit war die schwächste Stelle in den homozentrischen Weltmodellen der Gelehrten des 4. Jahrhunderts v. u. Z.

Es ist anzunehmen, daß Aristarch gerade auf diese oder ähnliche Weise seine heliozentrische Konzeption begründete. Dem Argument, die Bewegung der Erde müsse sich am Fixsternhimmel widerspiegeln, begegnete er durch die Annahme der unermesslichen Größe der Fixsternsphäre: Das bedeutete, wie Archimedes in der »Sandzahl« bezeugt, anzunehmen, nicht nur der Erdradius, sondern auch der des Erdbahnkreises sei verschwindend klein im Vergleich zur Entfernung zu den Fixsternen.

Trotz aller stichhaltigen Argumente fand das von Aristarch vorgeschlagene heliozentrische Weltmodell bei der Mehrheit der Astronomen keine Unterstützung; sein einziger uns bekannter Anhänger war Seleukos aus Seleukeia, ein origineller Denker, der im 2. Jahrhundert v. u. Z. lebte. Seleukos war der erste Gelehrte, der die Abhängigkeit der Ebbe und Flut von der Stellung des Mondes feststellte. Er verfocht auch die These von der Unendlichkeit des Universums und knüpfte in dieser Hinsicht an die Atomisten an.

Gegen die Hypothese von Aristarch wurden Argumente vorgebracht, die zu jener Zeit als gewichtig erschienen. So wendete zum Beispiel Ptolemaios gegen die Annahme der Rotation der Erde ein, daß alles auf ihrer Oberfläche Befindliche und mit ihr nicht fest Verbundene (z. B. die Wolken) stets in westliche Richtung fliegen müßte. Andere Argumente gegen das System von Aristarch waren schon rein astronomischer Natur. Nach Aristarch bewegen sich alle Planeten und die Erde gleich- und kreisförmig um die Sonne. Das machte die Interpretation der beobachteten Unregelmäßigkeiten in der Bewegung von Himmelskörpern, die im geozentrischen Weltsystem bei Hinzufügen von Kreisbewegungen berücksichtigt werden konnten, unmöglich. Bereits die Athener Astronomen Meton und Euktemon wußten im 5. Jahrhundert v. u. Z., daß die Länge der vier Jahreszeiten ungleich ist — als ob sich die Sonne auf ihrer Kreisbahn bald schneller, bald langsamer bewegen würde.

Indessen folgte aus dem heliozentrischen System von Aristarch, daß die Länge der vier Jahreszeiten immer gleichbleibt. Es muß berücksichtigt werden, daß im 3. Jahrhundert v. u. Z. die Ergebnisse jahrhundertelanger Beobachtungen babylonischer Astronomen den Griechen bekannt waren; die Daten der Babylonier gaben die Möglichkeit, die griechischen Beobachtungen der Himmelskörperbewegungen zu präzisieren, wobei das Beobachtungsmaterial in der Regel nicht für das System von Aristarch sprach. Ähnliche Gegenargumente wurden im 15. Jahrhundert gegen das heliozentrische Weltsystem von Kopernikus vorgebracht. Sie schienen sehr einschneidend, wurden jedoch bald durch die große Entdeckung von Kepler entkräftet, durch die der wahre Charakter der Bewegung der Himmelskörper, nämlich auf elliptischen und nicht auf Kreisbahnen, festgestellt wurde. Die antike Wissenschaft hatte ihren Kopernikus in Aristarch, aber keinen Kepler.

Leider wissen wir sehr wenig über die astronomischen Arbeiten des Archimedes. Die Aussagen von Archimedes lassen darauf schließen, daß er das heliozentrische System von Aristarch nicht akzeptierte und in Übereinstimmung mit der herrschenden Meinung glaubte, daß die Erde im Zentrum der Welt liege. Nach Aussagen des römischen Schriftstellers Macrobius hat Archimedes ausgerechnet, wieviel Stadien die Erde von dem Mond, der Venus, dem Merkur, der Sonne, dem Mars, dem Jupiter und dem Saturn entfernt ist. Wenn das Zeugnis des Macrobius auf Tatsachen beruht, wäre es sehr interessant zu rekonstruieren, was für Überlegungen Archimedes seinen Berechnungen zugrunde gelegt hat. Darüber wissen wir jedoch nichts.

In der »Sandzahl« entwickelte Archimedes eine detaillierte Beschreibungsmethode, die er für die Messung des scheinbaren Sonnendurchmessers angewandt hat. Diese Beschreibung zeugt von der großen experimentellen Meisterschaft des Archimedes (in seinen Berechnungen hat er sogar die Größe der menschlichen Pupille berücksichtigt). Der von ihm erhaltene Wert wird durch eine obere und eine untere Grenze gekennzeichnet (in heutiger Schreibweise —  $32'55''$  und  $27'$ ), wobei die obere Grenze dem wahren Wert sehr nahe kommt (schwankt zwischen  $31'28''$  und  $32'37''$ ).

Es ist ebenfalls bekannt, daß Archimedes ein Planetarium gebaut hat — eine leere, sich drehende Sphäre mit einem Mechanismus, der die Bewegung des Mondes, der

Sonne und der fünf Planeten imitierte. Nach dem Tode des Archimedes wurde das Planetarium nach Rom überführt, wo es auch Cicero bewundert hat. Bezug zu diesem Planetarium hatte möglicherweise der für uns nicht mehr zugängliche Aufsatz des Archimedes »Über die Anfertigung von Sphären«.

Unter den Astronomen, die in dieser Epoche wirkten, sollten außer Konon und Dositheos zwei Astronomen erwähnt werden, die ebenfalls in der ersten Hälfte des 3. Jahrhunderts v. u. Z. in Alexandria lebten. Es sind Aristyllos und Timocharis. Sie waren typische Beobachter, die sich mit der Vermessung der Fixsternörter, dem Feststellen der Tag- und nachtgleichen usw. befaßten. Sie bedienten sich dabei spezieller Instrumente, die mit graduierten Kreisen versehen waren.

Die Daten von Aristyllos und Timocharis wurden später von Hipparch verwendet.

Einen unmittelbaren Bezug zur Astronomie hatte auch die Bestimmung der Größe des Erdballs, die von Eratosthenes vorgenommen wurde. Aber Eratosthenes verfaßte auch noch andere astronomische Arbeiten, insbesondere wird ihm die Neubestimmung der Neigung der Ekliptik zugeschrieben. Mitte des 4. Jahrhunderts v. u. Z. hatte Eudoxos diese Neigung als Bogen des Kreisumfangs bestimmt, der eine Seite eines regelmäßigen Fünfecks spannt, d. h.  $24^\circ$ . Nach Eratosthenes hingegen beträgt die Hälfte des Unterschiedes zwischen der Höhe der Sonne zur Sommer- und Wintersonnenwende ungefähr  $\frac{11}{83}$  des halben Kreisumfangs, was, in Grad ausgedrückt, einer Neigung von  $23^\circ 51'$  entspricht und dem wahren Wert sehr nahe kommt.

Das Sexagesimalsystem der Einteilung in Grade taucht zum ersten Mal im 2. Jahrhundert v. u. Z. bei Hypsikles auf. In seiner Schrift »Über die Aufgänge« legt Hypsikles eine Näherungsmethode zur Bestimmung der Zeitabschnitte dar, in denen einige Zeichen des Tierkreises auf- und untergehen. Dabei teilt er, ähnlich wie die Babylonier, 24 Stunden in 360 »Zeitgrade«. Diese Arbeit zeigt deutlich die Bekanntschaft mit babylonischen Quellen; es wurde sogar schon die Meinung vertreten, daß von Hypsikles überhaupt nur die ersten Sätze dieser Arbeit stammten und der Rest aus babylonischen Texten abgeschrieben worden sei.

Der größte Astronom der Alexandrinischen Epoche war Hipparch aus Nikaia (in Bithynien im Nordwesten Klein-

asiens). Sein Wirken fällt in die Mitte des 2. Jahrhunderts v. u. Z. (zwischen 160—120). Er stellte an verschiedenen Orten Beobachtungen an, darunter auch in Alexandria. Aber sein hauptsächlichster Aufenthaltsort war die Insel Rhodos. Von der Vielzahl der Aufsätze von Hipparch sind uns nur die »Kommentare zu Aratos« überliefert, aber zum Glück sind hinreichend ausführliche Zeugnisse über seine astronomischen Leistungen in Ptolemaios' »Almagest« enthalten.

Die Verdienste Hipparchs um die Astronomie sind sehr groß. In der Geschichte der Astronomie ist sein Name vor allem mit der Epizykeltheorie verbunden. Freilich liegen die Anfänge der Ausarbeitung dieser Theorie schon im 3. Jahrhundert v. u. Z. Und auch damals wurde sie schon als Alternative zum homozentrischen Sphärenmodell angesehen. Einen großen Beitrag zur Epizykeltheorie leistete Apollonios von Perge. Ptolemaios gibt einen Lehrsatz des Apollonios wieder, der sich auf die Zeitpunkte bezieht, zu denen ein Planet, der sich auf einem kleinen Kreis um ein Zentrum bewege, das seinerseits auf einem großen Kreis um die Erde bewegt werde, scheinbar seine Bewegungsrichtung ändert. Die babylonischen Astronomen beobachteten und tabellierten diese Stillstände zwar sorgfältig, vermochten sie aber nicht zu erklären. Apollonios betrachtete das Phänomen rein geometrisch und zeigte, daß bei bestimmten Verhältnissen der Winkelgeschwindigkeiten des Zentrums des Epizykels und des Planeten, der sich auf dem Epizykel bewegt, solche Zeitpunkte existieren, zu denen sich der Planet scheinbar in einer Ruhelage befindet.

Hipparch entwickelte die Epizykeltheorie und schuf mit ihrer Hilfe ein vervollkommnetes geozentrisches Kosmosmodell. Dabei stellte er fest, daß, wenn die Umlaufzeit des Himmelskörpers auf dem Epizykel gleich der Umlaufzeit des Zentrums des Epizykels in entgegengesetzter Richtung um die Erde ist, die resultierende Bewegung dieses Körpers auf einer Kreisbahn verläuft, deren Zentrum nicht mit dem Zentrum der Erde zusammenfällt (Abb. 12). Solche Kreisbahnen nannte Hipparch Exzenter. Und um die Ungleichheit der Jahreszeiten erklären zu können, nahm er an, daß sich die Sonne auf einem solchen exzentrischen Kreis bewege. Aus der Länge der Jahreszeiten bestimmte Hipparch den Betrag der Exzentrizität und er arbeitete die Theorie der Sonnenbewegung vollständig aus. Was die Bewegungen

der Planeten betrifft, so wurde ihre ausführliche Theorie, die auf den Begriffen Epizykel und Exzenter beruht, dreihundert Jahre später von Klaudios Ptolemaios geschaffen.

Hipparchs Rolle in der Geschichte der Astronomie beschränkt sich aber keineswegs auf die Einführung der Exzenter. Er gilt mit Recht als Schöpfer der präzisen beobachtenden Astronomie. Ptolemaios erwähnt drei Schriften Hipparchs; »Von der Länge des Jahres«, »Von Schaltmonaten und Schalttagen« und »Von der Veränderung der Wende-

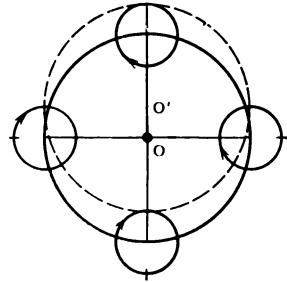


Abb. 12. Epizykel und Exzenter

und Nachtgleichenpunkte«. Wir wollen die von Hipparch erhaltenen und in diesen Schriften dargelegten Ergebnisse zusammenfassen.

Eine große Errungenschaft Hipparchs bestand in der Entdeckung der Erscheinung der Präzession (das Vorrücken der Äquinoktien), die von dem hohen meßtechnischen Niveau der griechischen Astronomie in der Alexandrinischen Epoche zeugt. Beim Vergleich seiner Beobachtungen mit denen von Timocharis, die ungefähr hundertfünfzig Jahre früher vorgenommen wurden, stellte Hipparch fest, daß sich in dieser Zeit der Herbstpunkt auf der Ekliptik um  $2^\circ$  von Ost nach West verschoben hatte. Dieser Wert entspricht dem modernen ziemlich genau (nach Messungen in jüngerer Zeit beträgt die Präzession  $50,3''$  im Jahr). Hieraus zog Hipparch den Schluß, daß das tropische Jahr, d. h. die Zeit zwischen zwei Durchgängen der Sonne durch den Frühlingspunkt, von dem auf die Fixsterne bezogenen siderischen Jahr zu unterscheiden sei. Hipparch errechnete die Dauer des tropischen Jahres zu 365 Tagen 5 Stunden 55 Minuten und 16 Sekunden, was um  $1/300$  Tag kürzer war als der gewöhnlich angenommene Wert von  $365 \frac{1}{4}$  Tagen. Nach heutigen Berechnungen betrug die Dauer eines Jahres zu Hipparchs

Zeiten 365 Tage 5 Stunden 48 Minuten und 56 Sekunden. Man muß angesichts dieser Differenz von etwa 6 Minuten berücksichtigen, daß die Feststellung der Tagundnachtgleichen keine leichte Aufgabe war und Fehler »bis zu mehr als einem Vierteltag« auftreten konnten, wie Ptolemaios schrieb.

Große Aufmerksamkeit widmete Hipparch auch dem Studium der Mondbewegungen. In dieser Frage konnte er sich auf babylonische Daten stützen, da die chaldäischen Astronomen die Mondbewegung mit besonderer Sorgfalt untersucht hatten. Hipparch verglich diese Daten mit den Ergebnissen seiner eigenen Beobachtungen; es ist bekannt, daß Hipparch im Zeitraum von 146 bis 135 v. u. Z. mehrere Mondfinsternisse beobachtete. Er bestimmte die Umlaufzeiten des Mondes und erhielt folgende Werte: synodische Periode\* — 29 Tage 12 Stunden 44 Minuten 3,3 Sekunden; siderische Periode — 27 Tage 7 Stunden 43 Minuten 13,1 Sekunden. Diese beiden Werte fallen mit einer Genauigkeit auf die Sekunde mit den modernen Werten zusammen und unterscheiden sich faktisch nicht von denen der babylonischen Tafeln. Im weiteren arbeitete Hipparch eine Theorie der Mondbewegung aus, indem er als seine Umlaufbahn einen exzentrischen Kreis annahm, der die Möglichkeit bot, die Veränderung der Geschwindigkeit des Mondes auf seiner Umlaufbahn gut zu erklären. Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß bei einer Sonnenfinsternis, die in der Region des Hellespont total war, in Alexandria nur  $\frac{4}{5}$  der Sonnenscheibe bedeckt waren (offensichtlich geht es hier um die Finsternis im Jahre 129 v. u. Z.), konnte Hipparch ziemlich genau die Entfernung der Erde vom Mond bestimmen, da der Abstand zwischen den Beobachtungspunkten bekannt war. Hipparch wird auch noch eine andere kluge Methode zur Bestimmung des Abstands zum Mond zugeschrieben: Er ging von Messungen des Schattens der Erde aus, wenn dieser vom Mond passiert wird.

In seinen Berechnungen machte Hipparch weitgehend von trigonometrischen Verhältnissen Gebrauch, freilich nicht mit den Bezeichnungen, die wir heute verwenden. Anstelle von Sinus- und Tangententafeln stellte er eine Sehnen-

---

\* Als synodische Periode des Mondes wird die Zeitspanne zwischen zwei gleichen Mondphasen bezeichnet; als siderische die auf die Fixsternsphäre bezogene Umlaufzeit.

tafel zusammen, in der die Längen der Sehnen in Abhängigkeit von den Winkeln, die sie umspannten, gegeben wurden. Es wird angenommen, daß diese Tafel in seinem Buch »Über die Geraden und die Kreise« enthalten war. Leider ist uns weder das Buch noch die Sehnentafel überliefert worden, so daß wir nicht sagen können, auf welche Weise Hipparch die Sehnen in der Tabelle errechnet hat. Es sei hier vermerkt, daß sich Hipparch bereits weitestgehend des babylonischen Systems der Kreisteilung in 360 Grad und weiter in Minuten und Sekunden bediente; seit dieser Zeit wird dieses System allgemein benutzt.

Einen beachtlichen Beitrag leistete Hipparch auch zur Astrometrie. Er stellte einen Fixsternkatalog zusammen, der vermutlich von etwa 850 Sternen die ekliptikale Länge und Breite enthielt. Später schrieb Plinius, Hipparch sei zur Erstellung des Katalogs durch das Erscheinen eines neuen Sterns angeregt worden. Wahrscheinlich bediente er sich eines bestimmten Instruments, das später die Bezeichnung »Armillarsphäre« erhielt.

Da sich Hipparch mit der Bestimmung der Jahreslänge und der Perioden des Mondes beschäftigte, war es ganz natürlich, daß er sich für die Vervollkommnung des Mond-Sonnen-Kalenders interessierte. Wir wissen bereits, daß der Athener Astronom des 5. Jahrhunderts v. u. Z., Meton, im Bestreben, den Sonnen- mit dem Mondkalender abzustimmen, einen 19jährigen Zyklus aufstellte, der 235 Mondmonate einschloß, von denen 110 Monate je 29 Tage und 125 Monate je 30 Tage hatten. Insgesamt umfaßte dieser Zyklus 6940 Tage. Der »Meton-Zyklus« fand in der Antike weite Verbreitung. Allerdings hatte er einen kleinen Mangel: Bei der allgemein anerkannten Dauer eines Jahres von  $365 \frac{1}{4}$  Tagen erhielt man eine gebrochene Zahl von Tagen, nämlich 6939,75 Tage. Um diesen Mangel zu beseitigen, schlug Kallippos vor, vier Meton-Zyklen zu je 6940 Tagen zusammenzufassen und dabei einen Tag wegzulassen. Der »Kallippos-Zyklus« bestand demnach aus 27 759 Tagen, die in 940 Monate unterteilt waren: 441 Monate je 29 Tage und 499 Monate je 30 Tage. Dieser Zyklus zerfiel in genau 76 Jahre mit jeweils  $365 \frac{1}{4}$  Tagen und in 940 synodische Perioden mit einer Dauer von 29 Tagen 12 Stunden 44 Minuten und 25,5 Sekunden (was nur um 22 Sekunden die wahre Dauer der synodischen Periode übertraf).

Der Zyklus von Kallippos wurde niemals in offiziellen

Bestimmungen für den Kalender verwendet und lediglich von Gelehrten beachtet. Jedoch brachte Hipparch Präzisierungen ein, indem er ihn mit dem genauer berechneten tropischen Jahr in Übereinstimmung brachte. Er vervierfachte die 76jährige Kalenderperiode von Kallippos und zog von den 304 Jahren, die sich dadurch ergaben, einen Tag ab. Im Ergebnis kam ein Zyklus heraus, der genau in 304 Jahre und 3760 Mondmonate geteilt werden konnte, deren Dauer den von Hipparch ermittelten Werten entsprach. Der Hipparch-Zyklus ist nie von jemandem verwendet worden, um so mehr, als auch er bei all seiner Kompliziertheit nicht als absolut genau gewertet werden kann: denn die Dauer des tropischen Jahres nach Hipparch übersteigt, wie wir bereits gesagt haben, die wahre Dauer um 6 Minuten, wobei die Differenz im Laufe der Zeit weiter zunimmt.

All das Dargelegte zeigt mit ausreichender Deutlichkeit, scheint uns, welch hohen Stand die griechische Astronomie in der Blütezeit der hellenistischen Wissenschaft erreicht hatte. Der Exaktheit ihrer Beobachtungen nach blieb sie keinesfalls hinter der babylonischen Astronomie zurück, ihre theoretischen Leistungen waren deutlich besser. Der Babyloniern blieb nur noch ein Vorzug, die größere Menge an Beobachtungsmaterial, das im Laufe vieler Jahrhunderte gesammelt worden war. Aber dieses Material wurde in der hellenistischen Epoche den Griechen zugänglich; bereits Hipparch nutzte es, sichtete es vor allem kritisch, indem er die verschiedenen Daten miteinander verglich.

## Mechanik

Zu Anfang unseres Buches stellten wir die erstaunliche Tatsache fest, daß die antike Technik und die antike Wissenschaft sich weitgehend unabhängig voneinander entwickelten. Das Handwerk, die Metallurgie, das Bauwesen, die Ingenieurtechnik — all das befand sich in Griechenland bereits im 6. Jahrhundert v. u. Z. auf einem ziemlich hohen Niveau, während die Wissenschaft zu jener Zeit noch in den Kinderschuhen steckte.

Die folgenden drei Jahrhunderte waren durch eine stürmische Entwicklung der griechischen Wissenschaft gekennzeichnet. Besondere Erfolge hatten zu Beginn des 3. Jahrhunderts v. u. Z. die Mathematik und die Astronomie zu verzeichnen (Philosophie, Logik, Medizin usw. blei-

ben außerhalb unseres Betrachtungsfeldes, da diese Disziplinen schon ihrem Wesen nach keine technische Applikation haben konnten). Jedoch haben sich diese Erfolge in keiner Weise auf die Entwicklung der Technik ausgewirkt. Diese beiden Disziplinen setzten sich keinerlei Lösungen von praktischen Aufgaben zum Ziel, vielleicht mit Ausnahme der Ausarbeitung eines Kalenders. Jener Zweig der Wissenschaft, der einen positiven Einfluß auf den technischen Fortschritt hätte ausüben können, die theoretische Mechanik, entstand erst in der Epoche des Archimedes. Erinnerung sei, wie primitiv die theoretisch-mechanischen Vorstellungen des Aristoteles mit seinen natürlichen und zwangsweisen Bewegungen, mit seinen Ideen von der Rolle der Luft bei der Bewegung geworfener Körper usw. waren. Diese Vorstellungen und Ideen waren völlig losgerissen von der realen Tätigkeit des Menschen entstanden, erfuhren keine Prüfung durch die Praxis und konnten darum keine technische Anwendung finden.

Es gab nur zwei Bereiche der Technik, deren Entwicklung in der klassischen Epoche der griechischen Zivilisation durch wesentliche Erfolge gekennzeichnet war: die Theatertechnik und die Kriegstechnik. Zur Theatertechnik gehörten mechanische Hebeeinrichtungen. Eigentlich gerade zur Bezeichnung dieser Einrichtungen gebrauchte man das Wort »Maschine« (*hē mechane*), woher auch der Ausdruck »deus ex machina« stammt. Später bezeichnete dieses Wort die Maschinen überhaupt. Die Entwicklung der Kriegstechnik führte zur Schaffung der Wurfartillerie sowie neuer Typen von Kriegsschiffen. Eine besonders stürmische Entwicklung erfuhr die Kriegstechnik in der Periode nach den Feldzügen Alexanders des Großen. Die Quellen berichten von raffinierten Kriegsmaschinen des Archimedes, die den Römern die Einnahme von Syrakus erschwerten. Bei dieser kriegerischen Auseinandersetzung kam es aber nicht nur auf das Genie des Archimedes an, da ja auch der römische Feldherr Marcellus, dessen Heer die Stadt belagerte, ebenfalls über wirksame Angriffswaffen verfügte (die Belagerung von Syrakus wird von dem Historiker Polybios sehr lebendig geschildert). In den Fehden zwischen den Thronfolgern Alexanders des Großen spielten die Wurfaffen und anderes kriegsmechanisches Gerät eine für jene Zeit beispiellose Rolle; in diesem Zusammenhang soll die Belagerung von Rhodos durch Deme-

trios, den Sohn des Antigonos, besonders erwähnt werden, der nach der Belagerung den Beinamen Poliorketes («Städtebelagerer») erhielt.

Was Archimedes anbelangt, so scheint er eine Art Kriegingenieur am Hofe des syrakusanischen Tyrannen Hieron (mit ihm war Archimedes verwandt) gewesen zu sein. Jedoch beschränkten sich die Ingenieurleistungen des Archimedes nicht nur auf die Kriegstechnik. Das von ihm gebaute und als kunstvolles Meisterwerk von seinen Zeitgenossen bewunderte Planetarium wurde bereits erwähnt. Ihm wurde auch die Erfindung der sogenannten Archimedischen Schraube («Schnecke») zugeschrieben, die zum Bewässern der Felder verwendet wurde. Auch wird berichtet, daß Archimedes mit Hilfe technischer Vorrichtungen das schwerbeladene Schiff von Hieron auf dem Festland vorwärtsbewegen ließ.

Eine spezifische Branche der Technik bildete die im 3. Jahrhundert v. u. Z. entstandene Pneumatik; darunter wurde die Nutzung des Luftdrucks zur Schaffung verschiedenartiger mechanischer Vorrichtungen verstanden. Als Begründer der Pneumatik gilt Ktesibios, ein Zeitgenosse von Archimedes, der in Alexandria lebte und wirkte. Die Werke von Ktesibios sind uns nicht erhalten geblieben, jedoch sind Berichte über seine Erfindungen in den Werken von Philon, Vitruv, Athenaios, Plinius und Heron erhalten. Aus diesen Quellen erfahren wir, daß Ktesibios der Erfinder der Zweizylinderwasserpumpe war, die mit Einsaug- und Druckventilen versehen war; einer Wasserorgel, die mit Hilfe der Druckluft bedient wurde; einer Wasseruhr, die sich von der alten Klepsydra dadurch unterschied, daß ein Schwimmer darin angebracht war, dessen Bewegung auf eine Figur übertragen wurde, die auf einer speziellen Skala die Uhrzeit anzeigte, sowie einiger anderer mechanischer Vorrichtungen. Es wird auch von Kriegswurfgeräten berichtet, die unter Ausnutzung der Druckluftkraft funktionierten.

Der nächste »Pneumatiker« war Philon aus Byzanz, möglicherweise ein Schüler von Ktesibios. In seiner Jugend kam er nach Alexandria, um die dort arbeitenden bekannten Meister der Mechanik kennenzulernen; den größten Teil seines weiteren Lebens verbrachte er auf der Insel Rhodos, wo er ein umfassendes Werk, »Die Mechanik«, schrieb, dessen neun Bücher alle Gebiete der antiken Tech-

nik umfaßten. Der Originaltext dieses Werkes ist nicht erhalten geblieben, doch einige Teile sind in der arabischen Ausgabe überliefert. Nach einer allgemeinen Einführung hat Philon verschiedene Wurfwerkzeuge beschrieben; unter anderem erörterte er auch die Wirkung des Hebels. Daran schloß sich eine Darlegung der Konstruktionen von Automaten und des Puppentheaters an, und im Abschnitt zur Pneumatik, der mit einem experimentellen Beweis der Elastizität der Luft begann, wurden alle möglichen mechanischen Vorrichtungen beschrieben, die bei Gartenfesten oder zu anderen Feierlichkeiten Verwendung fanden: Wunderbecher, Gießkannen, aus denen nach Wunsch verschiedene Flüssigkeiten gegossen werden konnten, Springbrunnen mit trinkenden Tieren, singenden Vögeln und anderen Spielereien. Außerdem wurden von Philon auch Apparate beschrieben, die für praktische Zwecke gedacht waren, so zum Beispiel Wasserräder, Wasserschöpfmaschinen, Weihwasserautomaten usw. In den meisten dieser Maschinen wurde der Luftdruck ausgenutzt. Aus den überlieferten Beschreibungen ist auch ersichtlich, daß Philon das Prinzip des Siphons gut kannte.

Sowohl Ktesibios als auch Philon waren offensichtlich in erster Linie Erfinder; über ihre theoretischen Ansichten ist uns nichts bekannt. Als ersten Versuch der theoretischen Durchdringung der verschiedenen Arten von Mechanismen kann man die Schrift »Mechanische Probleme« ansehen, die früher Aristoteles zugeschrieben wurde und bis heute Bestandteil des »Corpus« der Aristotelischen Schriften ist, aber in Wirklichkeit in einer späteren Epoche, höchstwahrscheinlich im Alexandria des 3. oder 2. Jahrhunderts v. u. Z., entstand. Diese Abhandlung ist für die Geschichte der Mechanik von großem Interesse.

Die »Mechanischen Probleme« bestehen aus 36 Abschnitten, die als Antworten auf Fragen geschrieben sind. In diesen Kapiteln geht es um viele Mechanismen — um den Hebel, die Waage, den Brunnenkranich, die Zange, die Axt, den Keil, das Rad, die Walze, das Ruder und das Steuer, die Töpferscheibe und eine Reihe anderer Mechanismen. Die Wirkungsweise jedes einzelnen dieser Mechanismen wird von dem Verfasser auf das Hebelprinzip zurückgeführt, das wiederum mit den »erstaunlichen«, eben den »mechanischen« Eigenschaften des Kreises erklärt wird. Diese eigentümliche Erklärungsweise findet sich in

späteren griechischen Arbeiten zur Mechanik nicht wieder.

Bei der Behandlung der Drehung einer Strecke um einen ihrer Endpunkte verweist der Verfasser der »Mechanischen Probleme« auf die Tatsache, daß sich die Punkte auf dieser Strecke nicht mit der gleichen Geschwindigkeit bewegen, sondern daß sich die vom Drehpunkt weiter entfernten Punkte schneller bewegen als diejenigen, die ihm näher liegen. Die Kreisbewegung wird dabei als Summe zweier Bewegungen betrachtet; der geradlinigen in Richtung der Tangente und der zentripetalen, also der auf das Zentrum gerichteten. Die erste ist dabei natürlich, die zweite gewaltsam. Ein Punkt, der sich auf dem äußeren von zwei Kreisen mit demselben Zentrum bewegt, wird bei der gleichen zurückgelegten Strecke weniger zum Zentrum abweichen als ein Punkt auf dem inneren Kreis. Hieraus folgt, daß für die Bewegung auf dem äußeren Kreis weniger Kraft aufgewendet werden muß als für die Bewegung auf dem inneren Kreis, dabei kann sich aber der Punkt auf dem äußeren Kreis schneller bewegen. Gerade dieser Umstand liegt nach Meinung des Verfassers der Wirkung des Hebels zugrunde.

Die angeführten Überlegungen bilden ein erstaunliches Konglomerat aus metaphysischen Spekulationen und zutreffenden Beobachtungen. Bis zur wissenschaftlichen Mechanik ist es hier noch sehr weit, aber einige Gedanken des Verfassers sind fraglos interessant. Die Annahme, daß die geradlinige Bewegung an und für sich eine »natürliche« Bewegung sei, bringt uns aus dem Rahmen der rein peripatetischen Vorstellungen hinaus und kann als erste, wenn auch sehr unexakte Formulierung des Trägheitsprinzips angesehen werden. Zudem enthält die Behauptung, daß für eine größere Abweichung von der geradlinigen Bewegung eine größere Krafteinwirkung erforderlich ist, bereits die Andeutung einer existenten Abhängigkeit zwischen der Kraft und der Beschleunigung, d.h. die Andeutung des zweiten Grundgesetzes der Dynamik. Beachtung verdient auch die Tatsache, daß dem Verfasser der »Mechanischen Probleme« bereits das Prinzip des Geschwindigkeitsparallelogramms bekannt war — sowohl in der Form der Addition als auch in der Form der Zerlegung von Bewegungen.

Doch die Andeutungen blieben nicht mehr als Andeutungen. Die in den »Mechanischen Problemen« angetippten Tendenzen erfuhren keine Weiterentwicklung. Unge-

achtet der starken Verbreitung militärischer Schleudergeschütze sowohl in der hellenistischen als auch in der römischen Epoche können wir keinen Fortschritt auf dem Gebiet der Dynamikforschung bis in das 5. Jh. u. Z. hinein, d.h. faktisch bis zum Beginn des Mittelalters verzeichnen. Dies zeugt einmal mehr von der Trennung des theoretischen Denkens von der praktischen (handwerklichen, ingenieurmäßigen) Tätigkeit, wie sie für die Sklavenhaltergesellschaft charakteristisch war.

Was den Hebel betrifft, so blieb er im Zentrum der Aufmerksamkeit der Gelehrten der hellenistischen Epoche, wurde aber von ihnen rein statisch, hauptsächlich im Zusammenhang mit dem Problem der Waage und dem Wiegen behandelt. So werden zum Beispiel die Bedingungen des Gleichgewichts beim Hebel in dem pseudoeuklidischen Werk »Buch über die Waage« dargestellt, das uns nur in arabischer Übersetzung überliefert ist. Der Autor bestimmt das Gewicht als Maß der Schwere oder Leichtigkeit eines Gegenstands, der mit Hilfe einer Waage mit anderen Gegenständen verglichen wird. Durch Umplazierung ein und derselben Lasten entlang des Waagebalkens, der in gleiche Abschnitte unterteilt ist, wirkt das Gesetz des Gleichgewichts des Hebels. Dabei verwendet der Autor den Ausdruck »Gewalt des Gewichtes«; diese ändert sich in Abhängigkeit von der Lage der Last auf dem Waagebalken. Die »Gewalt des Gewichtes« ist dem statischen Moment äquivalent, d. h. dem Produkt der Last mit ihrem Abstand vom Stützpunkt.

Mit dem Problem des Hebels hat sich Archimedes viel beschäftigt. Zwar sind seine frühen Schriften zu dieser Frage — »Über die Waage« und »Über die Hebel« — verlorengegangen, aber das uns überlieferte Buch »Über das Gleichgewicht ebener Flächen« beginnt mit der mathematischen Theorie des Gleichgewichts des Hebels. Danach geht Archimedes zur allgemeinen Theorie des Gleichgewichts über, deren Grundbegriff der Begriff des Schwerpunkts ist. Die Form der Darlegung ist hier wie auch in anderen Büchern von Archimedes rein axiomatisch. Nach dem Beweis einer Reihe allgemeiner Theoreme bestimmt Archimedes den Schwerpunkt einer Reihe ebener Flächen — des Dreiecks, des Parallelogramms, des Trapezes und des Parabelsegments und des parabolischen Trapezes.

In einer der späteren Arbeiten erwähnt Archimedes sei-

ne Schrift »Über das Gleichgewicht«. Daß diese nicht mit dem Buch über das Gleichgewicht ebener Flächen identisch ist, zeigen seine Hinweise auf die Schwerpunkte des Kreises, des Zylinders, des Prismas, des Kegels und des Rotationsparaboloiden. Möglicherweise war die Schrift »Über das Gleichgewicht ebener Flächen« nur ein Teil einer umfangreicheren Arbeit über das Gleichgewicht, dem ein anderer Teil über das Gleichgewicht räumlicher Körper folgte.

Aus den nicht erhaltenen Schriften von Archimedes sind einige Fragmente überliefert, die von Heron, von Pappos und von anderen Autoren zitiert werden. Im einzelnen führt Heron einen langen Auszug aus dem frühen Werk von Archimedes, dem »Buch der Stützen«, an. Es besitzt noch nicht die Strenge, die den reifen Arbeiten des großen Syrakusaners eigen ist, und enthält eine Reihe von Fehlern, die sich auf die Einteilung der Stützreaktionen beziehen und die zeigen, daß Archimedes, als er das Buch schrieb, noch nicht wußte, daß das Gewicht eines Körpers als in seinem Schwerpunkt konzentriert angenommen werden kann.

Die berühmte Definition des Schwerpunkts, die Pappos einem uns nicht überlieferten Werk von Archimedes (evtl. dem Buch »Über die Hebel«) entnommen hat, lautet:

»Als Schwerpunkt eines Körpers bezeichnen wir den Punkt in ihm, der die Eigenschaft hat, daß er in Ruhe bleibt und seine ursprüngliche Lage nicht verändert, wenn man ihn durch einen gedachten schweren Körper unterstützt.«

Zum Abschluß wollen wir noch auf die letzte, offensichtlich kurz vor dem Tode entstandene Arbeit von Archimedes, »Über schwimmende Körper«, eingehen, die die mathematischen Grundlagen für eine neue Wissenschaft, die Hydrostatik, legte. Es ist nicht ausgeschlossen, daß ihre Entstehung mit der Geschichte um die Krone von Hieron zusammenhängt. Lange Zeit war dieses Werk nur in lateinischer Übersetzung aus dem 13. Jahrhundert bekannt; der griechische Text wurde erst 1905 von Heiberg in Konstantinopel gefunden, zusammen mit einem Schreiben an Eratosthenes (der »Methodenlehre«, von der im Abschnitt zur Mathematik schon die Rede war).

Das Werk »Über schwimmende Körper« besteht aus zwei Büchern. Das erste Buch beginnt mit der Annahme,

daß eine Flüssigkeit eine Menge aneinanderstoßender Teilchen ist, von denen die weniger zusammengepreßten von den mehr zusammengepreßten verdrängt werden. Dabei wird jedes einzelne Teilchen von der Flüssigkeit zusammengepreßt, die vertikal über ihm liegt. Aus dieser Grundannahme leitete Archimedes eine Reihe von Schlußfolgerungen ab. In den ersten beiden wurde festgestellt, daß die freie Oberfläche des Wassers, das die Erde umgibt, eine sphärische Form hat und daß das Zentrum der Sphäre mit dem Zentrum der Erde zusammenfällt. Obwohl die Sphärenform der Erde zu jener Zeit schon allgemein anerkannt war, erwies sich Archimedes' Schluß als keineswegs trivial und rief sogar den Widerspruch des großen Gelehrten Eratosthenes hervor.

In den folgenden Theoremen werden Fragen des Gleichgewichts und der Beständigkeit von in Flüssigkeit getauchten Körpern untersucht; insbesondere wird jene These formuliert, die heute unter der Bezeichnung »Gesetz des Archimedes« bekannt ist. Danach werden die Bedingungen für das Gleichgewicht eines in einer Flüssigkeit schwimmenden Kugelsegments sowie eines Paraboloidsegments aufgestellt. Diese beiden Aufgaben werden mit Hilfe von zwei voneinander unabhängigen mathematischen Methoden gelöst. Gerade diese Methoden waren für Archimedes interessant, denn es war offensichtlich, daß die von ihm gelösten Aufgaben in jener Zeit keinerlei praktische Bedeutung erlangen konnten.

Das Beispiel des Archimedes ist aussagekräftig genug, um einige allgemeine Schlußfolgerungen zu ziehen. Als genialer Mathematiker und Ingenieur konnte Archimedes in höherem Maße als irgendein anderer Gelehrter jener ferneren Epoche die tiefe Wechselwirkung zwischen theoretischen Forschungen und ihren technischen Anwendungen erklären. Aber selbst bei ihm sind die Erfordernisse der Praxis bestenfalls zufällige Anlässe für wissenschaftliche Aufgabenstellungen, die Lösungen dieser Aufgaben werden jedoch bei weitem nicht durch ihre potentielle Anwendung im praktischen Leben, sondern in erster Linie durch die reine Wißbegier des Wissenschaftlers stimuliert. Dies war die Besonderheit der gesamten antiken Wissenschaft im Laufe ihrer jahrhundertelangen Geschichte. Kraft dieses Defekts vollzog sich die Entwicklung der antiken Wissenschaft, drückt man sich in der Sprache der heutigen Re-

gelungstheorie aus, ohne Rückkopplung, die das Ansetzen immer neuer und neuer Aufgaben anzuregen vermag. Daraus ist die partielle Erklärung für die Stagnation der antiken Wissenschaft abzuleiten, die ihrem stürmischen Auftrieb im 3. bis 2. Jh. v.u.Z. folgte.

## Optik

Die Optik bediente sich im Altertum seit Euklid mathematischer Methoden und enthielt schon Züge einer selbständigen Wissenschaftsdisziplin. Um Mißverständnissen vorzubeugen, muß eingeräumt werden, daß der Terminus »Optik« bei den Griechen eine engere Bedeutung hatte als heute. Von der Optik, die sich dem Sehvorgang widmete, unterschieden sie die Katoptrik, das ist die Lehre von den Spiegeln und der Reflexion, die Skenographie oder Bühnenmalerei, die Fragen der Perspektive überhaupt behandelte, und schließlich die Dioptrik oder Vermessungslehre. Das Phänomen der Lichtbrechung war den Griechen ebenfalls bekannt, aber ihre nähere Untersuchung begann erst relativ spät, wobei sie entweder zur Optik oder zur Katoptrik gezählt wurde.

Auf die Ansichten der alten Philosophen über die Natur des Sehens sind wir schon bei der Darlegung der einzelnen Lehren eingegangen. Aristoteles ging weiter, indem er vermutete, daß die uns sichtbaren Gegenstände bzw. deren »Farbe« auf unser Auge über ein verbindendes Medium wirken. Dieses Medium, das sowohl Luft, Wasser als auch mancher feste Körper sein kann, nannte Aristoteles das »Durchsichtige« (diaphanes). Die Helligkeit erfüllt das »Durchsichtige« und ist notwendige Bedingung für das Sehen. Aber erst die Farbe erregt das »Durchsichtige«, das seinerseits als ein Zusammenhängendes auf das Auge einwirkt. Die farblosen Gegenstände werden daher kaum oder überhaupt nicht gesehen. Die von uns wahrgenommenen Farben stellen eine Mischung aus dem Weißen und dem Schwarzen dar. Über den Mechanismus der Entstehung eines sichtbaren Bildes im Auge sagt Aristoteles nichts aus, obwohl er den Aufbau des Auges im großen und ganzen kannte.

Das Besondere an der Aristotelischen Theorie war die Annahme, daß das Sehen ohne ein lichterfülltes Medium, das zwischen Objekt und Auge vermittelt, unmöglich sei.

Eine Synthese dieser Theorie mit den Ansichten der Atomisten stellt die Lehre Stratons dar, nach der die Farben von den Körpern getrennt sind (ähnlich den »Bildern« Demokrits) und dementsprechend das Medium färben, das dann auf das Auge wirkt.

Auf interessante Weise betrachteten auch die Stoiker den Sehvorgang. Ihr Standpunkt zur Natur des Sehens läßt sich in Kürze wie folgt zusammenfassen. Die aus »Pneuma« bestehende Seele sondert ein »Sehpneuma« ab, das sich, von der Pupille ausgehend, kegelförmig ausbreitet und auf den Gegenstand trifft. Von dort kehrt es zurück und bedingt den Sinneseindruck. Dieser Vorgang ist nur in erleuchteter Luft möglich; die dunkle Luft leistet dem Sehpneuma zu großen Widerstand, um sich darin ausbreiten zu können.

In der Spätantike sind auf diesem Gebiet keine neuen Ideen entstanden. Dafür hat die geometrische Optik gerade in der Spätantike große Erfolge erzielt. Die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten der Reflexion des Lichtes waren bereits Platon bekannt. Aristoteles formulierte das Gesetz praktisch in der Form, wie wir es heute kennen. Die älteste überlieferte Abhandlung zur Optik wird Euklid zugeschrieben; darin vertritt er die alten pythagoreischen Auffassungen, daß das Sehen mittels Sehstrahlen vor sich geht, die sich geradlinig von dem Auge ausbreiten und den Gegenstand betasten. Diese Vorstellungen waren jedoch für die Aufstellung der Grundannahmen der geometrischen Optik und der Theorie der Perspektive ausreichend. Faktisch ist die »Optik« von Euklid ein Beitrag zur Theorie der Perspektive. Die Gesetze der Perspektive leitet er aus vierzehn Grundannahmen ab, die das Ergebnis optischer Beobachtungen sind. Auf das Reflexionsgesetz bezieht sich Euklid wie auf etwas Bekanntes: Er sagt, daß dieses Gesetz in seiner »Katoptrik« bewiesen wird.

Die »Katoptrik« Euklids ist uns nicht überliefert; ein Text mit dem gleichen Titel, der diesem Autor zugeschrieben wurde, ist wahrscheinlich eine spätere Kompilation. Offensichtlich ist dieses Werk durch die umfangreiche »Katoptrik« des Archimedes (die auch verlorengegangen ist), die eine strenge Darstellung aller Leistungen der griechischen geometrischen Optik enthält, schon im Altertum in den Hintergrund gerückt. Archimedes war nicht nur ein Theoretiker der Optik, sondern auch ein Meister in opti-

schen Beobachtungen; davon zeugt die von ihm beschriebene Methode zur Messung des scheinbaren Sonnendurchmessers.

Weitere Erfolge auf dem Gebiet der Optik wurden dann noch von Heron und Ptolemaios erreicht.

## **Biologie und Medizin**

Aus den bisherigen Darlegungen ist ersichtlich, daß in der Alexandrinischen Epoche besonders die mathematischen Wissenschaften blühten. Die beschreibende Naturwissenschaft scheint dagegen keine großen Fortschritte mehr gemacht zu haben. Allerdings wurden in speziellen Arbeiten zur Landwirtschaft, zum Gartenbau, zur Bienenzucht und ähnlichen Gebieten viele Beobachtungsbefunde registriert. In wissenschaftlicher Hinsicht boten diese Arbeiten jedoch nichts Neues im Vergleich zu den biologischen Schriften des Aristoteles oder den botanischen Arbeiten Theophrasts. Auf Aristoteles' Schriften fußt sowohl der Vogelkatalog des Dichters und Literaturhistorikers Kallimachos (3. Jh. v. u. Z.) als auch der zoologische Sammelband des alexandrinischen Philologen Aristophanes aus Byzanz (Ende des 3.—Anfang des 2. Jh. v. u. Z.), wobei bei diesen Autoren die Neigung zum Märchenhaften zu spüren ist. Diese Neigung war ein Symptom für den Niedergang der Naturwissenschaft in der Spätantike.

Ein bedeutend größerer Fortschritt wurde zu jener Zeit auf dem Gebiet der Anatomie erreicht. Dazu trug in nicht geringem Maße der Verzicht auf die alten religiösen Vorurteile bei, die das Öffnen menschlicher Leichen verboten. Als Schöpfer der wissenschaftlichen Anatomie und Begründer der Alexandrinischen Ärzteschule gilt Herophilos aus Kalchedon, der ein Schüler des koischen Arztes Praxagoras war. Er wirkte in Alexandria zu Beginn des 3. Jahrhunderts v. u. Z. und verfaßte einige uns nicht überlieferte Werke, von denen die antiken Quellen die »Anatomie« und spezielleren Arbeiten wie »Über die Augen« oder »Über den Puls« nennen.

Da Herophilos die Beobachtung und die Erfahrung an erste Stelle rückte, konnte er sich von vielen Vorurteilen befreien und neue Wege in der Wissenschaft beschreiten. Seine wichtigsten Arbeiten auf dem Gebiet der Anatomie

sind dem Bau und der Funktionsweise des Nervensystems gewidmet; er untersuchte gründlich die Nervenzentren sowie einzelne Nerven und stellte endgültig fest, daß das Gehirn das Zentrum der geistigen Fähigkeiten des Menschen ist. Aus der Gesamtmenge der Nerven hob er die Gefühlsnerven hervor, die von der Peripherie des menschlichen Körpers zum Rückenmark und zum Gehirn gehen. Er nahm eine klare Unterscheidung zwischen Arterien und Venen vor und fand heraus, daß die Arterien ihr Blut vom Herzen erhalten. Bei der Untersuchung des Pulses mit Hilfe der Klesydra versuchte er, die rhythmischen Gesetzmäßigkeiten der Musiktheorie auf den Pulsschlag zu übertragen, und erkannte als erster die Bedeutung des Pulses als wichtiges diagnostisches Mittel. Er brachte den Puls mit dem Atmungsmechanismus in engen Zusammenhang, wobei der Atmungszyklus bei ihm aus vier Etappen bestand: Einatmen der frischen Luft, Verbreitung dieser Luft im ganzen Körper, Rückgewinnung der verbrauchten Luft und schließlich Beseitigung durch Ausatmung. Außerdem lieferte Herophilos eine ausführliche Beschreibung der Anatomie des Auges, der Leber, der Geschlechtsorgane und anderer Körperteile und nahm eine Gegenüberstellung der anatomischen Merkmale von Mensch und Tier vor.

Auf dem Gebiet der praktischen Medizin schenkte Herophilos der Wirkung von Arzneimittelpreparaten große Aufmerksamkeit, insbesondere den aus Kräutern hergestellten; darüber hinaus unterstrich er die Bedeutung einer rationalen Diät und gymnastischer Übungen. Als Sprößling der koischen medizinischen Schule war Herophilos Anhänger der Lehre von den vier Säften; er beschäftigte sich intensiv mit den Arbeiten von Hippokrates.

Ein weiterer hervorragender Gelehrter jener Epoche war Erasistratos von der Insel Keos. Er studierte in Athen und auf der Insel Kos, dann kam er nach Alexandria, wo er Mitte des 3. Jahrhunderts v. u. Z. Berühmtheit erlangte. Eine Zeitlang war er Leibarzt des syrischen Königs Seleukos, in den letzten Jahren seines Lebens legte er jedoch seine praktische Arbeit als Arzt nieder und widmete sich ausschließlich wissenschaftlicher Tätigkeit. In dieser Zeit entstand wohl sein anatomisches Hauptwerk »Über Körper-schnitte«.

Erasistratos setzte die anatomischen Forschungen von Herophilos fort, besonders auf dem Gebiet des Nervensy-

stems. Er unterteilte die Nerven in Gefühls- und Bewegungsnerven, konstatierte den Unterschied zwischen dem Großhirn und dem Kleinhirn und machte außerdem auf die Gehirnwindungen des Menschen und der Tiere aufmerksam; die größere Kompliziertheit dieser Windungen sah er in Zusammenhang mit dem höheren Entwicklungsniveau des Intellekts. In der Untersuchung des Blutkreislaufs ging Erasistratos in mancher Hinsicht weiter als Herophilos, obwohl er in einzelnen Fragen fehlerhafte Ansichten vertrat. So behauptete er, daß das Blut nur in den Venen zirkuliert, während die Arterien mit Luft gefüllt sind (dieser Standpunkt rührte von Leichenuntersuchungen her, deren Arterien leer sind). Als Hauptmotor des Blutes und der Luft im Körper sah Erasistratos das Herz an; gleichzeitig nahm er an, daß die Leber das Organ ist, das das Blut hervorbringt. Außer Leichenobduktionen hat Erasistratos (wie einige Quellen berichten) auch Lebendschnitte bei Verbrechern, die ihm vom König zur Verfügung gestellt wurden, vorgenommen.

In seiner Arztpraxis hielt sich Erasistratos an andere Prinzipien als Herophilos. Er polemisierte mit der humoralen Pathologie der Hippokratiker und war Arzneien gegenüber skeptisch. Da er als Ursache aller Krankheiten eine falsche Ernährung ansah, betrachtete er die Diät als grundlegendes Heilmittel. Die theoretischen Ansichten des Erasistratos zeichneten sich durch eine Symbiose der atomistischen Vorstellungen und der Lehre vom Pneuma, das von den Stoikern entwickelt wurde, aus.

Außer diesen beiden Koryphäen der medizinischen Wissenschaft lebten in der behandelten Epoche auch andere talentierte Ärzte; unter ihnen nennen die Quellen einen gewissen Eudemos, der die Wirkung einer Reihe von Drüsen des menschlichen Organismus entdeckte und beschrieb.

In der hellenistischen Epoche bildeten sich einige medizinische Schulen heraus, von denen im nächsten Kapitel die Rede sein wird. Hier wollen wir nur die Schule der sogenannten Empiriker erwähnen, die von Nachfolgern des Herophilos gegründet wurde. Diese Schule negierte für die Medizin die Bedeutung beliebiger theoretischer Konstruktionen und stellte die unvoreingenommene Beobachtung in den Vordergrund. In dieser Position sahen die Empiriker ihre Treue zu den wahren Prinzipien der Lehre des Hippokrates.

## DIE WISSENSCHAFT IN DER RÖMISCHEN KAISERZEIT

Im 2. bis 1. Jahrhundert v. u. Z. wird der Verfall der Wissenschaft im hellenistischen Kulturbereich deutlich. Die von den Diadochen (Nachfolgern) Alexanders geschaffenen Staaten erschöpften sich in gegenseitigen Kriegen und fielen dann einer nach dem anderen unter die Gewalt der römischen Legionen. Antiochia, Pella und Pergamon verlieren ihre Bedeutung als politische und gleichzeitig kulturelle Zentren; mit dem Verschwinden des Mäzenatentums stirbt auch das wissenschaftliche Leben. Zwar blieb Alexandria immer noch die wissenschaftliche Metropole der damaligen Welt, aber sie erlitt erheblichen Schaden infolge eines Feuers während des sogenannten Alexandrinischen Krieges Julius Caesars (49 v. u. Z.), das einen Teil der Schätze der Bibliothek vernichtete. Das Museion verfiel auch mit der Zeit und verlor seine frühere Bedeutung.

Einige Jahre später, als die Länder des Mittelmeerraums und des Nahen Ostens unter die Macht des Römischen Reiches kommen, wird ein neuer Aufschwung sichtbar: In das 2. Jahrhundert u. Z. fällt das Wirken des größten Arztes des Altertums nach Hippokrates, Galen, und des berühmten Astronomen Klaudios Ptolemaios. Aber die Römer hatten daran keinen Anteil. Der praktischen römischen Mentalität war das Streben nach theoretischer Erkenntnis fremd, das ein charakteristisches Merkmal des griechischen wissenschaftlichen Denkens war. Es ist bezeichnend, daß die Römer keinen berühmten Gelehrten hervorbrachten, dafür aber hervorragende Dichter, tiefsinnige Moralisten, vortreffliche Historiker und glänzende Redner. Aber wir kennen keinen einzigen römischen Philosophen, der an Platon oder Aristoteles heranreichte, keinen einzigen römischen Mathematiker, der einem Eudoxos, Euklid oder Apollonios von Perge gleichkäme. Cicero war wahrscheinlich der größte Geist, den Rom hervorgebracht hat, aber sein Verdienst bestand lediglich

darin, daß er, wie A. A. Blok ausdrückte, »die schäbigen Reste des Honigs der wohlriechenden Blüten des großen griechischen Denkens sammelte, die von den rohen Rädern des römischen Staatskarrens erbarmungslos zerquetscht worden waren«.

Das Fehlen originärer wissenschaftlicher Arbeiten wurde in Rom durch Kompilationen kompensiert, die den Charakter gemeinverständlicher Enzyklopädien hatten und manchmal in Versform geschrieben waren. Von den Werken dieser Art erfreute sich eine neunbändige uns leider nicht überlieferte Enzyklopädie von Varro (1. Jh. v. u. Z.), die die Grammatik, die Logik, die Rhetorik, die Geometrie, die Arithmetik, die Astronomie, die Musiktheorie, die Medizin und die Architektur einbezog, großer Popularität. Eine analoge Enzyklopädie wurde ein Jahrhundert später von Cornelius Celsus zusammengestellt. Von enzyklopädischem Charakter sind auch das Lehrgedicht »Über die Natur der Dinge« von Lukrez, in dem der Autor vom Standpunkt der Atomistik und ausgehend von der Lehre Epikurs die verschiedensten Fragen der Naturwissenschaft beleuchtet, sowie besonders die vielbändige »Naturgeschichte« von Plinius dem Älteren.

Man könnte annehmen, daß der römische Praktizismus die Entwicklung bestimmter praxisnaher Disziplinen hätte fördern müssen. Er hat sie jedoch nur teilweise gefördert. Es sind uns viele Werke in lateinischer Sprache überliefert, die der Landwirtschaft, dem Kriegeswesen, der Architektur u. a. gewidmet sind. Aber die Technik im engeren Sinne, d. h. jene Technik, die den Produktivkräften der Gesellschaft zugrunde liegt, wies nicht einmal das Niveau auf wie die Technik in der Epoche des Archimedes; im Schiffbau zum Beispiel war ein bedeutender Rückgang zu verzeichnen. Die Gründe dafür lagen in der Sklavenhalterform der Wirtschaft, die in der Epoche des Römischen Reiches ihre höchste Entwicklung erfuhr. Die Existenz der vielen Sklaven, die den römischen Sklavenhaltern aus den eroberten Provinzen zur Verfügung standen, regte nicht zu Erfindungen an. Die billigen Arbeitskräfte behinderten die Entwicklung der Produktivkräfte und führten zum Stillstand und zum Verfall der römischen Gesellschaft. Als die inneren Fehden und Überfälle barbarischer Stämme den Untergang des Römischen Reiches bewirkten, entstanden aus seinen Trümmern halb-wilde Staaten, die überhaupt kein Interesse an Wissenschaft

und Technik hatten. Lediglich Byzanz hat in gewissem Umfang die wissenschaftlichen Traditionen der Antike gerettet, aber aus verschiedenen Gründen konnte es diese Traditionen nur wahren und nicht schöpferisch weiterentwickeln.

## Geographie

An der Wende der hellenistischen zur römischen Zeit steht die markante Figur des Stoikers Poseidonios (um 135—50 v. u. Z.), der in Apamaia (Syrien) geboren wurde und dann auf die Insel Rhodos übersiedelte, wo er sich wissenschaftlichen Studien widmete. Im Alter übersiedelte Poseidonios nach Rom und wurde dort Lehrer des Cicero. In Rom starb er auch. Ähnlich wie Aristoteles versuchte Poseidonios, die ganze Wissenschaft jener Zeit zu erfassen, wobei sich seine Universalität mit Oberflächlichkeit paarte. Im Unterschied zu den Vorgängern seiner Schule beschäftigte sich Poseidonios viel mit Mathematik, und sein Kommentar zum »Timaios« regte zur Beschäftigung mit der pythagoreischen Zahlenmystik an und zeigte darüber hinaus großes Interesse an der damals stark aufkommenden Astrologie. Poseidonios verfügte wohl über ein immenses astronomisches Wissen, er baute ein Planetarium nach dem archimedischen Muster und hinterließ eine Schrift über die Größe und die Entfernung der Sonne. Er war auch ein großer Historiker und setzte das berühmte Werk des Polybios fort.

Die größte Eigenständigkeit zeigte Poseidonios auf dem Gebiet der geographischen Wissenschaft. In seiner Schrift »Über den Ozean« legte er das Beobachtungsmaterial dar, das er auf seiner Reise zu den westlichen Randgebieten Europas gesammelt hatte. Er weilte etwa einen Monat lang in Kadisija, wo er die Gezeiten studierte und als Ergebnis die Idee von Seleukos über die Verbindung von Ebbe und Flut mit der Lage des Mondes am Himmelsgewölbe weiterentwickelte. Poseidonios meinte übrigens, daß der Mond nicht nur Ebbe und Flut, sondern auch das Wachstum der Bäume, die Entwicklung von Mollusken, den Blutkreislauf des Menschen und vieles andere beeinflusse. Die Idee des Zusammenhangs und der geheimnisvollen Harmonie aller Erscheinungen der Natur diente Poseidonios als Grundlage für die Erklärung der klimatischen und anderen Besonderheiten verschiedener Länder. In seinen Beschreibungen dieser Länder teilte Poseidonios neben wahren Informationen

auch gern erfundene Begebenheiten oder Märchen mit. Er schrieb auch über Erdbeben, Meteorologie und vieles andere.

Nach Eratosthenes unternahm Poseidonios den Versuch, die Ausmaße der Erdkugel zu bestimmen. Er bediente sich dabei desselben Prinzips, allerdings nicht mit Hilfe der Sonne, sondern des hellen Südsterns Kanopus, Hauptstern im Schiff Argo (Alpha-Carinae). Wenn dieser Stern, von Rhodos aus gesehen, den Horizont tangiert, steht er in Alexandria »...deutlich über dem Horizont«. Daraus und aus dem Abstand Rhodos-Alexandria schätzte er den Erdumfang zu 180 000 Stadien ab. Dieser viel zu kleine Wert hielt sich sehr hartnäckig in der Literatur, so daß dann Kolumbus annehmen mußte, sich an der Ostküste Indiens zu befinden, als er in Amerika landete.

Kein einziges der Bücher von Poseidonios blieb uns erhalten, aber sie erfreuten sich in der Antike großer Popularität. Zahlreiche Zitate und Bezüge auf diese Bücher kann man bei Strabon, Geminus, Manilius, Kleomedes u. a. finden.

Manche historischen Werke der damaligen Zeit enthalten auch Informationen über die Geographie und die Ethnographie. Man denke nur an Werke wie die »Weltgeschichte« des Polybios (2. Jh. v. u. Z.), »Historische Bibliothek« von Diodoros (1. Jh. v. u. Z.), »Römische Altertumskunde« von Dionysios von Halikarnassos (1. Jh. v. u. Z.) usw. sowie an die in Latein geschriebenen Bücher »Die Geschichte Roms seit Gründung der Stadt« von T. Livius (59 v. u. Z. — 17 u. Z.), »Über den Gallischen Krieg« von Julius Caesar und die späten Werke von Tacitus, Ammianus Marcellinus und anderen Autoren.

Unter den eigentlich beschreibenden geographischen Aufsätzen waren die Werke von Strabon und Pausanias zweifellos die bedeutendsten. Die berühmte siebzehn Bücher umfassende »Geographie« von Strabon (65 v. u. Z. — 21. u. Z.) war die Enzyklopädie des geographischen Wissens jener Zeit. Der Autor wurde in Amaseia, der Metropole der pontischen Könige, geboren. Er studierte in Pergamon und wahrscheinlich in Alexandria; er unternahm mehrere weite Reisen. Dem größten Teil seines Werkes liegen jedoch nicht eigene Beobachtungen, sondern die Schriften früherer Autoren zugrunde. Die ersten zwei Bücher der »Geographie« sind allgemeinen Überlegungen und der Polemik mit älteren Autoren gewidmet. Die eigentlich beschreibende Geographie

beginnt mit dem dritten Buch, wobei acht Bücher Europa, sechs Asien und das letzte Buch Afrika gewidmet sind.

Im großen und ganzen stellt die »Geographie« von Strabon eine grandiose Kompilation dar, die nach der Idee des Autors nicht zu speziell sein sollte, sondern für einen breiten Kreis von gebildeten Lesern bestimmt war. Zur Astronomie und Mathematik verhielt sich Strabon eher negativ; so maß er im Gegensatz zu Hipparch den zuverlässigen Angaben der Reisenden und Seeleute größere Bedeutung bei als den auf Beobachtungen von Sternen und mathematischen Berechnungen beruhenden Folgerungen. Strabon akzeptierte die von Eratosthenes ermittelten Ausmaße der Erdkugel, ohne die Methode dieser Ermittlung zu beschreiben, da er dies für eine zu spezielle Angelegenheit hielt, die keine Beziehung zur Geographie hat. Ferner findet man bei Strabon Überlegungen zur Anfertigung von Karten, jedoch zeigt er hier keine große Kompetenz. Er interessierte sich für Erdbeben, Vulkane, für den Geschiebetransport der Flüsse und ähnliche Probleme. Er entwickelte auch eine genau ausgearbeitete Konzeption der Klimazonen der Erdkugel. All das paart sich jedoch mit Exkursen in den Bereich der Mythologie und mit Beschwörungen der Autorität des Homer.

Ein anderes Werk von Strabon, von dem uns nur einzelne Auszüge überliefert sind, sind die »Historischen Notizen« in 47 Büchern, die er in Ergänzung zu der »Weltgeschichte« von Polybios schrieb.

Über das Leben des Wanderers und Schriftstellers des 2. Jahrhunderts u. Z. Pausanias haben wir keine zuverlässigen Informationen. Er verfaßte die »Beschreibung von Hellas« in zehn Bänden, wobei jeder Band einem bestimmten Gebiet der Balkanhalbinsel gewidmet ist und viele Informationen über Geschichte, Mythologie, Volksglauben, Legenden, Bau- und Kunstdenkmäler usw. enthält. Gerade darin besteht der Wert dieses Werkes von Pausanias für die Forscher der altgriechischen Kultur. Aber auch die topographischen Details können heute noch jedem Reisenden von Nutzen sein.

Einen krassen Gegensatz zu den Werken von Strabon und Pausanias bildet die »Geographie« von Klaudios Ptolemaios (erste Hälfte des 2. Jh. u. Z.). Strenggenommen sollte man sie »Kartographie« nennen, da sie in der Hauptsache die Methoden der wissenschaftlichen Kartenherstellung darlegt

und in dieser Frage die Traditionen des Hipparch weiterentwickelt. Die beschreibende Geographie interessierte Ptolemaios nicht. Mehr noch, er verhielt sich ihr gegenüber offenkundig geringschätzig; selbst geographische Namen werden von ihm nur angeführt, um ihre Koordinaten angeben zu können (insgesamt sind es etwa 8000 Orte). In der Erklärung der Methodik der Kartographie bezieht sich Ptolemaios auf seinen Vorgänger Marinus von Tyros, dessen Lebzeit uns nicht genau bekannt ist. Seinem Buch fügte Ptolemaios 27 Karten bei (die uns nicht im Original erhalten sind), die in ihrer Gesamtheit die ganze damals bekannte Ökumene — von den Kanarischen Inseln (von wo aus er, zusammen mit Marinus, die Längenzählung begann) bis nach China — darstellten. Diese Karten waren nicht fehlerfrei: So glaubte Ptolemaios beispielsweise, daß die Ostküste Afrikas am Äquator eine Biegung nach Osten mache und sich mit den Küsten Südostasiens verbinde, indem sie den Indischen Ozean gewissermaßen in ein zweites Mittelmeer verwandele. Es gab bei Ptolemaios noch andere Fehler. Ungeachtet dessen waren seine Karten sowohl denen seiner Vorläufer als auch allen Karten, die später, in der Epoche des Mittelalters, geschaffen wurden, in vielerlei Hinsicht überlegen.

Was die Römer anbetrifft, so beschäftigten sie sich wenig mit der Geographie als einer selbständigen Wissenschaft. Die erste geographische Arbeit in Latein war ein dreibändiges Werk von Pomponius Mela (1. Jh. u. Z.) unter dem Titel »Über Länderbeschreibung«, das eine lakonische Zusammenfassung griechischer Werke darstellt. Das Werk von Mela machte sich Plinius in seiner »Naturgeschichte« zunutze. Die bei Plinius enthaltene geographische Information ist eine kritiklose und unsystematische Aneinanderreihung verschiedener Angaben. Fehlende Eigenständigkeit ist auch für die »Naturwissenschaftlichen Untersuchungen« von Seneca charakteristisch, obwohl dieser umfassend gebildete Philosoph zusammenhängender als Plinius die geographischen Theorien jener Zeit darlegt. Die allgemeinwissenschaftlichen Anschauungen, zu denen sich Seneca in diesem Werk bekennt, sind zum größten Teil von Aristoteles und Poseidonios übernommen. Die Epoche der Spätantike nach Ptolemaios brachte schließlich auf dem Gebiet der geographischen Wissenschaft keinen einzigen bedeutenden Gelehrten hervor.

## Mathematik

Es wurde bereits auf die merkwürdige Tatsache verwiesen, daß nach Apollonios von Perge die hellenistische Mathematik keinen Genius hervorbrachte. Etwa hundert Jahre währte die Epoche der »Epigonen«, dann tat sich zwei Jahrhunderte nichts, als ob es in dieser Zeit überhaupt keinen gegeben hätte, der sich mit Mathematik befaßte. Ein neuer Aufschwung zeichnet sich erst gegen Ende des 1. Jahrhunderts u. Z. ab, d. h. bereits in der römischen Kaiserzeit. Zwei große Mathematiker dieser Zeit waren Heron und Menelaos — beide aus Alexandria.

Heron ist mehr als Ingenieur und Erfinder in die Geschichte eingegangen, doch dieser Seite seines Schaffens wollen wir uns später widmen. Von seinem Interesse für Mathematik zeugt vor allem sein Kommentar zu Euklids »Elementen«. In erster Linie interessierte ihn Mathematik wegen ihrer Anwendungsmöglichkeiten. Uns wurde die »Metrika« von Heron überliefert — eine Schrift, in der er verschiedene Formeln für die Messung und Berechnung von Figuren gesammelt hat. So wird unter anderem die Formel zur Ermittlung der Fläche eines Dreiecks aus seinen drei Seiten, die heute unter dem Namen »Heronsche Formel« bekannt ist, angeführt und bewiesen; es gibt Hinweise, daß diese Formel bereits Archimedes bekannt gewesen war. Heron führt auch eine Reihe von Näherungsverfahren an; so bedient er sich für das Ziehen einer Quadratwurzel eines Verfahrens, das wahrscheinlich der babylonischen Mathematik entstammt:

$$\sqrt{N} \approx \frac{1}{2} \left( a + \frac{N}{a} \right),$$

wobei  $a$  die Wurzel derjenigen Quadratzahl ist, die  $N$  am nächsten liegt. Es wird auch ein Verfahren zur Berechnung der Kubikwurzel angeführt. Diese und viele andere Verfahren sind ohne Beweisführung formuliert und lediglich an Hand von Zahlenbeispielen erläutert.

Menelaos von Alexandria war ein Mathematiker eines ganz anderen Schlages. Auf dem Gebiet der Trigonometrie war er Nachfolger des Hipparch und schrieb ein heute verlorengegangenes Buch über die Sehnenrechnung. Darüber hinaus legte er die Grundlagen zur sphärischen Trigonometrie. Uns wurde seine »Sphärika«, die aus drei Büchern

besteht, in arabischer Übersetzung überliefert. In den ersten beiden Büchern werden verschiedene Theoreme über sphärische Dreiecke bewiesen.

Das dritte Buch beginnt mit dem »Theorem über die Transversalen«; es lautet: Gegeben seien zwei Geraden  $AB$  und  $AC$ , auf denen zwei beliebige Punkte  $D$  und  $E$  angenommen werden;  $CD$  und  $BE$  sollen sich im Punkt  $Z$  schneiden (Abb. 13). Dann gelten zwischen den sich ergebenden Strecken folgende Verhältnisse:

$$\frac{CE}{AE} = \frac{CZ}{DZ} \times \frac{BD}{AB} \quad \text{und} \quad \frac{CA}{AE} = \frac{CD}{DZ} \times \frac{BZ}{BE}.$$

Mittels Projizierung aus dem Zentrum überträgt Mene-laos diese Verhältnisse auf die Kugel (Abb. 14) und erhält

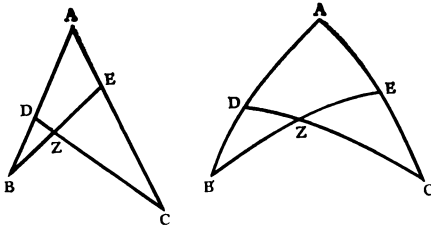


Abb. 13. Zum »Transversalensatz« von Menelaos in der Ebene  
Abb. 14. Zum »Transversalensatz« von Menelaos auf der Kugel

für den Fall, daß  $ADB$ ,  $AEC$ ,  $CZD$  und  $BZE$  Großkreise sind, folgende Verhältnisse für die Sehnen der doppelten Bögen:

$$\frac{\text{Chorda } (2CE)}{\text{Chorda } (2AE)} = \frac{\text{Chorda } (2CZ)}{\text{Chorda } (2DZ)} \times \frac{\text{Chorda } (2BD)}{\text{Chorda } (2AB)}$$

und

$$\frac{\text{Chorda } (2CA)}{\text{Chorda } (2AE)} = \frac{\text{Chorda } (2CD)}{\text{Chorda } (2DZ)} \times \frac{\text{Chorda } (2BZ)}{\text{Chorda } (2BE)}.$$

Aus dem Theorem über die Transversalen leitet Menelaos eine Reihe von Formeln der sphärischen Trigonometrie ab.

Das von Menelaos bewiesene »Theorem über die Transversalen« fand später bei Ptolemaios Verwendung. Dieser ganze Bereich der Mathematik wurde damals als mathematisches Instrumentarium für die Astronomie entwickelt; trotzdem war das Buch von Menelaos auch aus rein mathematischer Sicht eine hervorragende Leistung.

Klaudios Ptolemaios war ebenfalls ein bemerkenswerter Mathematiker, wengleich ihn die Mathematik hauptsächlich als Mittel zur Lösung von astronomischen und kartographischen Aufgaben interessierte. Er betrieb aber auch rein mathematische Studien, davon zeugt seine verlorene Schrift über parallele Linien und über das fünfte Postulat von Euklid.

Es sei erwähnt, daß Ptolemaios im »Almagest« nicht nur die Bögen, sondern auch Strecken und Flächen in sexagesimaler Schreibweise angibt. So werden bei ihm Minuten, Sekunden usw. zu abstrakten Zahlen, die nicht mit einer bestimmten Art von Größen verbunden sind. Bemerkenswert ist, daß in seiner Schreibweise von Brüchen das Symbol O (»Omikron«) existierte, das zur Bezeichnung einer fehlenden Sexagesimalzahl diente. Das ist das erste Mal, daß in der europäischen mathematischen Literatur die Null auftauchte.

Diophant, ein hervorragender Mathematiker des 3. Jahrhunderts u. Z., war Vertreter einer neuen algebraischen Richtung in der antiken Mathematik, die in keiner Beziehung zu der traditionellen griechischen Geometrie stand. Unter Berücksichtigung der jüngsten Entdeckungen in der Orientalistik kann als wahrscheinlich angesehen werden, daß die Wurzeln der Algebra von Diophant auf die babylonische Mathematik zurückgehen. Leider besitzen wir keine Informationen über die Zwischenglieder, die uns ermöglichen würden, den Prozeß der Übernahme der babylonischen algebraischen Methoden auf hellenistischem Boden zu verfolgen.

Abgesehen von einem in Form einer Aufgabe abgefaßten Sinngedicht, aus dem hervorgeht, daß Diophant 84 Jahre alt wurde, liegen uns keine Angaben zum Leben und zur Person dieses Gelehrten vor. Sein Hauptwerk, die »Arithmetika«, ist einem »hohehrwürdigen Dionysios« gewidmet. Wir wissen, daß Mitte des 3. Jahrhunderts u. Z. der Erzbischof von Alexandria ein gewisser Dionysios war; und wenn in der Widmung tatsächlich dieser Dionysios gemeint ist, so ist das fast der einzige Hinweis auf die Lebenszeit des Diophant.

Die »Arithmetika« bestand aus dreizehn Büchern, von denen uns nur sechs erhalten blieben. Schon der Aufbau der »Arithmetika« unterscheidet sich wesentlich von der deduktiv-axiomatischen Art der Darstellung, die in der klassischen griechischen Mathematik üblich war. Die »Arith-

metika« stellt eine Sammlung von Aufgaben dar, die unabhängig voneinander gelöst werden; diese Lösungen sind zuweilen sehr geistreich, erheben jedoch offensichtlich keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Es wäre allerdings falsch anzunehmen, daß Diophant keine allgemeinen Methoden beherrscht oder ihre Bedeutung unterschätzt hätte. Im ersten Buch behandelt Diophant Aufgaben, die zu bestimmten quadratischen Gleichungen führen. Allem Anschein nach konnte er diese Aufgaben nicht schlechter lösen als die Babylonier und die Inder; in der Epoche des Diophant existierte offensichtlich bereits eine bewährte Tradition zur Lösung solcher Aufgaben.

Von dem zweiten Buch an behandelt Diophant hauptsächlich unbestimmte Gleichungen — zunächst erster Ordnung, später höherer Ordnung. Im Europa der Neuzeit wurde die »Arithmetika« im 16. Jahrhundert bekannt; die von Diophant entwickelten Methoden zur Lösung von unbestimmten Gleichungen übten einen großen Einfluß auf Vieta und Fermat aus. Sie stehen zur jüngsten Algebra und Zahlentheorie in der gleichen Relation wie die Methoden von Archimedes für die Berechnung von Flächen und Volumina zur Analyse von unendlich kleinen Größen.

Für die Bezeichnung von algebraischen Ausdrücken führte Diophant zum ersten Mal die Buchstabensymbolik ein, wodurch im Vergleich zu der babylonischen Zahlenalgebra sowie zu der griechischen geometrischen Algebra der klassischen Periode ein wichtiger Schritt nach vorn getan wurde. In seinem Werk findet die Algebra zum ersten Mal zu einer eigenen und ihr angemessenen Sprache, auch wenn sich diese Sprache von der heutigen algebraischen Symbolik stark unterscheidet. So hat Diophant zum Beispiel noch kein Pluszeichen; wenn mehrere Glieder addiert werden müssen, schreibt er sie einfach in eine Reihe. Für die Subtraktion hat er ein besonderes Zeichen  $\uparrow$  (ob dieses Zeichen auch für die Bezeichnung einer negativen Zahl verwendet wurde, bleibt unklar). Als Beispiel wollen wir den Ausdruck

$$x^3 + 8x - (5x^2 + 1)$$

in der Schreibweise von Diophantos anführen:

$$K\bar{\alpha}\bar{\zeta}\bar{\eta} \uparrow \Delta\bar{\varepsilon}M^0\bar{\alpha}.$$

Der letzte hervorragende Mathematiker der Alexandrinischen Schule war Pappos, der Ende des 3./Anfang des 4. Jahrhunderts u. Z. lebte. Zu seinem Nachlaß gehören Kommentare zu Euklids »Elementen«, zu Ptolemaios' »Almagest« und zu einigen anderen Schriften. Sein wichtigstes Werk aber war die mathematische »Sammlung« (Synagoge), die aus acht Büchern bestand, von denen die meisten verlorengegangen. In diesem Werk faßte Pappos die Arbeiten seiner Vorgänger zusammen; deshalb stellt die »Sammlung« eine unschätzbare Informationsquelle über den Inhalt der verlorengegangenen Bücher von Euklid, Apollonios und anderen griechischen Mathematikern dar. Darüber hinaus führt Pappos an einigen Stellen auch eigene Ergebnisse an, die davon zeugen, daß er nicht nur ein kompetenter Kompilator, sondern auch ein kreativer Forscher war. Am wichtigsten sind dabei die von ihm bewiesenen Lehrsätze, die sich auf Untersuchungen der Kurven auf einem Torus und auf anderen Oberflächen beziehen. Einige der Theoreme von Pappos, die im 17. Jahrhundert von Desargues und Pascal neu bewiesen wurden, legten den Grundstein für die projektive Geometrie als einen besonderen Zweig der mathematischen Wissenschaft.

Ende des 4. Jahrhunderts lebte in Alexandria ein Mathematiker namens Theon, der einen Kommentar zum »Almagest« schrieb und die »Elemente« von Euklid neu herausgab. Er ist vor allem als Vater der berühmten Hypatia bekannt, deren tragischer Tod im Jahre 415 das Ende der Alexandrinischen wissenschaftlichen Schule symbolisierte. Hypatia war die einzige bekannte Mathematikerin in der Geschichte der antiken Wissenschaft; über ihr Schaffen wissen wir nur, daß sie sich mit der Platonischen Philosophie befaßte und Kommentare zu den Werken von Apollonios und Diophant schrieb.

Im 5. Jahrhundert war noch ein Funken mathematischer Geist in Athen vorhanden. So schrieb Proklos einen Kommentar zum Ersten Buch von Euklids »Elementen«, der unter anderem eine kurze Übersicht der Geschichte der Geometrie von Thales bis Euklid enthielt. Es sei auch der Name des Eutokios (6. Jh.) erwähnt, der ein hervorragender Kommentator von Archimedes und Apollonios war; noch heute werden die Werke der Gelehrten mit diesen Kommentaren herausgegeben.

## Astronomie

In der Astronomie waren ebenso wie in der Mathematik die zwei Jahrhunderte nach dem Tod des Hipparch wissenschaftlich eine unfruchtbare Periode, die keinen einzigen bedeutenden Gelehrten hervorbrachte. Es wäre jedoch falsch zu denken, daß die astronomischen Studien in dieser Zeit vernachlässigt wurden; im Gegenteil, die Astronomie blieb nach wie vor eine der populärsten Wissenschaften. Wir wissen, daß gerade in dieser Zeit der enzyklopädische Gelehrte Poseidonios Berechnungen der relativen Größen der Erde, des Mondes und der Sonne sowie der Entfernungen zwischen ihnen vornahm und darin Aristarch und Hipparch folgte.

Es war auch die Blütezeit solcher populärer Schriften, wie sie Geminos (1. Jh. v. u. Z.) und Kleomedes (1. Jh. u. Z.) über Astronomie verfaßten. Von dem Interesse, das man der Astronomie entgegenbrachte, zeugt auch die große Popularität der »Phainomena« des Aratos. Dieses Lehrgedicht wurde mehrfach ins Lateinische übersetzt (z. B. von Varro, Cicero und Caesar Germanicus).

Und dennoch bleibt die Frage, ob in dieser Zeit ein Fortschritt in der eigentlichen astronomischen Wissenschaft zu verzeichnen war. Sie kann nicht positiv beantwortet werden. Neue Quellenbelege, denen man entnehmen kann, daß die astronomischen Forschungen nicht gänzlich abbrachen, beziehen sich auf das Ende des 1. Jahrhunderts u. Z. In dieser Periode der frühen Kaiserzeit (Prinzipat) erfuhr die astronomische Wissenschaft ihre allmähliche Wiedergeburt. Und doch war es bereits eine andere Astronomie, die sich von der Astronomie der Blütezeit der Alexandrinischen Wissenschaft wesentlich unterschied. Die spezifischen Merkmale, die die Astronomie der Spätantike auszeichneten, bestanden in folgendem.

Die Leistungen der babylonischen Astronomie wurden erstens endgültig angeeignet. Das fand seinen Ausdruck in der Verwertung babylonischer Beobachtungsergebnisse und der Übernahme von Rechenmethoden und des Sexagesimalsystems. Da die Rechenmethoden im Vergleich zu den geometrischen Methoden der Griechen wesentlich einfacher waren, fanden sie im Laufe der Zeit immer breitere Verwendung.

Zweitens wurde die Astrologie, die bei den Griechen zu-

nächst keine Rolle gespielt hatte, nun zum entscheidenden Grund, sich mit Astronomie zu beschäftigen. Eines besonderen Erfolgs erfreute sich die Astrologie bei den Römern, die eine Neigung zum Aberglauben hatten. Dabei kamen der Astrologie, verglichen mit der Rolle, die sie in den Ländern des Alten Orients spielte, in der griechisch-römischen Welt ganz andere Funktionen zu. Im Orient hatten die Beobachtungen solcher Himmelserscheinungen, wie Finsternisse, Auftauchen von Kometen oder besondere Planetenkonstellationen, die Voraussicht glücklicher oder häufiger verhängnisvoller Ereignisse zum Ziel, für deren symbolische Vorboten diese Himmelserscheinungen gehalten wurden (Sieg oder Niederlage im Krieg, Hunger, Überschwemmungen, Dürren usw.). Neu war nun, daß die Bewegung von Himmelskörpern mit individuellen Menschenschicksalen in Verbindung gebracht wurde. Zur zentralen und im Prinzip einzigen Aufgabe der Astrologie wurde das Erstellen von Horoskopen; damit beschäftigten sich sogar die größten Wissenschaftler. Doch gerade das Interesse für Astrologie war der wichtigste Faktor, der der astronomischen Wissenschaft zu neuem Aufschwung verhalf.

Ein hervorragender Astronom am Ende des 1. Jahrhunderts u. Z. war Menelaos aus Alexandria, von dem im Kapitel »Mathematik« bereits die Rede war. Es gibt Zeugnisse, daß Menelaos während seines Aufenthalts in Rom Beobachtungen von Sternen durch den Mond erforschte. Analoge Beobachtungen führte in derselben Zeit ein gewisser Agrippa in Bithynien durch. Diese Beobachtungen machte sich Ptolemaios zunutze, indem er sie mit den Beobachtungsergebnissen von Timocharis, Hipparch und seinen eigenen verglich und so die Größe der Präzessionsbewegung ausrechnete.

Zur Beurteilung des astronomischen Wissens in den gebildeten Kreisen jener Zeit ist der Dialog »Über das Gesicht, das in der Mondscheibe sichtbar ist« bekannt unter dem lateinischen Titel »De facie in orbe lunae« von Plutarch (Anfang des 2. Jh. u. Z.) aussagekräftig. Der Mond wurde von Plutarch als ein erdähnlicher Körper beschrieben, auf dem Berge tiefe Schatten werfen. Diese Vorstellungen hatten einen wesentlich anderen Charakter als die Ansichten, die in der Epoche von Platon und Aristoteles herrschten.

Als Höhepunkt und zugleich als Abschluß der antiken Astronomie kann man das Hauptwerk des Klaudios Ptole-

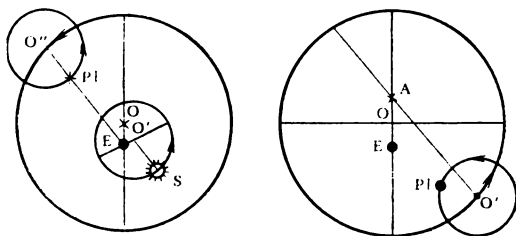
maios, die »13 Bücher der mathematischen Zusammenstellung«, bekannt unter den Titeln »Syntaxis« oder »Almagest«, ansehen. In diesem Werk vollendete Ptolemaios das Programm des Hipparch, die Erklärung der scheinbaren Bewegung des Mondes, der Sonne und der fünf Planeten mit Hilfe von exzentrischen Kreisen und Epizykeln.

Über das Leben dieses größten Astronomen des Altertums wissen wir so gut wie nichts — bis auf die Tatsache, daß die erste im »Almagest« angeführte Beobachtung im Jahre 127 und die letzte im Jahre 141 gemacht wurde. Im Laufe dieser Zeit lebte und arbeitete er in Alexandria; aller Wahrscheinlichkeit nach starb er auch dort (um 170). Außer dem »Almagest« sind uns noch zwei weitere astronomische Schriften von Ptolemaios bekannt: zwei Bücher »Planetenhypothesen«, in denen die ptolemäische Theorie der Planetenbewegung in gekürzter Form dargelegt wird, sowie eine Schrift über die Fixsternphasen, die Tabellen der Auf- und Untergänge der Sterne an fünf auf unterschiedlichen Breiten vom Schwarzen Meer bis nach Syene — Assuan) gelegenen Punkten enthält.

Für die Aufstellung der Theorie der Planetenbewegung mußte Ptolemaios zwei Aufgaben lösen: die Bewegung des Epizykelzentrums auf einem exzentrischen Kreis, dem »Trägerkreis«, sowie die Bewegung des Planeten auf dem Epizykel ermitteln.

Zur Lösung der ersten Aufgabe mußte man den Planeten zu den Zeitpunkten beobachten, wenn er auf der Geraden liegt, die das Zentrum des Epizykels mit der Erde verbindet. Laut dem Grundprinzip der Epizykeltheorie ist der Radius des Epizykels, an dessen Ende sich der Planet befindet, immer parallel zum Radius der Sonnenkreisbahn, an dessen Ende sich die Sonne befindet. Die Kompliziertheit der Aufgabe bestand darin, daß man annahm, die Sonne bewege sich auf einem exzentrischen Kreis um die Erde (Abb. 15). Daher stimmte der Augenblick, in dem der Planet gerade vor dem Epizykelzentrum lag, mit dem Augenblick, in dem er sich in Opposition zur Sonne befand, nicht überein. All das erforderte sehr viele Beobachtungen, die Ptolemaios mit Hilfe eines Geräts mit graduierten Kreisen durchführte, das er »Astrolabium« nannte und das im Fünften Buch des »Almagest« beschrieben wird. Eine zusätzliche Schwierigkeit kam hinzu. Wir wissen bereits, daß das Zentrum des Epizykels eines Planeten einen exzentrischen

Kreis beschreiben muß. Und da stellte sich heraus, daß die Theorie nur dann mit den Beobachtungen übereinstimmt, wenn die Bewegung des Epizykelzentrums nicht vom Zentrum seiner Kreisbahn, sondern von einem anderen Punkt aus, dem sogenannten Ausgleichspunkt (der in derselben Entfernung vom Kreisbahnzentrum wie die Erde liegt, nur auf der anderen Seite), betrachtet wird (Abb. 16). Das bedeutete, daß sich das Epizykelzentrum auf seiner Kreisbahn



**Abb. 15.** Verhältnis der Bewegung der Sonne zur Bewegung eines Planeten nach Ptolemaios:

*S* Sonne, *E* Erde, *Pl* Planeten, *O* Zentrum des Trägerkreises, *O'* Zentrum der Umlaufbahn der Sonne, *O''* Zentrum des Epizykels

**Abb. 16.** Die Bewegung des Epizykels auf dem Trägerkreis ist gleichförmig nur in bezug auf den Ausgleichspunkt (Äquantus).

in der Tat ungleichmäßig bewegt: im Perigäum (Erdnähe) bewegt es sich schneller, im Apogäum (Erdferne) langsamer.

Zu bemerken ist, daß Ptolemaios gezwungen war, das Vorhandensein eines Äquantus auch für die Bewegung des Mondes zu postulieren. Er erklärt nicht, auf welche Weise er zur Idee des Äquantus gelangt sei. Er schreibt lediglich: »... wir fanden heraus, daß...«

Die zweite Aufgabe bestand in der Ermittlung der Ausmaße des Epizykels. Dazu mußte man die Planeten beobachten, wenn sie sich außerhalb der Opposition befanden. Hier bedurfte es auch einer Vielzahl von Beobachtungen eines jeden Planeten. Dabei erwies sich, daß in Anwendung auf die drei äußeren Planeten — Mars, Jupiter und Saturn — die Epizykeltheorie die sichtbaren Bewegungen dieser drei Planeten genau nachvollzieht. Wesentlich schlechter war es um Merkur und Venus bestellt. Um die Lage zu retten, mußte Ptolemaios zulassen, daß sich die Neigung des Epizykels dieser Planeten gegen die Ebene ihres Trägerkreises peri-

odisch ändert. Ptolemaios empfand wahrscheinlich, daß eine derart komplizierte Theorie prinzipiell unzufriedenstellend ist, denn er äußerte im Dreizehnten Buch des »Almagest« folgende Überlegungen:

»Es wird sich wohl niemand im Hinblick auf die Dürftigkeit menschlicher Machwerke der Technik Gedanken machen, daß die hier vorgetragene Hypothesen zu künstlich seien. Darf man doch Menschliches nicht mit Göttlichem vergleichen... Die ‚Einfachheit‘ der Vorgänge am Himmel darf man nicht nach dem beurteilen, was uns Menschen als einfach gilt, zumal man auf Erden über den Begriff ‚einfach‘ keineswegs einig ist... Man muß vielmehr in seinem Urteil von der Unwandelbarkeit der am Himmel selbst kreisenden Geschöpfe und ihrer Bewegungen ausgehen; nur unter diesem Gesichtspunkt können sie alle ‚einfach‘ erscheinen, ja noch in höherem Grade einfach als die Dinge, welche auf Erden als einfach gelten, weil kein Mühsal, kein Notzustand bei den Umläufen dieser Wesen denkbar ist.«

In seiner Epizykeltheorie nutzte Ptolemaios außer eigenen Beobachtungen und den Angaben von Hipparch und anderen Vorgängern auch die Informationen, die in jahrhundertelanger Arbeit von den babylonischen Astronomen zusammengetragen wurden. Im »Almagest« vollzog sich damit eine organische Fusion der griechischen theoretischen Astronomie mit den Errungenschaften der orientalischen Wissenschaft. Ptolemaios' eigenen Beitrag zur Entwicklung der Methoden der astronomischen Beobachtungen und Berechnungen darf man nicht unterschätzen. Wenn früher die Bewegung der Planeten nur in bezug auf die Längen untersucht wurde, berücksichtigte Ptolemaios auch ihre Breitenbewegung. Die von ihm ausgearbeitete Methode wurde später fast vollständig von Kopernikus übernommen. Was die Genauigkeit der Beobachtungen mit bloßem Auge anbelangt, sicherte diese Methode ziemlich gute Ergebnisse.

Ptolemaios verfaßte aber nicht nur die »Syntaxis«, das bis ins 16. Jahrhundert wissenschaftlich maßgebliche astronomische Handbuch, sondern auch die »Apotelesmatika« in vier Büchern, deshalb »Tetrabiblos« genannt, also das Standardwerk der Astrologie.

## Mechanik

Über die Entwicklung der Mechanik in der Spätantike können wir vor allem nach den Arbeiten des Heron von Alexandria urteilen. Heron war eine höchst rätselhafte Persönlichkeit. Man hat so gut wie keine biographischen Informationen über ihn, und lange Zeit waren sich die Wissenschaftler nicht einig, in welches Jahrhundert Herons Schaffen fällt. Aufgrund vieler Details aus seinen Werken läßt sich mit einem hohen Grad an Wahrscheinlichkeit vermuten, daß Heron in der zweiten Hälfte des 1. Jahrhunderts u. Z., eventuell auch zu Beginn des 2. Jahrhunderts lebte.

Das wissenschaftliche Hauptwerk Herons, »Die Mechanik«, ist uns nur in arabischer Übersetzung überliefert. Es besteht aus drei Büchern. Im ersten Buch werden theoretische Fragen behandelt: das Geschwindigkeitsparallelogramm, die Bestimmung der Lastenverteilung und des Schwerpunkts, bei deren Interpretation Heron in der Hauptsache Archimedes folgt. Das zweite Buch behandelt die Wirkungsweise von fünf einfachen Maschinen: des Hebels, der Winde, des Keils, der Schraube und der Rolle. Heron weist darauf hin, daß er die Theorie des Hebels nach dem archimedischen Aufsatz »Über das Gleichgewicht« darlegt. Das dritte Buch beschreibt Hebevorrichtungen und Pressen.

Drei Schriften Herons sind uns in Griechisch erhalten geblieben, die verschiedenen Problemen der Mechanik gewidmet sind: die »Pneumatik«, in der durch erwärmte oder zusammengepreßte Luft sowie durch Dampf betriebene Mechanismen beschrieben werden; das Buch »Über Automaten«, das die Beschreibung von Konstruktionen verschiedenartiger selbstfahrender Vorrichtungen enthält, und schließlich die »Belopoiika« (Schrift vom Geschützbau), die der Kriegstechnik, hauptsächlich den Wurfgeräten gewidmet ist.

Obwohl die uns bekannten Werke von Heron kompilativen Charakter haben und auf Erkenntnissen früherer Autoren fußen — in erster Linie auf denen Archimedes und Philon —, kann man in ihnen auch neue Momente finden. So geht Heron bei theoretischen Fragen in vielem von den rein statischen Methoden des Archimedes ab, indem er sich weitestgehend der Methode der Untersuchung von Verschiebungen und Umstellungen bedient, die zur Störung des Gleichgewichtszustands führen. Den Betrachtungsgrößen

fügt er die Zeit hinzu und formuliert folgendes, nun schon rein dynamisches Prinzip: »Die Größe einer Antriebskraft steht in umgekehrtem Verhältnis zur Zeit der Ortsveränderung.« Unter den pneumatischen Geräten beschreibt Heron eine Kugel, die sich unter Einwirkung von Dampf dreht, was der Prototyp der Dampfturbine war. Es ist nicht uninteressant, daß Heron den Luft- und Dampfdruck auf Schläge der kleinsten Teilchen, aus denen diese physikalischen Körper bestehen, zurückführte. Es sei aber auch gleichzeitig auf die Tatsache hingewiesen, daß, abgesehen von den Kriegsgeräten und einigen wenigen anderen Vorrichtungen, die von früheren Autoren bereits beschrieben worden waren (Brandlöschpumpe, Wasserorgel), die technischen Entwicklungen des Heron hauptsächlich Automaten waren, die zur Unterhaltung und Belustigung dienten. An Maschinen, die die körperliche Arbeit des Menschen ersetzen, hatte die Sklavenhaltergesellschaft der Spätantike offensichtlich keinen Bedarf.

Auch das letzte Buch der »Mathematischen Sammlung« von Pappos ist Problemen der Mechanik gewidmet. In diesem Buch sind verschiedene Informationen aus der Mechanik gesammelt, die vorwiegend früheren Quellen entnommen wurden. Das Buch enthält aber auch einige originäre Aussagen des Autors, zum Beispiel über die Volumina der Rotationskörper, die durch die Länge des Kreisumfangs ausgedrückt werden, der mit dem Schwerpunkt des rotierenden Körpers beschrieben wird (die sog. Guldinsche-Papposche Regel). Pappos zieht eine deutliche Trennungslinie zwischen der Mechanik als Theorie und der Mechanik als praktisches Können.

Unter den Werken der römischen Autoren findet sich keine einzige Schrift, die theoretisches Interesse an der Mechanik erkennen ließe. Dafür wurde uns eine Reihe von Werken in Latein überliefert, die praktische Fragen des Bauwesens, der Kriegstechnik und der Wasserbautechnik behandeln. In erster Linie sind die »Zehn Bücher über die Baukunst« von Vitruv (1. Jh. v. u. Z.) hervorzuheben, wovon die drei letzten der Maschinenteknik, der Konstruktion von Uhren und einer Reihe von Problemen der angewandten Mechanik, einschließlich der Kriegstechnik, gewidmet sind. Vor allem unter Berücksichtigung der Interessen des Bauwesens beschreibt Vitruv ausführlich die Mechanismen, die damals zum Heben von Lasten verwendet wurden.

In einem Aufsatz des Wasserbaudirektors von Rom des 1. Jahrhunderts u. Z., Frontinus, werden römische Wasserleitungen beschrieben. In den »Commentarii de bello gallico« (»Kommentare zum Gallischen Krieg«) von Julius Caesar wird eine detaillierte Beschreibung der Pfahlbrücke gegeben, die auf seinen Befehl beim Überqueren des Rheins gebaut wurde. Der Schriftsteller des 4. Jahrhunderts u. Z., Flavius Vegetius, verfaßte Werke, in denen viele mit der Kriegsführung zusammenhängende technische Fragen (Aufschlagen von Lagern, Bau von Festungen, Kartieren des Geländes) dargelegt werden. Der Inhalt dieser Werke entsprach der rein praktisch orientierten römischen Mentalität.

Abschließend wollen wir auf einen prinzipiell neuen Schritt in der Entwicklung der theoretischen Dynamik (die im Grunde genommen seit Aristoteles nicht weiterentwickelt worden war) eingehen, der gerade an der Wende zum Mittelalter von Johannes Philoponos vollzogen wurde.

Johannes Philoponos (was soviel wie »Arbeitsliebender« heißt; ein anderer Beiname von ihm ist »Grammatiker«) wurde wahrscheinlich Ende des 5. Jahrhunderts geboren; er lebte den größten Teil seines Lebens in Alexandria. Dort besuchte er die Vorlesungen des Ammonios, der an der Spitze der kurz zuvor entstandenen Alexandrinischen philosophischen Schule stand, dann nahm er aber das Christentum an und erhielt später die Bischofswürde. Neben einer Vielzahl von Werken über Grammatik, Philosophie, Theologie, von denen nur wenige erhalten geblieben sind, schrieb Philoponos einige Aristoteleskommentare. Von besonderem Interesse sind seine Kommentare zur »Physik«, in denen er einige Thesen der Aristotelischen Naturphilosophie einer Revision unterzog.

Philoponos polemisierte gegen die Bewegungslehre des Aristoteles, speziell gegen die Erklärung des Wurfs. Nach Philoponos' Meinung wird dem Körper vom Bewegenden eine gewisse innere Kraft eingeprägt, die seine Bewegung eine bestimmte Zeit aufrechterhält. Diese Kraft ist körperlos und kann folglich weder mit der Luft noch mit irgendeinem anderen Medium etwas gemeinsam haben. Die Geschwindigkeit des Körpers wird von der Größe dieser Kraft bestimmt; der Widerstand des Mediums, in dem der Körper fliegt, kann seine Geschwindigkeit lediglich vermindern, und in der Leere wird die Geschwindigkeit ihre maximale Größe erreichen. Als Beispiel der widerstandslosen Bewe-

gung verweist Philoponos auf die gleichmäßige Kreisbewegung der Himmelskörper.

In der mittelalterlichen Literatur nannte man die dem bewegten Körper eingeprägte Kraft »Impetus«. Heute erscheint die Impetustheorie als Vorbereitung des Impulsbegriffes.

Die aristotelische Konzeption des Falls der Körper wurde von Philoponos ebenfalls kritisiert. Nach Aristoteles strebt ein Körper, je größer er ist, um so stärker zu seinem »natürlichen« Ort (die schweren zum Zentrum des Universums, die leichten zu seiner Peripherie). Andererseits ist die Geschwindigkeit eines fallenden Körpers dem Widerstand des Mediums, in dem sich dieser Körper bewegt, umgekehrt proportional. Daraus würde folgen, daß bei fehlendem Widerstand des Mediums, d. h. in der Leere, die Körper mit einer unendlich großen Schnelligkeit fallen müssen. Nach Philoponos' Meinung jedoch fliegt ein Körper auch in der Leere mit einer endlichen Schnelligkeit, die durch seine Schwere bestimmt wird. Der Widerstand des Mediums kann diese Geschwindigkeit lediglich verringern. Mit anderen Worten, die aristotelische Beziehung

$$v \sim \frac{P}{R}$$

(wobei  $v$  die Schnelligkeit des Körpers,  $P$  sein Gewicht und  $R$  der Widerstand des Mediums sind) wurde von Philoponos durch eine andere Beziehung ersetzt, wonach die Schnelligkeit eines fallenden Körpers Null, jedoch nie unendlich hoch werden kann:

$$v \sim P - R.$$

Johannes Philoponos hatte auch in anderen Fragen eigene Ansichten. So behauptete er insbesondere, das Universum sei nicht ewig, und die Himmelskörper hätten dieselbe Natur wie die Dinge der irdischen Welt. In theologischen Fragen wirkte Philoponos wie andere namhafte Christen seiner Zeit als Häretiker, weil er christliche mit heidnischen Ideen zu verbinden suchte.

## Optik

Im Vergleich zu den optischen Schriften von Euklid und Archimedes enthält die »Katoptrik« von Heron, die früher fälschlicherweise Ptolemaios zugeschrieben wurde, eine Rei-

he von neuen Ideen. In dieser Schrift begründet Heron die Gradlinigkeit von Lichtstrahlen durch die unendlich hohe Schnelligkeit ihrer Verbreitung. Ferner beweist er das Reflexionsgesetz aufgrund der Vermutung, daß der vom Licht zurückgelegte Weg der kürzeste aller Wege sein muß. Das ist ein spezieller Fall des Prinzips, das gewöhnlich mit dem Namen von Fermat verbunden wird (im 6. Jh. u. Z. wird Olympiodoros dieses Prinzip wie folgt begründen: Die Natur läßt nichts Überflüssiges zu, das wäre aber der Fall, wenn sie für die Verbreitung des Lichts nicht den kürzesten Weg wählen würde). Nach dem Reflexionsgesetz geht Heron dazu über, verschiedene Spiegeltypen zu betrachten; besondere Aufmerksamkeit schenkt er dabei den zylindrischen Spiegeln sowie den darin entstehenden verzerrten Abbildern. Am Ende der Schrift werden Beispiele für die Anwendung von Spiegeln, zum Beispiel in Theatervorstellungen, angeführt.

Vom Standpunkt der Entwicklung der Meßtechnik aus ist eine andere Schrift von Heron, »Über die Dioptra«, von Interesse. Als Dioptra bezeichnete Heron ein universales Visierinstrument, das die Funktionen des Theodoliten und Sextanten in sich vereinigte. Das Richten der Dioptra erfolgte durch das Drehen um zwei Achsen — die horizontale und die vertikale; zum genaueren Richten diente eine mikrometrische Schraube, die in dieser Schrift zum ersten Mal beschrieben wurde.

Die Strahlenbrechung wurde von Heron noch nicht behandelt, obwohl sie den Griechen schon seit langem bekannt war. Ein systematisches Studium dieser Erscheinung wurde zum ersten Mal von Ptolemaios betrieben. In seiner »Optik« beschreibt Ptolemaios Versuche zur Messung von Winkeln der Strahlenbrechung beim Übergang von einem durchsichtigen Medium in ein anderes und führt die von ihm ermittelten Werte an, die für die damalige Zeit sehr präzise waren. Ptolemaios entdeckte auch die Erscheinung der Totalreflexion. Jedoch gibt es keinerlei Hinweise, daß Ptolemaios das Brechungsgesetz zu formulieren versucht hätte.

In Fragen der Lichtreflexion und der Natur des Sehvermögens ging Ptolemaios nicht weiter als seine Vorläufer. Seine Optik baute sich immer noch auf der Hypothese von den vom Auge ausgesandten Sehstrahlen auf!

Von Interesse sind einige Überlegungen, die Plutarch in seiner Schrift über das »Mondgesicht« äußert. Er führt Ar-

gumente gegen die Ansicht an, daß der Mond die Sonnenstrahlen widerspiegele, und verweist darauf, daß wegen der Unebenheit der Mondoberfläche keine Reflexionen wie von einem glatten Spiegel zu erwarten sind. Die Mondoberfläche reflektiert das Licht ähnlich einer Menge beliebig angeordneter Spiegel nach allen Seiten. Plutarch stellt fest, daß zum Beispiel die Milch im Gegensatz zum Wasser infolge der rauhen Beschaffenheit des ihre Oberfläche bedeckenden Films auch keine Spiegelreflexion hat. Hieraus leitete er ab, daß die lunare Oberfläche der irdischen Oberfläche ähnlich sein muß. Diese Überlegungen zeigen, daß Plutarch mit der Erscheinung der Lichtstreuung bereits vertraut war.

Damit endet im Grunde genommen die Geschichte der antiken Optik. Unter den Leistungen der späteren Zeit soll der uns erhalten gebliebene Auszug aus dem Aufsatz von Anthemios, dem Erbauer der Hagia Sophia in Byzanz (6. Jh. u. Z.), erwähnt werden. In diesem Auszug werden die Gesetzmäßigkeiten der Reflexion von parabolischen Spiegeln präzise formuliert.

## **Biologie und Medizin**

Eine Besonderheit der beschreibenden Naturwissenschaften in der Spätantike bestand darin, daß alle Bereiche, die keine unmittelbare Verbindung mit der Praxis hatten, verkümmerten und ausstarben. Im Gegensatz dazu entwickelten sich alle praxisbezogenen Bereiche weiter, vor allem die Medizin. Zu den Bereichen der ersten Gruppe gehörte unter anderem die Zoologie, die seit der Zeit des Erscheinens der »Tiergeschichte« von Aristoteles deutlich degenerierte und allmählich die Züge, die jeder echten Wissenschaft eigen sind, einbüßte. Zoologische Bücher begann man als eine Art Unterhaltungslektüre zu betrachten, und Inhalt und Form der Darstellung wurden von dieser Grundeinstellung geprägt.

Ein repräsentatives Beispiel für diese Art Literatur war der Aufsatz »Über die Tiere« von Alexander aus Myndos (1. Jh. v. u. Z.) — eine Art zoologische Enzyklopädie, die sich lange Zeit großer Popularität erfreute. Dort wurden die den Werken von Aristoteles und anderen Autoren entnommenen Informationen mit märchenhaft phantastischen Beigaben geschmückt.

Wenn man die Liebe der Römer zur populärwissenschaftlichen Literatur enzyklopädischen Charakters berücksichtigt,

liegt die Vermutung nahe, daß die Schriften auch in Latein erscheinen mußten. Dem war auch so. In einer unübertroffenen Sammlung von interessanten Informationen und Einzelheiten erschien die »Geschichte der Natur« von Plinius Secundus d. Ä. (23/24—79 u. Z.). Dieses grandiose Werk besteht aus 37 Büchern, deren größter Teil der Beschreibung der Flora und Fauna verschiedener Gegenden und Länder gewidmet ist. Es enthält auch Rezepte zur Zubereitung und Anwendung der verschiedensten Arzneimittel. Im Gegensatz zur »Tiergeschichte« von Aristoteles beruhen Plinius' Texte nur zum geringsten Teil auf eigenen Beobachtungen; in der Hauptsache waren es kritiklose Kompilationen aus einer riesigen Anzahl von Quellen. Wie Plinius im Vorwort zur »Naturgeschichte« mitteilt, ging der Schaffung dieses Werkes die Lektüre von etwa 2000 Büchern voraus, aus denen an die 20 000 Exzerpte gemacht wurden. Die Popularität und der Einfluß der »Naturgeschichte« waren nicht nur in der römischen Zeit enorm, sondern auch im Mittelalter und in der Renaissance.

Noch weiter in Richtung Unterhaltung ging der Römer Claudius Aelianus (3. Jh.), der zwar in Praeneste (heute Palestrina) bei Rom geboren wurde, seine Bücher jedoch in Griechisch schrieb. Von seinen Werken ist uns das Buch »Über die Eigenheiten der Tiere« überliefert, das eine Sammlung von Anekdoten und wunderlichen Geschichten darstellt; es zeigt nicht einmal den Ansatz einer systematischen Darstellung bzw. einer kritischen Auseinandersetzung mit dem Stoff.

Wesentlich besser war es um die Botanik bestellt, denn sie bildete die Grundlage, auf der sich die Pharmakologie jener Zeit entwickelte. Bereits Anfang des 1. Jahrhunderts v. u. Z. gab der Hofarzt des Königs Mithridates VI. Eupator, Krates, ein Buch über Heilkräuter heraus, dessen Text von kunstvoll angefertigten farbigen Illustrationen geschmückt war (über die Qualität der Illustrationen können wir uns aufgrund der uns überlieferten Kopien dieses Buches ein Urteil erlauben). Im Anhang zum Buch schrieb Krates über Arzneien; er wurde später sowohl von Dioskrides als auch von Plinius d. Ä. in großem Umfang genutzt.

Das von dem römischen Philosophen Sextius Niger verfaßte Arzneimittelbuch soll auch nicht unerwähnt bleiben. In diesem Buch, das hauptsächlich der Botanik und der Pharmakologie gewidmet ist, begründete Niger die vegeta-

rische Lebensweise, zu der er sich selbst bekannte.

Größten Ruhm genoß in der Spätantike die Schrift zur Botanik und Pharmakologie von Dioskurides aus Kilikien (1. Jh. u. Z.), der als Militärarzt beim Imperator Claudius diente und sich danach in Rom niederließ. In dieser Schrift, die den Titel »Über Arzneistoffe« (»Peri hyles iatrikes«) trug und aus fünf Büchern bestand, gab Dioskurides eine ausführliche und systematische Beschreibung von sechshundert Heilpflanzen. Die Autorität dieser Schrift blieb im Mittelalter sowohl in Europa als auch bei den Arabern unangefochten.

Der allgemeine Niedergang der antiken Kultur in den ersten Jahrhunderten unserer Zeitrechnung hat sich nicht auf die Medizin ausgewirkt. Die Ärzte genossen als Leibärzte an den Höfen der Monarchen bereits in der Epoche der Diadochen Ruhm und Ehre und erwarben ein großes Vermögen. Rom gewährte den griechischen Ärzten ein breites Betätigungsfeld. Die Medizin der römischen Kaiserzeit ist durch die Rivalität zwischen einer Reihe von Schulen (Empiriker, Methodiker, Pneumatiker usw.) charakterisiert, die sich sowohl in ihren theoretischen Anschauungen als auch in den Methoden ihrer Heilpraxis unterschieden.

Trotz der Polemik, die die Vertreter dieser Schulen miteinander führten, erkannten sie alle Hippokrates als Klassiker und Begründer der medizinischen Wissenschaft an und schrieben Kommentare zu einzelnen Schriften aus dem »Corpus Hippocraticum«.

Unter den medizinischen Werken, die von römischen Autoren in Latein geschrieben wurden, verdient ein Buch von Cornelius Celsus (1. Jh. u. Z.) erwähnt zu werden, das eine Art Nachschlagewerk ist und einen Teil einer nicht erhalten gebliebenen achtbändigen Enzyklopädie darstellt. Es zeichnet sich nicht durch inhaltliche Originalität aus, sondern vielmehr durch seine klare Form der Darstellung, die den römischen Autoren überhaupt eigen war.

Das Blühen der Medizin in der römischen Kaiserzeit brachte einen hervorragenden Gelehrten hervor, dessen Tätigkeit als eine Synthese aller Leistungen der vorausgegangenen Epoche ihren Ausdruck fand. Es war Galen (129—199), ein großer Arzt, Anatom und Physiologe, der eine Vielzahl von Werken schrieb, die sich auf die unterschiedlichsten Bereiche der damaligen Wissenschaft erstreckten. Galen war für die Medizin das, was Ptolemaios für die Astro-

nomie war. Beide waren unanfechtbare Autoritäten auf ihrem Gebiet und blieben es bis in die Epoche der Renaissance. Ihnen war außerdem noch gemeinsam, daß ihr Einfluß auf die nachfolgende Wissenschaft nicht so sehr durch den schöpferischen Charakter ihres Genies als vielmehr durch die ihnen eigene Gabe bestimmt war, eine große Menge an Informationen und Erkenntnissen systematisch darzustellen. Ähnlich wie mit dem »Almagest« von Ptolemaios, der das Studium von astronomischen Werken früherer Jahre überflüssig machte, verhielt es sich auch mit den medizinischen Schriften von Galen, die das Studium der medizinischen Werke seiner Vorgänger erübrigten.

Galen wurde in Pergamon geboren; in seinem Vaterhaus (sein Vater war Architekt) erhielt er eine vielseitige und für die damalige Zeit erschöpfende Bildung. Er studierte dann Philosophie und Medizin in Smyrna, Korinth und Alexandria, arbeitete in Pergamon und zog 162 nach Rom, wo er bis zu seinem Tode lebte. Als Wissenschaftler war Galen fast universal, als Autor ungewöhnlich fruchtbar; allein auf dem Gebiet der Medizin schrieb er 150 Werke (80 davon sind erhalten geblieben), und die Gesamtliste seiner Werke enthält an die 250 Titel. Freilich hatte diese Fruchtbarkeit auch ihre Schattenseiten: Galens Werke leiden in ihrer Mehrzahl unter einem weitschweifigen Stil und sind zuweilen nicht sehr originell. Als Mensch war Galen wohl nicht sehr angenehm; andere Autoren schreiben über seinen Eigendünkel, seine Eitelkeit und seinen Karrierismus.

Galen war ein hervorragender Anatom; darin unterschied er sich positiv von den meisten »Empirikern«, »Methodikern«, »Pneumatikern« und »Eklektikern«. Er studierte nicht nur die Anatomie des Menschen, sondern auch die verschiedener Tiere — von Stieren, Schafen, Schweinen, Hunden usw. Diese Studien wurden dadurch angeregt, daß das Öffnen von Menschenleichen in Rom verboten war, wie früher in Hellas. Dieses Verbot hemmte einerseits die ärztliche Tätigkeit, förderte aber andererseits die Entwicklung der vergleichenden Anatomie der Tiere. So entdeckte Galen unter anderem eine große Ähnlichkeit im inneren Aufbau von Mensch und Affe. Die Affen, die zu jener Zeit im südwestlichen Europa lebten, waren Objekt seiner Untersuchungen (darunter auch der Vivisektionsuntersuchungen), mit deren Hilfe er die Struktur von Muskeln, Knochen und anderen Organen studierte.

Die physiologischen Anschauungen von Galen beruhten vor allem auf der Säftelehre des Hippokrates. Galen beherrschte die Werke seines großen Vorläufers glänzend und kommentierte diese nicht nur vom medizinischen, sondern auch vom philologischen Standpunkt aus. Von großem Interesse für die mittelalterliche Medizin war Galens Lehre über die »Hauptkräfte«, die einzelnen Organen eigen und im Körper gemäß der vernünftigen Naturordnung verteilt sind; in dieser Lehre wirkten sich die teleologischen Aspekte der Weltanschauung von Galen aus. Galen unterzog das zentrale und das periphere Nervensystem einer detaillierten Analyse; so versuchte er unter anderem, die Verbindung der Rückenmarksnerven mit den Prozessen der Atmung und der Herztätigkeit zu ermitteln. Der wahre Mechanismus der Herztätigkeit und des Blutkreislaufs blieb ihm jedoch verborgen. In seiner Therapie spielte neben der Luft- und Wassertherapie und der Diät auch die Dreckapotheke (Heilpräparate, die oft sehr kompliziert waren und bis zu einigen Dutzend Komponenten, darunter auch Gifte eingeschlossen) eine große Rolle. Die Rezepte und Vorschriften von Galen enthielten Elemente vorwissenschaftlicher Wunderheilung; das trug aber nur zu ihrer noch größeren Popularität zu Galens Lebzeiten wie auch später im Mittelalter bei.

Wie wir sehen, war Galen eine recht widersprüchliche Persönlichkeit; neben fortschrittlichen Zügen schlugen sich in seinen Theorien und in seiner medizinischen Praxis auch einige charakteristische Momente des Verfalls der antiken Kultur nieder. Und darin bietet sich eine Parallele zu Ptolemaios' astrologischer Tätigkeit.

Nach Galen ist in der antiken medizinischen Wissenschaft ein Niedergang zu verzeichnen. Damit ist nicht der Niedergang der rein praktischen Seite der ärztlichen Tätigkeit (dieser Niedergang wird auch eintreten, aber später!) gemeint; im Gegenteil, im 3. bis 4. Jahrhundert u. Z. waren die Chirurgie, die Ophthalmologie und die Stomatologie auf einem sehr hohen Niveau. Aber die Ausarbeitung von theoretischen Problemen der Medizin, der Anatomie, der Physiologie und anderer analoger Disziplinen erlahmte fast völlig. Wir wollen jedoch auf eine interessante Persönlichkeit eingehen, die in der Medizin die Rolle eines Bindegliedes zwischen der antiken und der mittelalterlichen Wissenschaft übernahm (wie Johannes Philoponos in der Mechanik). Es handelt sich um Oreibasios aus Pergamon, einen berühmten

Arzt des 4. Jahrhunderts u. Z., der fast genau zweihundert Jahre später lebte als Galen (326—403). Oreibasios studierte Medizin in Athen, wo er die Bekanntschaft des späteren Kaisers Iulianus Apostata (»der Abtrünnige« — er wurde so genannt, weil er sich vom Christentum abwandte, obwohl er streng christlich erzogen worden war) machte. Zwischen ihnen entstand, vielleicht auf der Grundlage ihres gemeinsamen Bekenntnisses zur heidnischen Religion, eine echte Freundschaft. In der nicht langen Regierungszeit des Iulianus war Oreibasios sein Leibarzt; er begleitete den Imperator auf seinem verhängnisvollen persischen Feldzug, auf dem dieser am 26. Juni 363 im Alter von 32 Jahren getötet wurde. Nach Iulianus' Tod war Oreibasios von dessen christlichen Nachfolgern Repressalien ausgesetzt. Er wurde am Ende aber begnadigt (wahrscheinlich, weil er später das Christentum angenommen hatte). Das Hauptwerk von Oreibasios war ein medizinisches Sammelwerk in siebenzig Büchern, die er im Auftrag des Iulianus geschrieben hatte und in denen das gesamte auf dem Gebiet der Medizin in sechs Jahrhunderten von Hippokrates bis Galen erworbene Wissen in systematischer Form dargelegt wurde. Etwa ein Drittel dieser Enzyklopädie wurde uns überliefert, so daß wir anhand der erhalten gebliebenen Fragmente die Gründlichkeit und Gewissenhaftigkeit einschätzen können, die dieses grandiose Werk auszeichnen.

## NACHWORT

Wir haben die Geschichte der antiken Wissenschaft von ihrer Geburt bis zu ihrem Untergang im 5./6. Jahrhundert u. Z. verfolgt. Diese Geschichte stellt einen einheitlichen Prozeß dar, und die Unterschiede der einzelnen Phasen des Prozesses unterstreichen nur seine Einheitlichkeit. So wie ein lebender Organismus verschiedene Entwicklungsphasen durchmacht, kann man die frühgriechische Wissenschaft, die hellenistische Wissenschaft und die Wissenschaft der römischen Kaiserzeit als Jugend, Reife und Alter der antiken Wissenschaft betrachten. Chronologisch stimmt die Geschichte der antiken Wissenschaft mit der Geschichte der antiken Kultur überein und kann als ein Teil von ihr angesehen werden.

Damit erschöpfen sich jedoch nicht die Fragen, die durch einen Vergleich der antiken Wissenschaft mit der Wissenschaft der Neuzeit entstehen. In der modernen Wissenschaft gibt es ebenfalls Etappen, die sich wesentlich voneinander unterscheiden. Die Wissenschaft des Mittelalters im 12./13. Jahrhundert, die Wissenschaft der Renaissance, die große wissenschaftliche Revolution im 16./17. Jahrhundert, die Wissenschaft des industriellen Kapitalismus und schließlich die wissenschaftlich-technische Revolution des 20. Jahrhunderts sind jene Etappen, in denen die Kontinuität der Entwicklung der europäischen Wissenschaft ihren klaren Ausdruck gefunden hat. In dieser Kontinuität finden wir nicht die geringsten Anzeichen eines potentiellen Niedergangs oder Verfalls. Kulturepochen vergehen, die sozial-ökonomischen Formationen verändern sich, die Wissenschaft aber entfaltet sich mit zunehmender Geschwindigkeit, und es gibt keine Anzeichen dafür, daß sich dieses Tempo in absehbarer Zukunft verlangsamen wird. Diese Besonderheit unterschei-

det die Wissenschaft der Neuzeit grundlegend von der der Antike.

Eine andere Besonderheit der Wissenschaft der Neuzeit besteht in ihrer zunehmenden Bedeutung für die Entwicklung der Produktivkräfte und in ihrem Einfluß auf alle Seiten des menschlichen Lebens. Wir sprechen heute oft von der Wissenschaft als einer unmittelbaren Produktivkraft, doch vergegenwärtigen wir uns nicht immer die volle Tragweite dieser Wahrheit. Was wäre unsere Wirtschaft, unser Alltag, das gesamte Leben eines modernen Menschen ohne die Erfolge der Physik, der Chemie, der Mechanik, der Geologie und anderer Wissenschaften? Wir gewöhnen uns sehr schnell an die Früchte und lassen oft außer acht, daß wir diese Früchte dem kreativen Schaffen vieler Generationen von Wissenschaftlern zu verdanken haben.

Nichts dergleichen war für die Antike zutreffend. Ungeachtet der glänzenden Leistungen der griechischen Wissenschaft, über die wir in diesem Buch berichtet haben, wurde das Leben eines Menschen der antiken Epoche von diesen Leistungen so gut wie überhaupt nicht geprägt. Die Geschichte der Republik Athen wäre nicht viel anders verlaufen, hätten Anaxagoras und Platon in dieser Stadt nicht gelebt. Die Siege des Alexanders von Makedonien wurden in keinem Maße von der wissenschaftlichen Tätigkeit eines Aristoteles bestimmt. Und wir können uns auch vorstellen, daß die Kriege der Diadochen und ihrer Nachfolger ohne Musaios ungefähr so ausgegangen wären, wie sie in Wirklichkeit ausgegangen sind. Die Wissenschaft der Sklavenhaltergesellschaft war keine obligatorische Ingredienz dieser Gesellschaft: die damalige Gesellschaftsordnung wäre auch ohne Wissenschaft bestens zu Rande gekommen.

Aber sie war eine organische Komponente der antiken Kultur. Und wenn die griechische Wissenschaft nie dagewesene Höhen erreichte, so liegen die Ursachen dafür in den Besonderheiten der antiken Kultur und in der Weltanschauung der Menschen jener Epoche.

Die Besonderheiten der antiken Kultur wurden durch jene Vorstellungen von der Wirklichkeit bestimmt, die sich bei den Griechen in der Zeit der Entstehung der griechischen Stadtstaaten herausbildeten. Wesentlich für die Ausprägung dieser Vorstellungen waren die griechische Religion und das griechische Epos. Die Wissenschaft verarbeitete und systematisierte diese Vorstellungen. Es entstand

eine Weltvorstellung, die für die Antike, und nur für sie, charakteristisch ist. Diese Weltvorstellung darf nicht nur auf das platonisch-aristotelische Modell des Kosmos beschränkt werden. Sie ließ vielfältige Variationen zu und trat bei verschiedenen Denkern in unterschiedlichen Formen auf. Die Atomistik von Demokrit und Epikur schuf ein Weltbild, das sich vom pythagoreischen oder vom peripatetischen wesentlich unterschied, das jedoch in den Grenzen des antiken Realitätsempfindens blieb.

Die antike Wissenschaft hat es nicht vermocht, diese Grenzen zu überschreiten. Es ist kein Zufall, daß die geometrische Algebra der Griechen nicht in eine gewöhnliche Algebra, wie sie für unsere Zeit charakteristisch ist, überzugehen vermochte. Es erstaunt uns heute, daß die Griechen jener Epoche trotz der großartigen Leistungen der hellenistischen Mathematik außerstande waren, solche elementaren Begriffe wie die Null oder negative Größen einzuführen, die erst bei Ptolemaios und Diophant, zudem noch in unklarer Form, erscheinen. Ein anderes Beispiel: Trotz der Entwicklung der Kriegstechnik, unter anderem der ballistischen, vermochten die Griechen nicht die uns heute selbstverständlich erscheinenden Bewegungsgesetze zu formulieren. Oder: Trotz der ausgearbeiteten Theorie der Kegelschnitte einerseits und der Erfolge der beobachtenden Astronomie andererseits ist kein Grieche auf die Idee gekommen, daß sich die Planeten auf elliptischen Bahnen bewegen könnten. Die griechischen Mathematiker operierten zwar mit einigen Funktionen, aber der Funktionsbegriff selbst blieb ihnen unbekannt. Die Beispiele ließen sich beliebig fortsetzen.

Die Annahme, in der griechischen Wissenschaft hätte es keine Tendenzen gegeben, über den Rahmen der antiken Weltvorstellung hinauszugehen, wäre falsch. Diese Tendenzen finden wir bei Aristarch, bei Archimedes, bei Diophant und selbst bei Pappos. Sie wurden jedoch nicht realisiert. Bevor sie erblühen konnten, waren sie schon verwelkt.

Aus diesem Grund scheinen uns die Ansichten, die den Untergang der antiken Wissenschaft auf die Einfälle der Barbaren oder auf den Sieg des Christentums zurückführen wollen, falsch zu sein. Es steht außer Frage, daß die Barbaren kein Interesse an der Wissenschaft zeigten und daß die Kirchenväter der Wissenschaft eher negativ gegenüberstanden, jedoch waren dies nur äußere Faktoren, die die

über mehrere Jahrhunderte währende Krise der antiken Kultur, einschließlich der antiken Wissenschaft, zu einem konsequenten Ende führte. Dieser Krise lagen innere Ursachen zugrunde, die für den Niedergang der antiken Wissenschaft ausschlaggebend waren.

## LITERATUR

- Becker, O.*: Das mathematische Denken der Antike, Göttingen 1957  
*Berger, H.*: Geschichte der wissenschaftlichen Erdkunde der Griechen, 2. Aufl., Leipzig 1903  
*Boekh, A.*: Des Pythagoreers Philolaos Lehren nebst den Bruchstücken seines Werkes, Berlin 1819  
*Bollack, J.*: Empédocle. Introduction à l'ancienne physique. Paris 1965  
*Burkert, W.*: Weisheit und Wissenschaft. Studien zu Pythagoras, Philolaos und Platon, Nürnberg 1962  
*Burnet, J.*: Early Greek Philosophy, 4-th ed., London 1940  
*Cantor, G.*: Vorlesungen über Geschichte der Mathematik, 4. Aufl., Leipzig 1922  
*Cohen M. A. and I. E. Drabkin.*: A Source Book in Greek Science, Cambridge (Mass.) 1966  
*Cuvier, G.*: Histoire des sciences naturelles, Paris 1841  
*Dicks, D. B.*: Early Greek astronomy to Aristotle, London 1970  
*Diels, H.*: Die Fragmente der Vorsokratiker, 10. Aufl., Berlin 1960  
*Dijksterhuis, E. J.*: Die Mechanisierung des Weltbildes, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1956  
*Dreyer, J. L. E.*: History of the Planetary Systems from Thales to Kepler, 2-nd ed., Cambridge 1953  
*Frank, E.*: Plato und die sogenannten Pythagoreer, 2. Aufl., Darmstadt 1962  
*Fritz, K. von.*: Grundprobleme der Geschichte der antiken Wissenschaft, Berlin, New York 1971  
*Gerland, E.*: Geschichte der Physik, München, Berlin 1913  
*Gilbert, O.*: Die meteorologischen Theorien des griechischen Altertums, Leipzig 1907  
*Gomperz, Th.*: Griechische Denker, Leipzig 1903-09  
*Heiberg, J. L.*: Geschichte der Mathematik und Naturwissenschaften im Altertum, München 1925  
*Levi-Strauss, C.*: La pensée sauvage, Paris 1962  
*Lloyd, G. E. R.*: Polarity and Analogy. Two types of argumentation in early Greek thought, Cambridge 1966  
*Luria, S.*: Die Infinitesimaltheorie der antiken Atomisten, in: Quellen und Studien zur Geschichte der Mathematik, Astronomie und Physik, Bd. 2, Berlin 1933  
*Neugebauer, O.*: The History of Ancient mathematical astronomy, Vol. 1—3, 1975  
*Neugebauer, O.*: The exact sciences in Antiquity, 2-nd ed., Princeton 1957  
*Reidemeister, K.*: Das exakte Denken der Griechen, Hamburg 1959

- Rožanskij, I. D.*: Anaksagor. U istokov antičnoj nauki, Moskva 1972
- Sambursky, S.*: The physical world of the Greeks, London 1956
- Sambursky, S.*: The physical world of the late antiquity, London 1962
- Sarton, G.*: A History of science. Ancient science through the golden age of Greece, Cambridge (Mass.) 1952
- Sarton, G.*: A History of science. Hellenistic science and culture in the last three centuries, Cambridge (Mass.) 1959
- Snell, B.*: Die Entdeckung des Geistes, 3. Aufl., 1955
- Solmsen, F.*: Aristoteles' System of the Physical World, Cornell, Ithaca 1960
- Tannery, P.*: Pour l'histoire de la science hellène, 2-me éd., Paris 1930
- Taton, R. (Hrsg.)*: Histoire générale des sciences. La science antique et médiévale, Paris 1957
- Vernant, J.-P.*: Les origines de la pensée grèeque, Paris 1962
- Vogel, C.*: Pythagoras and early Pythagoreanism, Assen 1966
- Wedberg, A.*: Plato's Philosophy of Mathematics, Stockholm 1955
- Waerden, B. L. van der*: Erwachende Wissenschaft, Bd. 1: Ägyptische, babylonische und griechische Mathematik, 2. Aufl., Basel — Stuttgart 1966
- West, M. L.*: Early Greek philosophy and the Orient, Oxford 1971
- Wußing, H.*: Mathematik in der Antike, Leipzig 1962

## PERSONENREGISTER

- Aelianus, Claudius (2./3. Jh.) 187  
 Aetios (um 100) 114  
 Agatharcos (um 460 v.u.Z.) 79  
 Agrippa (1. Jh.) 178  
 Aischines (389—314 v.u.Z.) 86  
 Akusilaos von Argos (5. Jh. v.u.Z.) 21, 67  
 Alexander der Große (356—323) 29, 102, 118, 119, 124, 126, 153, 154, 165, 193  
 Alexander aus Myndos (1. Jh. v.u.Z.) 186  
 Alkaios (um 600 v.u.Z.) 29  
 Alkmaion von Kroton (um 500 v.u.Z.) 69, 70, 74, 81, 93  
 Ammianus Marcellinus (4. Jh.) 168  
 Ammonios (5./6. Jh.) 183  
 Amyntas (um 400 v.u.Z.) 102  
 Anaxagoras (um 500—428) 22, 47, 57—60, 62, 63, 79, 80, 82, 85, 93, 144, 193  
 Anaximander (um 610—545) 10, 13, 22, 23, 30, 40, 41, 58, 67, 127  
 Anaximenes (um 585—525) 42, 43, 58, 82, 85  
 Andronikos von Rhodos (1. Jh. v.u.Z.) 117  
 Anthemios aus Tralleis (6. Jh.) 186  
 Antiphon (um 430 v.u.Z.) 79, 80, 85  
 Antisthenes (um 444—um 366) 86, 124  
 Apollonios von Perge (um 200 v.u.Z.) 17, 78, 135—138, 141, 148, 165, 171, 175  
 Aratos (um 310—245) 100, 176  
 Archelaos (5. Jh. v.u.Z.) 84  
 Archimedes (um 287—212) 17, 18, 78, 95, 120, 128, 131—134, 138, 145—147, 153, 154, 157—159, 161, 166, 171, 174, 181, 194  
 Architas (um 400—365) 45, 78—80, 87, 88, 94, 95, 130  
 Aristarch von Samos (um 310—um 230) 101, 141—146, 176, 194  
 Aristippos (um 435—355) 86  
 Aristophanes (um 445—nach 388) 79, 84  
 Aristophanes von Byzanz (um 257—180) 162  
 Aristoteles (384—322) 10, 13, 15—17, 22, 38—40, 47, 57, 61, 81, 102—117, 119, 123, 125, 153, 155, 160—162, 165, 167, 170, 177, 183, 184, 186, 187, 193  
 Aristoxenos (um 354—300) 114, 115  
 Aristyllos (um 300 v.u.Z.) 147  
 Arrianus (um 95—um 175) 125  
 Athenaios (um 200) 154  
 Autolykos (um 330 v.u.Z.) 101, 102  
 Biruni, Al- (973—1048) 135  
 Boeckh, August (1785—1867) 44  
 Bollack, J. 55  
 Boyle, Robert (1627—1691) 17  
 Burkert, Walter 45  
 Burnet, John 52  
 Brahe, Tycho 141

- Caesar, Julius (100—44) 165,  
168, 176, 183
- Celsus, Cornelius (um 40 v.u.Z.  
—um 30) 166, 188
- Chryssippos (276—204) 122
- Cicero (106—43) 116, 146, 165,  
167, 176
- Cuvier, Georges de (1769—1832)  
112
- Dareios (König von 522 bis  
486) 33
- Dedekind, Richard (1831—1916)  
95
- Deinostatos (4. Jh. v.u.Z.) 100
- Demetrios von Phaleron (um  
350—283) 119
- Demetrios Poliorketes (um 336—  
285) 153
- Demokedes (um 500 v.u.Z.) 69
- Demokrit (um 460—370) 13, 17,  
22, 28, 53, 60—66, 74, 79, 80,  
91, 93, 95, 106, 120—122, 194
- Desargues, Gérard (1593—1662)  
175
- Dikaiarchos (um 300 v.u.Z.) 114,  
115, 125
- Diodoros (um 80—um 29) 28,  
168
- Diogenes von Apollonia (499/98  
—428/27) 84, 85
- Diogenes von Sinope (um 400—  
323) 124
- Diogenes Babylonios aus Seleu-  
keia (2. Jh. v.u.Z.) 122
- Diogenes Laërtios (um 220) 114
- Diokles (um 180 v.u.Z.) 139, 141
- Dionysios von Halikarnassos  
(um 30 v.u.Z.) 67, 168, 173
- Diophant (3. Jh.) 17, 173, 174,  
194
- Dioskurides (1. Jh.) 187, 188
- Dositheos (3. Jh. v.u.Z.) 132,  
134, 147
- Ekphantos (Anfang des 4. Jh.  
v.u.Z.) 101
- Empedokles (um 490—430) 22,  
23, 47, 57, 58, 60, 64, 69, 72,  
91, 93, 104, 123
- Engels, Friedrich (1820—1895)  
16, 50
- Ephoros (4. Jh. v.u.Z.) 68
- Epikur (342/41—271/70) 120—  
122, 141, 194
- Epimenides aus Kreta (um 500  
v.u.Z.) 21
- Erasistratos aus Keos (3. Jh.  
v.u.Z.) 163, 164
- Eratosthenes (um 276—um 194)  
17, 18, 120, 125—127, 134, 138,  
139, 147, 159, 168, 169
- Eudemos von Rhodos (um 300  
v.u.Z.) 39, 114, 115
- Eudemos (hellenist. Arzt) 164
- Eudoxos (um 408—um 355) 10,  
16, 28, 65, 78, 83, 88, 94—102,  
107, 109, 128—132, 141, 147, 165
- Eukleides aus Megara (um 450—  
370) 86
- Euklid (um 365—um 300) 10,  
14, 17, 75—78, 96, 120, 128—  
131, 138, 140, 141, 161, 165, 171,  
173, 175, 184
- Euktemon (um 430 v.u.Z.) 83,  
100, 145
- Eupalinos (um 530 v.u.Z.) 33
- Eutokios (6. Jh.) 176
- Fermat, Pierre de (1601—1665)  
174, 185
- Frank, E. 45
- Fritz, K. von 45
- Frontinus (um 40—103) 183
- Galen (129—199) 17, 165, 188—  
191
- Galilei, Galileo (1564—1642) 7,  
17
- Geminus (1. Jh. v.u.Z.) 168, 176
- Gomperz, Theodor (1832—1912)  
57
- Gorgias (um 485—380) 85
- Harpalos (um 500 v.u.Z.) 34, 83
- Hegel, Georg Wilhelm Friedrich  
(1770—1831) 50
- Heiberg, Johan Ludvig (1854—  
1928) 134
- Hekataios (2. Hälfte des 6. Jh.  
v.u.Z.) 66, 67, 127
- Hellanikos (5. Jh. v.u.Z.) 67
- Herakleides Pontikos (um 350  
v.u.Z.) 100, 101
- Heraklit (um 540—um 480) 23,  
30, 48—51, 58

- Herodot (um 484—425) 29, 30, 33, 68, 122, 125  
 Heron (vermutl. 1. Jh.) 154, 158, 162, 171, 181, 182  
 Herophilos aus Kalchedon (um 300 v.u.Z.) 162, 163  
 Hesiod (um 700 v.u.Z.) 21, 23—26, 32  
 Hieron II. (um 306—214) 120, 158  
 Hipparch (um 190—125) 17, 83, 100, 126, 127, 147—152, 169—171, 176—178  
 Hippasos (um 450 v.u.Z.) 76, 78  
 Hippias von Elis (um 400 v.u.Z.) 80, 85  
 Hippokrates von Kos (um 460—370) 69—71, 73, 129, 162—164, 188, 191  
 Hippokrates von Chios (um 440 v.u.Z.) 14, 78—80, 128, 130  
 Homer (8. Jh. v.u.Z.) 24—28, 69, 73, 127, 169  
 Huygens, Christiaan (1629—1695) 17  
 Hypatia (um 370—415) 176  
 Hypsikles (um 150 v.u.Z.) 137, 140, 147  
 Iamblichos (um 283—um 330) 45  
 Ion von Chios (um 490—422) 28  
 Iulianus Apostata (332—363) 191  
 Johannes Philoponos (um 470—um 550) 184, 185, 190  
 Kallimachos (3. Jh. v.u.Z.) 162  
 Kallippos (um 370—300) 98—100, 107, 109, 151  
 Kepler, Johannes (1571—1630) 7, 136, 146  
 Kleomedes (1. Jh.) 168, 176  
 Kleostratos (2. Hälfte des 6. Jh. v.u.Z.) 82, 83  
 Konon (3. Jh. v.u.Z.) 131, 138, 147  
 Kopernikus, Nikolaus (1473—1543) 146, 179  
 Krateas (1. Jh. v.u.Z.) 187  
 Ktesias (um 400 v.u.Z.) 125  
 Leon (4. Jh. v.u.Z.) 131  
 Leukipp (Mitte des 5. Jh. v.u.Z.) 53, 60—63, 93  
 Lévi-Strauss, Claude (geb. 1908) 8  
 Livius, T. (59 v.u.Z.—17) 168  
 Lukrez (um 96—55) 121, 122, 166  
 Luria, S. (geb. 1890) 65  
 Lykon (um 270 v.u.Z.) 116  
 Lykurgos (um 390—324) 28  
 Macrobius (um 400) 146  
 Mandrokles (um 514 v.u.Z.) 33  
 Manilius (1. Hälfte des 1. Jh.) 168  
 Marcellinus, siehe Ammianus  
 Marcellus (gest. 207 v.u.Z.) 153  
 Marinos von Tyros (2. Jh.) 170  
 Marx, Karl (1818—1883) 59  
 Mela, Pomponius (1. Jh.) 170  
 Melissos (um 444 v.u.Z.) 53  
 Menaichmos (4. Jh. v.u.Z.) 100  
 Menelaos von Alexandria (Ende des 1. Jh.) 171, 172, 177  
 Meton (um 430 v.u.Z.) 83, 145, 151  
 Mithridates VI. Eupator (132—63) 187  
 Müller, Johannes Peter (1801—1858) 112  
 Musaios (vor dem 8. Jh. v.u.Z.) 28  
 Nausiphanes (um 330 v.u.Z.) 120  
 Nearchos (um 360—nach 314) 126  
 Neugebauer, Otto (geb. 1899) 10, 39  
 Newton, Isaac (1643—1727) 7, 14, 17  
 Nikomachos (um 400 v.u.Z.) 102  
 Nikomedes (um 200 v.u.Z.) 139  
 Oinopides (5. Jh. v.u.Z.) 28, 83  
 Olympiodoros (6. Jh.) 185  
 Oreibasios (4. Jh.) 190, 191  
 Orpheus (vor dem 8. Jh. v.u.Z.) 28  
 Pappos (um 300 u.Z.) 136, 158, 175, 194  
 Parmenides (um 540—480) 50, 51, 61, 62, 81  
 Pascal, Blaise (1626—1662) 175  
 Pausanias (2. Jh.) 169, 170  
 Perikles (um 495—429) 57  
 Phaidon (um 400 v.u.Z.) 86

- Pheidias (3. Jh. v.u.Z.) 131  
 Pherekydes aus Syros (6. Jh. v.u.Z.) 13, 21  
 Phidias (5. Jh. v.u.Z.) 33  
 Philipp II. (um 382—336) 102  
 Philistion (um 400 v.u.Z.) 94  
 Philolaos (Ende des 5. Jh. v.u.Z.) 44, 81  
 Pilon von Byzanz (Ende des 3. Jh. v.u.Z.) 154, 181  
 Philoponos, siehe Johannes  
 Platon (427—347) 22, 24, 28, 61, 77, 81, 84, 86—94, 103, 106, 113, 120, 125, 161, 165, 177, 193  
 Plinius (23/24—79) 151, 154, 166, 170, 187  
 Plutarch (um 46—120) 115, 142, 177, 186  
 Polemarch (4. Jh. v.u.Z.) 100  
 Polybios (um 200—120) 125, 159, 167, 168  
 Polyklet (2. Hälfte des 5. Jh. v.u.Z.) 33  
 Polykrates (gest. 522 v.u.Z.) 44  
 Porphyrios (232/233—um 301) 44  
 Poseidonios (um 135—51) 122, 167—170, 176  
 Praxagoras (4. Jh. v.u.Z.) 162  
 Praxiteles (4. Jh. v.u.Z.) 33  
 Proklos (410—485) 39, 175  
 Protagoras (um 481—411) 85  
 Ptolemaios I. Soter (um 367—283) 119, 128  
 Ptolemaios II. Philadelphos (308—246) 119  
 Ptolemaios III. Euergetes (um 284—211) 131  
 Ptolemaios (um 83—161) 17, 83, 148, 149, 162, 165, 169, 170, 172, 173, 175, 177—180, 184, 185, 188—190, 194  
 Pyrrhon (360—um 270) 121  
 Pythagoras (um 580—500) und Pythagoreer 10, 28, 43—47, 75, 76, 129  
 Pytheas (um 330 v.u.Z.) 125, 127  
 Schiaparelli, Giovanni Virginio (1835—1910) 96  
 Seleukos von Seleukeia (um 150 v.u.Z.) 145, 164, 167  
 Seneca (um 4 v.u.Z.—65) 170  
 Sextius Niger (1. Jh. v.u.Z.) 187, 188  
 Simplikios (1. Hälfte des 6. Jh.) 96, 97  
 Sokrates (470—399) 13, 59, 85, 86  
 Solon (um 640—560) 28  
 Stobaios (5. Jh.) 115  
 Strabon (um 64/63 v.u.Z.—um 20) 125, 126, 168, 169  
 Straton (um 350—270) 115, 116, 119, 126, 141, 160  
 Tacitus (um 55—um 120) 169  
 Thales (um 624—546) 10, 22, 23, 34, 38, 39, 74, 84, 175  
 Theaitetos (um 410—368) 77, 79, 88, 129, 130  
 Theodoros (um 400 v.u.Z.) 77, 80, 88  
 Theon von Alexandria (2. Hälfte des 4. Jh.) 175  
 Theophrast (um 372—287) 10, 70, 111, 114, 115, 119, 162  
 Theopompos (um 377 bis nach 320) 68  
 Theudios (4. Jh. v.u.Z.) 131  
 Thomas von Aquin (1225—1274) 109  
 Thukydidēs (um 460—390) 68  
 Timocharis (um 300 v.u.Z.) 147, 149, 177  
 Varro (116—27) 166, 176  
 Vegetius, Flavius (um 400) 183  
 Vieta, Francois (1540—1603) 174  
 Vitruv (1. Jh. v.u.Z.) 183  
 Waerden, Bartel Leendert van der (geb. 1903) 39  
 West, M. L. 41  
 Xenophanes (um 570—480) 24, 30, 35, 50, 51  
 Xenophon (um 430—354) 84, 86, 125  
 Xerxes (König von 486—465) 34, 126  
 Zenodoros (um 180 v.u.Z.) 139, 140  
 Zenon von Elea (um 490—430) 52, 53, 80  
 Zenon von Kition (um 335—um 263) 121, 122  
 Zoroaster (zwischen 1000 und 500 v.u.Z.) 29

Anaxagoras soll auf die Frage nach dem Sinn des Lebens geantwortet haben: »Die Beobachtung von Sonne, Mond und Himmel«. Wir, Menschen des 20. Jahrhunderts, wissen: Wir leben in einem Universum von unvorstellbarer Ausdehnung. Wir sind in den Mikrokosmos eingedrungen und den molekularebiologischen Wurzeln des Lebens auf die Spur gekommen. Jahrhundertealte Fragen fanden moderne Antworten! Um die Gegenwart zu verstehen, muß man die Vergangenheit kennen.