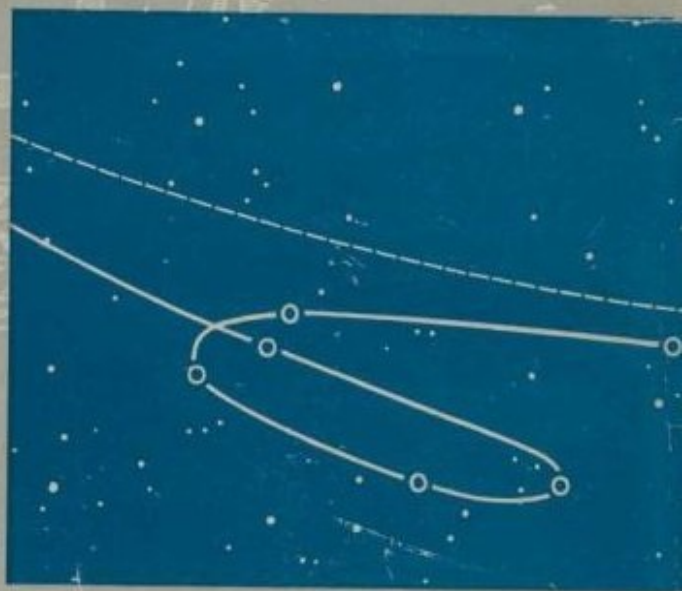


BUBLEINIKOW



4000 JAHRE KAMPF UM DAS WELTBILD



BUBLEINIKOW

4000 Jahre Kampf um das Weltbild

Die Entwicklung der Vorstellungen von der Erde

Mit 24 Abbildungen



URANIA-VERLAG

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur

LEIPZIG/JENA

Schutzumschlag: Rudolf Spiegel. Aus dem Russischen übertragen von Nora Kluge

Originaltitel: Ф. А. Бублейников, Очерк развития представлений о Земле

Alle Rechte vorbehalten

URANIA-VERLAG, Verlag für populärwissenschaftliche Literatur, Leipzig/Jena

Printed in Germany. Lizenz-Nr. 212. 475/5/57

Gesamtherstellung: Philipp Reclam jun. Leipzig · 1957

INHALT

Einleitung	6
Die Vorstellung von der Erde und dem Weltall bei den Völkern des Alten Orient	9
Die Entstehung der antiken Kosmologie	15
Die Entstehung der Idee von der Kugelform der Erde	20
Die Verbreitung der geozentrischen Weltanschauung	26
Die Entwicklung der Wissenschaft von der Erde und dem Himmel bei den Arabern und den Völkern Mittelasiens	40
Die Kosmologie im mittelalterlichen Europa	47
Die großen geographischen Entdeckungen	55
Die Entstehung der Lehre von den Bewegungen der Erde	62
Der Kampf für die Lehre von den Bewegungen der Erde	78
Die Entstehung der experimentellen Richtung in der Mechanik	92
Die Entdeckung der Gesetze des freien Falls der Körper	101
Die Schwerkraft und die Masse der Erde	112
Die Veränderung der Schwere und die Form der Erde	122
Die Struktur der Erde nach seismologischen Daten	139
Physikalische Beweise für die Erdrotation	151
Die Erscheinungen der Gezeiten und die Härte der Erde	164
Die elastisch-zähen Deformationen der Erde	175
Die Temperatur der Erde	187
Die Dichte und der Druck im Erdinneren	192
Erklärung der Fachausdrücke	198

EINLEITUNG

Die Erforschung der Gestalt der Erde, ihrer Lage im Raum und ihrer Bewegung war für die Entwicklung der naturwissenschaftlichen Weltanschauung von größter Bedeutung. Lange Zeit konnten die Menschen keine richtigen Vorstellungen von der Form der Erde gewinnen, da deren Ausmaße ihren Gesichtskreis überschritten.

Ein Teil der Erdoberfläche, zum Beispiel die Oberfläche des Stillen Ozeans, die schon von geringer Höhe weithin überblickbar ist, erscheint vollkommen flach. Vom trügerischen unmittelbaren Eindruck ausgehend, hielten die Menschen die Erde lange Zeit für eine weite ebene Fläche. Von diesem Irrtum konnten sie sich erst nach gründlichen Beobachtungen und genauen Messungen überzeugen.

Noch schwieriger war es, die Vorstellung von der Unbeweglichkeit der Erde aufzugeben. Als die Philosophen Heraklides von Pontos und Ekphantus im 5. und 4. Jahrhundert v. u. Z. die tägliche Umdrehung des Sternhimmels durch die Eigenbewegung der Erde erklären wollten, fanden sie bei ihren Zeitgenossen keinen Glauben.

Die Kosmologien des Aristoteles, des Eudoxos und anderer griechischer Philosophen und Astronomen waren nur Versuche, den Anschein, daß nicht nur der Mond, sondern auch die Sonne, die Planeten und der ganze Sternhimmel um die Erde kreisen, in ein wissenschaftliches System zu bringen. Aus ihnen entstand die geozentrische Weltanschauung, die die Erde als unbeweglichen Mittelpunkt des Weltalls betrachtete.

Doch schon bald ergab sich aus astronomischen Beobachtungen, daß die sichtbaren Bewegungen der Sonne und der Planeten zwischen den unbeweglichen Sternen nicht damit zu erklären waren, daß sie um die Erde als Mittelpunkt kreisten. Daraufhin mußte der griechische Astronom Hipparchos zur Erklärung dieser Bewegungen voraussetzen, daß die Erde nicht im Zentrum der kreisförmigen Bahnen der Sonne und der Planeten liegt. Folglich lag seiner Vorstellung nach die Erde schon nicht mehr genau im

Mittelpunkt des Weltalls; sie wurde jedoch weiterhin als unbeweglich angesehen.

Hipparch stieß mit der Annahme exzentrischer Bewegung der Himmelskörper nicht auf Widerspruch. Auch Ptolemäus ging beim Aufbau seines Weltsystems von ihnen aus. Die Astronomen des Altertums fanden sich leicht mit dem Gedanken ab, daß die Erde nicht im Mittelpunkt des Weltalls läge, sie bestanden jedoch unbedingt auf ihrer Unbeweglichkeit.

Die Frage, ob die Erde beweglich oder unbeweglich sei, beschäftigte die Menschheit viele Jahrhunderte lang. Die religiösen Lehren behinderten dabei die Herausbildung richtiger Ansichten von der Natur der Erde als Himmelskörper und ihrer Lage im Weltall.

Der Kampf um die Erkenntnis, daß die Erde sich bewegt und die Sonne im Zentrum unseres Planetensystems steht, ist eine sehr wichtige Etappe in der Geschichte der Wissenschaft.

Schon die Gelehrten und Philosophen des Altertums kamen zu dem Schluß, daß die Erde kugelförmig sei. Gegen Ende der ersten Hälfte des 16. Jahrhunderts begründete Kopernikus die Lehre von der Bewegung der Erde im Raum und ihrem Rotieren um die eigene Achse. Aber erst seit der Mitte des 18. Jahrhunderts erlaubten die Fortschritte in der Astronomie und der Physik die Erforschung der physikalischen Eigenschaften der Erde. Sie beschränkte sich zunächst auf die Untersuchung der Veränderung der Schwere auf der Erdoberfläche. Es gelang, endgültig die Rotation der Erde zu beweisen und unbedeutende Deformationen ihrer Gestalt unter dem Einfluß fluterzeugender Kräfte festzustellen.

Am langsamsten schritt die Untersuchung der inneren Struktur der Erde voran. Sie wurde erst durch die Entwicklung seismologischer Untersuchungsmethoden möglich. Auf der Erforschung der seismischen Wellen, die die tieferen Zonen der Erdkugel durchlaufen, beruhen unsere Kenntnisse von den physikalischen Eigenschaften des Erdinneren.

Die seismologischen Untersuchungen führten zu wichtigen Schlüssen über die Eigenschaften der Erdkugel im ganzen und den Aggregatzustand ihrer Substanz; sie ermöglichten es auch, in der Erde verschiedene Grenzflächen festzustellen, d. h. Grenzen, an denen sich ihre physikalischen Eigenschaften plötzlich ändern.

Die Erforschung der physikalischen Eigenschaften der Erde wird dadurch erschwert, daß die Stoffe im Erdinneren unter einem ungeheueren Druck stehen, den man im Laboratorium nicht erzeugen kann.

Unter dem Druck im Erdinneren erweisen sich die festen Gesteine als plastisch gegenüber den Kräften, die stetig oder während einer längeren Zeit auf sie einwirken. Gleichzeitig leisten sie kurzfristig wirkenden Kräften einen elastischen Widerstand. Darum verhält sich die Erde in einigen Fällen als fester und in anderen als plastischer Körper.

Trotz der bestehenden Schwierigkeiten verfügt die Wissenschaft schon über genügend Unterlagen, um über die physikalischen Eigenschaften der Erde urteilen zu können.

Die Erforschung der Erde als Planet und physikalischer Körper muß kosmogonischen Konstruktionen vorausgehen. Die natürliche Fortsetzung dieses Buches wäre die Darlegung der Frage nach dem Ursprung der Erde. Diese Frage ist jedoch sehr weitläufig und muß das Thema einer besonderen Arbeit sein.

Die materialistische naturwissenschaftliche Weltanschauung ist ohne das Wissen um die Struktur der Erde und ihre Eigenschaften nicht vollkommen. Die Geschichte der Erforschung der Erde als Planet und physikalischer Körper ist eines der wichtigsten Kapitel in der Geschichte der Naturwissenschaft.

DIE VORSTELLUNG VON DER ERDE UND DEM WELTALL BEI DEN VÖLKERN DES ALTEN ORIENTS

Im 3. und 2. Jahrtausend v. u. Z. lebten in China, Vorderasien und Ägypten Kulturvölker, die die ersten großen Staaten der Welt bildeten. Von ihnen zeugen zahlreiche Baudenkmäler, die noch heute durch ihre Großartigkeit überraschen.

Die Ruinen riesiger Bauten und einzelne noch bis in die Neuzeit erhaltene Denkmäler, wie z. B. die ägyptischen Pyramiden, zeigen, daß ihre Erbauer schon beachtliche astronomische Kenntnisse besaßen. Insbesondere wurden die Baudenkmäler des alten Ägyptens in bestimmter Weise nach den Punkten des Sonnenaufgangs und des Sonnenuntergangs orientiert. Die Hauptachse eines der ägyptischen Tempel war zum Aufgangspunkt des Sirius gerichtet. Die Achse eines anderen Tempels liegt in der Richtung des Sonnenuntergangs zur Zeit der Sonnenwende; an diesem Tage durchdrangen die Strahlen beim Sonnenuntergang die ganze Tempellänge; danach ließ sich leicht die Länge eines Jahres festlegen.

Das Studium dieser Baudenkmäler zeigt uns, daß in den Ländern des Orients schon seit Urzeiten regelmäßig astronomische Beobachtungen angestellt wurden. Weitere Angaben über die astronomischen Beobachtungen dieser Völker konnte man in ihren Schriftdenkmälern finden, z. B. in alt-ägyptischen und babylonischen Inschriften. Die Notwendigkeit, astronomische Kenntnisse zu erwerben und zu sammeln, ergab sich aus der Wirtschaft der altorientalischen Völker.

Die wichtigste Aufgabe für die Astronomie war damals die Feststellung des Beginns der Jahreszeiten, von denen die landwirtschaftlichen Arbeiten abhängen. Im alten Ägypten hatte man schon frühzeitig bemerkt, daß die Überschwemmung des Nils in der Zeit eintrat, wenn der Sirius zum ersten Male im Osten erschien, und zwar kurz vor Sonnenaufgang. Mit dem Erscheinen dieses Sternes mußten die Frühjahrsfeldarbeiten begonnen werden. Ebenso standen viele andere Himmelserscheinungen im alten Ägypten

mit dem Ablauf der Landwirtschaft in Verbindung. So wurde die Getreide-ernte begonnen, wenn am Morgen im Osten das Sternbild der Jungfrau aufstieg, und das geerntete Korn abgewogen, wenn das Sternbild der Waage am Himmel erschien. Dadurch erklärte sich auch die Tatsache, daß das Sternbild der Jungfrau im Altertum als ein Mädchen mit einer Garbe in den Händen dargestellt wurde.

Die Astronomie entstand also aus den praktischen Bedürfnissen der sich entwickelnden Gesellschaft. Karl Marx bemerkte: „Die Notwendigkeit, die Perioden der Nilbewegung zu berechnen, schuf die ägyptische Astronomie und mit ihr die Herrschaft der Priesterkaste als Leiterin der Agrikultur.“¹

Die chinesischen Chroniken und die Schriftdenkmäler der alten Inder be- weisen, daß der Himmel auch in China und in Indien schon seit ältesten Zeiten beobachtet wurde. In Indien befinden sich bei Delhi gewaltige alte Steinbauten, die eigentlich Instrumente zum Anvisieren der Sterne, des Mondes und der Sonne und zum Bestimmen ihrer Positionen sind. Aber während im alten Ägypten und in Babylonien die astronomischen Be- obachtungen von den Priestern betrieben wurden, gab es in China schon 2000 Jahre v. u. Z. Fachastronomen.

Die Beobachtung des Himmels führte in den Ländern des Alten Orients zu vielen wichtigen Entdeckungen. Man stellte fest, daß fünf Himmels- körper nicht die gleiche Stellung zu ihren Nachbargestirnen beibehalten, sondern sich zwischen ihnen im allgemeinen vom Westen nach dem Osten bewegen. Diese „Wandelsterne“ wurden später als Planeten bezeichnet. Aus der Gegenüberstellung der in den Chroniken verzeichneten Daten der Finsternisse haben ägyptische und babylonische – und noch früher chine- sische – Astronomen festgestellt, daß sich die Finsternisse in bestimmten Abständen wiederholen, und zwar nach Ablauf einer Periode von 6585 Tagen (18 Jahren und 11 Tagen). Diese sogenannte Sarosperiode gab die Möglich- keit, schon im Altertum Finsternisse vorauszusagen.

In den chinesischen Chroniken ist vermerkt, daß schon 2000 Jahre v. u. Z. zwei chinesische Astronomen hingerichtet wurden, weil sie eine Sonnen- finsternis nicht vorausgesagt hatten, deren unerwartetes Eintreten im Volk Unruhe hervorgerufen hatte.

¹ Kapital, Bd. 1, Berlin 1947, S. 539.

Die Staaten des Alten Orients unterhielten miteinander rege Handelsbeziehungen. Daher wurden die astronomischen Kenntnisse der einzelnen Länder des Alten Orients zum Gemeingut der ganzen Kulturwelt. Es ist charakteristisch, daß die Dauer des längsten Sommertages in allen Ländern des Alten Orients mit $14^h 24^{min}$ angesetzt wurde. In Wirklichkeit gilt dieser Wert nur für die Breite von Babylon.

Trotz dieser Fortschritte der beobachtenden Astronomie entstanden jedoch in den Ländern des Alten Orients keine zutreffenden Vorstellungen vom Aufbau des Weltalls, da hierfür keine günstigen Voraussetzungen herrschten.

Die ökonomische Grundlage der Gesellschaft war damals die Sklaverei. Sie beruhte auf der Zwangsarbeit der Sklaven, die in Handarbeit gigantische Baudenkmäler und Bewässerungsanlagen schufen. Diese ökonomische Ordnung konnte die Entwicklung der Wissenschaft nicht fördern. Im wirtschaftlichen und politischen Leben der Staaten des Altertums spielten die Priester eine große Rolle. Da sie besonders in Ländern wie dem alten Ägypten und Babylonien die Landwirtschaft leiteten, hatten sie sich das alleinige Recht gesichert, astronomische Beobachtungen anzustellen, um den Beginn der Feldarbeiten und die Termine religiöser Feiertage festzulegen.

Aber die Priester waren weder daran interessiert, für die Naturerscheinungen eine richtige Erklärung zu finden, noch daran, ihre Kenntnisse dem Volke mitzuteilen. Gleichzeitig waren sie bestrebt, die religiösen Vorstellungen zu festigen, nach denen der Mensch und die menschliche Gesellschaft von den Naturkräften und vor allem von den Himmelskörpern und den Vorgängen am Himmel völlig abhängig sein sollten.

Die Religion der Völker des Alten Orients hatte einen animistischen Charakter; ihr lag die Vergeistigung der Naturerscheinungen zugrunde, denen man einen direkten Einfluß auf die Taten und das Schicksal der Menschen zuschrieb. Ein ganz besonderer Einfluß wurde der Sonne und dem Mond, den Sternen und den Planeten zuerkannt. So wurden die Himmelskörper Gegenstand religiöser Verehrung. Bei den alten Indern waren die Hauptgötter Djauspita – Vater Himmel – und Pritgivi-matar – Mutter Erde. Von den zahlreichen Göttern des alten Ägyptens waren der Sonnengott Ra und die Mondgöttin Isis die wichtigsten. Diese Gottheiten verkörperten

den Himmel mit seinem strahlendsten Himmelskörper, der Sonne, und dem Mond als nächtliches Licht. Der blinde Glaube an den Einfluß der Himmelskörper auf das Schicksal der Menschen, führte zur Entstehung und Verbreitung der Astrologie, einer Pseudowissenschaft, die die Ereignisse auf der Erde willkürlich mit Erscheinungen am Himmel in Verbindung bringt und versucht, aus den Bewegungen der Himmelskörper, dem Eintreten von Sonnen- oder Mondfinsternis, dem Erscheinen der Kometen oder anderen Phänomenen das Schicksal einzelner Menschen, ganzer Völker und der gesamten Menschheit vorherzusagen.

Am stärksten entwickelte sich die Astrologie in Babylonien. Nicht nur im frühen Altertum, sondern auch später war sie stets ein nachhaltiges Hindernis für die Entwicklung der wissenschaftlichen Astronomie. Im babylonischen Kalender, der aus dem Anfang des 2. Jahrtausends v. u. Z. stammt, waren neben den Daten der Finsternisse auch die Auswirkungen angegeben, die man von ihnen erwartete.

Der griechische Geschichtsschreiber Diodor von Sizilien (80–29 v. u. Z.) charakterisierte die astrologischen Anschauungen der alten Babylonier (Chaldäer) durch den Hinweis, daß ihrer Meinung nach „alle Veränderungen am Himmel keine Folge eines Zufalls oder innerer Gesetze seien, sondern einem bestimmten und unabänderlichen Beschluß der Götter unterlägen. Die Chaldäer beobachteten schon seit alter Zeit die Himmelskörper, und niemand hat genauer als sie die Bewegungen und die Kräfte der einzelnen Sterne untersucht. Daher können sie auch soviel über die Zukunft der Menschen prophezeien. Am wichtigsten erscheint ihnen die Untersuchung der Bewegung von fünf Gestirnen, die man Planeten nennt. Sie nennen sie die Voraussagesterne . . ., weil sie sich im Gegensatz zu den übrigen Himmelskörpern, die nie von ihrer üblichen Bahn abweichen, immer in ihren eigenen Bahnen bewegen und eben dadurch die Zukunft der Menschen voraussagen und den Menschen das Wohlwollen der Götter verkünden“.

Die Vorstellung der Völker des Alten Orients von der Einrichtung der Welt – ihre kosmologischen Ansichten – waren auf der unmittelbaren Wahrnehmung der sie umgebenden Wirklichkeit begründet, an deren Zuverlässigkeit sie nicht im mindesten zweifelten. Es erschien ihnen völlig unbestreit-

bar, daß sich die Erde im Mittelpunkt des ganzen Weltalls befinde und daß sie flach sei. Verständlich ist es, daß in dieser Epoche noch nicht die Vermutung aufkommen konnte, daß die Erde sich im Raum bewegt. Man hielt die Erde für unbeweglich, und diese Ansicht herrschte noch Jahrtausende hindurch, bis zum 16. Jahrhundert u. Z.

In den Hymnen des Rigveda, eines der ältesten Schriftdenkmäler Indiens, wurden die weite Erdenfläche und das blaue Himmelsgewölbe besungen. Darin zeigt sich die Begeisterung der Dichter, denen die Natur zum Nutzen und zur Freude der Menschen geschaffen schien. Damals bestand kein Zweifel, daß es im Weltall ein „oben“ und ein „unten“ gebe, und die Tiefe unter der Erde schien unendlich, da die Phantasie sich weigerte, ihr Grenzen zu setzen.

Nach den Vorstellungen der Völker des Alten Orients war die Erde das Fundament des ganzen Weltalls. Dieser Gesichtspunkt ist z. B. in der Bibel klar ausgedrückt, wo es heißt, daß Gott die Himmelskörper an der Feste des Himmels geschaffen habe, um den Tag von der Nacht zu trennen, um die Zeiten, die Tage und Jahre zu kennzeichnen, damit sie an der Feste des Himmels Leuchten wären.

Da sie von solchen primitiven kosmologischen Vorstellungen ausgingen, konnten die Astronomen des Altertums die Ursache des Auf- und Untergangs der Himmelskörper infolge der Erdumdrehung nicht erkennen. So fand man für diese Erscheinungen nur phantastische Erklärungen im Rahmen der religiösen Vorstellungen.

In dem ägyptischen „Totenbuch“ wird erzählt, wie die Seelen der verstorbenen Menschen zugleich mit der untergehenden Sonne durch das „Westtor“ in die Unterwelt hinabsteigen. Durch solch ein „Tor“ geht auch die Sonne früh im Osten auf. Während der Nacht nimmt sie ihren Weg durch einen unterirdischen Gang oder zieht am Horizont entlang unter der Erdoberfläche von Westen nach dem Osten.

Man kann freilich mit einer gewissen Berechtigung annehmen, daß bereits im frühen Altertum kühne Vermutungen über die Bewegung der Erde geäußert wurden.

So gibt es z. B. in dem alten „Lied über das Weltall“ solche Strophen: „Ich werde die Barden fragen . . . und warum sollen sie mir nicht antworten?

Ich werde sie fragen, worauf die Welt sich hält, warum sie, ohne jegliche Stütze, nicht fällt . . . Ist die Welt nicht ein gigantischer Wanderer? Sie geht unermüdlich und bleibt zugleich ruhig auf ihrer Bahn. Und wie erstaunlich ist die Form dieser Bahn, aus der die Welt in keiner Richtung abweicht.“

Dieser Text läßt erkennen, daß sein Verfasser ernsthaft an die Bewegung der Erde gedacht hat. Aber diese Vermutungen wirkten sich nicht auf die Entwicklung der Wissenschaft aus. Sogar das wesentlich einfachere Problem der Gestalt der Erde wurde von den Völkern des Alten Orients nicht gelöst. Nur die Wölbung der Erdoberfläche wurde von den Babyloniern und Indern bemerkt. Sie stellten die Erde in Form eines Kugelsegmentes dar, dessen flache Seite nach unten gewandt war.

DIE ENTSTEHUNG DER ANTIKEN KOSMOLOGIE

Wesentliche Fortschritte machte die Erforschung der Erde und des Himmels im alten Griechenland. Griechenland war kein einheitlicher, zentralisierter Staat. Es bestand aus zahlreichen Stadtstaaten, die miteinander um die wirtschaftliche und politische Vorherrschaft rangen. Zuerst entwickelte sich die Wissenschaft in den griechischen Städten an der Ostküste des Ägäischen Meeres in Kleinasien, vor allem in Ephesos und Milet. Im 7. bis 6. Jahrhundert v. u. Z. hatten diese Städte große Bedeutung. Später, zu Beginn des 5. Jahrhunderts v. u. Z., litten sie durch die Perserkriege sehr, und Athen wurde zum Zentrum der griechischen Kultur und Wissenschaft.

Die Anfänge der griechischen Wissenschaft gehen auf die ersten Jahrzehnte des 6. Jahrhunderts v. u. Z. zurück, als sich in Griechenland der Handel, die Seefahrt und die Kolonisation lebhaft entwickelten. Dies alles trug dazu bei, das Interesse an der Natur zu wecken. Die Kultur der Völker des Alten Orients, vor allem Ägyptens und Babylonien, beeinflusste die sich entwickelnde griechische Wissenschaft. Die alten Griechen beschränkten sich jedoch im Gegensatz zu den altorientalischen Priestern und Astrologen nicht darauf, die Naturerscheinungen nur zu beobachten, sondern versuchten, die Welt zu erklären und die Ursachen der himmlischen und der irdischen Erscheinungen zu erforschen.

Damals verfügten Ägypter, Babylonier und Inder bereits über gewisse mathematische Kenntnisse. Die Inder erfanden das Zahlensystem, in dem der Wert der Ziffer durch ihren Platz bestimmt wird. Ihnen waren Näherungslösungen für einige geometrische Aufgaben bekannt, z. B. die Bestimmung der Fläche von Vielecken und vielleicht sogar schon der Lehrsatz des Pythagoras (an Zahlenbeispielen).

In Ägypten kannte man die Geometrie als Sammlung der einfachsten Regeln zur Vermessung von Grundstücken schon mehr als tausend Jahre, bevor sie von griechischen Gelehrten als theoretische Wissenschaft entwickelt wurde. Von dem Stand der ägyptischen Mathematik zeugt der

sogenannte Papyrus Rhind, der aus dem 2. Jahrtausend v. u. Z. stammt. Dieses Dokument läßt erkennen, daß die Vermessung damals in Ägypten noch unvollkommen war; die Fläche eines dreieckigen Feldes wurde z. B. durch das Multiplizieren der Hälfte der einen Seite des Dreiecks mit irgendeiner der zwei anderen errechnet. Der Verfasser des Papyrus Rhind rechnete jedoch schon mit abstrakten Zahlen – ein großer Fortschritt in der Entwicklung der Mathematik. Die babylonischen und ägyptischen Priester verschwiegen ihre mathematischen Kenntnisse und astronomischen Beobachtungen und ließen sie in einem mystischen Licht erscheinen. So verzögerten sie die Entwicklung der Geometrie zu einer systematischen theoretischen Wissenschaft.

Die alten Griechen schätzten die mathematischen Kenntnisse der Ägypter sehr. Der Philosoph Demokrit (460–370 v. u. Z.) schrieb: „Von allen meinen Zeitgenossen habe ich die meisten Länder bereist, die entferntesten Erscheinungen untersucht, habe die weitesten Flächen des Himmels und der Erde gesehen, habe die meisten Gelehrten gehört, aber in den Kombinationen der Linien und in den entsprechenden Beweisen hat mich niemand übertroffen, nicht einmal die ägyptischen Harpedonapten“ („die Seilestraffenden“, d. h. die Landmesser). Als die Griechen aus anderen Ländern die Grundzüge der Geometrie übernahmen, befreiten sie diese von allem mystischen Beiwerk und verwandelten sie in ein geordnetes System von Lehrsätzen, die auf der Grundlage weniger unbestrittener, axiomatischer Wahrheiten bewiesen wurden.

Zweifellos waren Regeln, die von den Baumeistern, Maurern und Zimmerleuten des Altertums praktisch erarbeitet worden waren, für die Entwicklung der Geometrie von großer Bedeutung. Diese Handwerker erkannten erstmals bestimmte Eigenschaften von rechten Winkeln, Parallelen, Dreiecken und anderen geometrischen Figuren. Man kann mit dem Kulturhistoriker A. E. Taylor annehmen, daß schon lange, bevor die Geometer den pythagoreischen Lehrsatz formuliert hatten, nach dem das Hypotenusenquadrat gleich der Summe der Kathetenquadrate ist, diese Tatsache den Dachdeckern bekannt gewesen war, die mit rechteckigen Dachziegeln zu tun hatten. Es ist durchaus möglich, daß die Geometer diese Regel, die eine der Hauptgrundlagen der elementaren Geometrie und Trigonometrie

darstellt, eben von den Bauleuten übernommen. Dafür spricht auch, daß Euklid (Ende des 4. Jahrhunderts v. u. Z. in Alexandria) den graphischen Beweis des Lehrsatzes des Pythagoras eine „Eselsbrücke“ nannte.

Den griechischen Geometern gebührt das Verdienst, die Regeln der Landmesser und Handwerker wissenschaftlich verallgemeinert und die Anfänge der Lehre von den Beziehungen zwischen abstrakten, geometrischen Linien und Figuren geschaffen zu haben, die in den Werken von Euklid und anderen Mathematikern des klassischen Altertums systematisch weiter entwickelt worden sind.

Schon die ersten griechischen Gelehrten und Philosophen suchten die Natur materialistisch zu verstehen. In ihrer Spekulation äußerte sich prägnant die materialistische Weltanschauung, die nach der Definition von Friedrich Engels „weiter nichts bedeutet als einfache Auffassung der Natur so, wie sie sich gibt, ohne fremde Zutat“.

Wie schon erwähnt, waren die Städte in Kleinasien die Geburtsstätte der griechischen Wissenschaft. Dieses von den Griechen kolonisierte Küstengebiet hieß Ionien. Daher erhielt auch die philosophische Schule, die dort entstanden war, den Namen „ionische Schule“. Als ihr Begründer gilt Thales von Milet (624–547 v. u. Z.).

Thales war auch in der Astronomie bewandert. Nach den Aussagen des griechischen Geschichtsschreibers Herodot (5. Jahrhundert v. u. Z.) hat er die Sonnenfinsternis vorausgesagt, die während des Krieges der Lydier gegen die Meder eintrat. Thales konnte sie berechnen, weil er die Sarosperiode und die Daten der vorhergehenden Sonnenfinsternisse kannte. Nach Meinung einiger späterer Philosophen hielt er die Erde für kugelförmig.

Anhänger des Thales waren die Philosophen Anaximander (611–547 v. u. Z.) und Anaximenes (588–524 v. u. Z.). Anaximander schreibt man die Einführung und Vervollkommnung der Sonnenuhr und die Schaffung der ersten geographischen Karte zu. Er hat sich also sowohl mit der beobachtenden Astronomie als auch mit der Lage der Erde im Raum befaßt. Anaximander glaubte nicht, daß der Himmel am Horizont die Erde berühre, und nannte das Ausmaß der Himmelssphäre gewaltig im Vergleich zu der flachen Scheibe der Erde, die sich in ihrem Mittelpunkt befinde.

Der Philosoph Heraklit (530–470 v. u. Z.) aus Ephesos schuf die Grundlagen der dialektischen Naturbetrachtung. Nach Heraklit beginnt die Erkenntnis der Natur mit der sinnlichen Wahrnehmung der Außenwelt. Aber die einfache Wahrnehmung der Außenwelt durch die Sinnesorgane ermöglicht noch keine vollständige Erkenntnis, vielmehr ist hierzu die Kritik der Sinneswahrnehmungen durch die Vernunft unbedingt erforderlich. „Gesund denken ist die größte Vollkommenheit“, sagte Heraklit, „und die Weisheit besteht darin, daß man das Wahre sagt und die Natur belauscht und dann ihr entsprechend handelt“, d. h. die Wahrheit in der Erfahrung der Sinne sucht, die der Kritik der Vernunft unterworfen wird. Das Wesentliche an der Lehre von Heraklit ist die dialektische Einstellung zu den Naturerscheinungen.

Heraklit behauptet, daß in der Natur „alles existiert und gleichzeitig nicht existiert, da alles fließt, alles sich ständig verändert, alles sich im ständigen Prozeß des Entstehens und des Vergehens befindet“.

Die materialistische Richtung der griechischen Philosophie hatte einen großen Einfluß auf die Entwicklung der kosmologischen Anschauungen. Der Philosoph Anaxagoras (500–428 v. u. Z.) lehrte, die Sonne, der Mond und die Sterne seien glühende schwere Körper. Er behauptete auch, daß sich auf dem Mond Berge, Ebenen und Täler befänden. Der Mond wäre seiner Meinung nach ein Körper von der Größe der Halbinsel Peloponnes, und die Sonne wäre noch um viele Male größer. Die Sonne und der Mond kreisten um die Erde, ohne auf sie zu fallen, ebenso wie ein in einer Schleuder bewegter Stein um die Hand kreist.

Als Anaxagoras seine Ansichten in dem Werk „Über die Natur“ veröffentlichte, wurde er der Gottlosigkeit beschuldigt, eingekerkert und zum Tode verurteilt. Nur die Fürsprache seines Schülers Perikles, des großen athenischen Staatsmanns, rettete ihn vor der Hinrichtung, die in lebenslängliche Verbannung aus Athen abgewandelt wurde.

Schon die älteren griechischen Philosophen nahmen an, daß die Erde als Mittelpunkt des Weltalls frei im Raum schwebte. Dabei ergab sich das für jene Zeit schwierige Problem, warum die Erde nicht „hinabfalle“, eine Frage, die viele griechische Denker beschäftigte.

Xenophanes (etwa 570–470 v. u. Z.) schrieb der Erde die Form eines Baum-

stumpfes zu, dessen Schnittfläche von den Menschen bewohnt sei, während seine langen Wurzeln tief in den Raum dringen und die Erde so vor dem Fallen bewahren. Diese Meinung fand jedoch selbst zu jener Zeit kaum Anhänger.

Anaximenes vermutete, daß sich unter dem Gewicht der Erde die Luft sehr verdichte und sie in der Schwebelage halte. Parmenides (5. Jahrhundert v. u. Z.) wies darauf hin, daß alle Körper auf die Erde fallen, die Erde selbst aber nirgend hin fallen könne und eben deshalb im Gleichgewicht bleibe.

Es ist unbekannt, wie Demokrit diese Frage löste, aber im ganzen hat dieser Philosoph in seinen kosmologischen Anschauungen seine Zeitgenossen bei weitem überflügelt.

Demokrits Vorläufer begrenzten das Weltall mit einer Sphäre von Fixsternen; man dachte, daß sich alle Sterne im gleichen Abstand von der Erde befänden. Demokrit jedoch behauptete, das Weltall sei unendlich und in seinen Tiefen seien in verschiedenem Abstand von der Erde sonnenartige Sterne verstreut, die uns nur der großen Entfernung wegen als leuchtende Punkte erscheinen würden. Er hielt die Milchstraße für eine Ansammlung von Sternen, deren Licht wegen der ungeheuer großen Entfernung ineinanderflösse. Demokrit wies auch auf die Ähnlichkeit der Erdoberfläche mit der des Mondes hin, auf der sich seiner Meinung nach auch Berge und Täler befänden.

Die griechischen Philosophen haben die genialen kosmologischen Vorstellungen Demokrits nicht zu einem geschlossenen Weltsystem entwickelt; doch geht auf sie der Gedanke zurück, daß die Erde im Weltraum isoliert und kugelförmig sei. Später wurde diese Idee zur Grundlage des geozentrischen Weltsystems des Ptolemäus.

DIE ENTSTEHUNG DER IDEE VON DER KUGELFORM DER ERDE

Als einer der ersten hielt der Philosoph und Mathematiker Pythagoras (571–497 v. u. Z.) die Erde für kugelförmig. Diese Ansicht drang zu seinen Lebzeiten nicht in weitere Kreise. Er entwickelte seine Anschauungen nur vor seinen Schülern und hinterließ keine schriftliche Darlegung. Seine Lehre von der Gestalt der Erde kennen wir aus einem Werk des Philolaos, der im 5. Jahrhundert v. u. Z. lebte. Wie Philolaos mitteilt, vertraten die Pythagoreer die Meinung, die Erde müsse der geometrischen Harmonie wegen kugelförmig sein: „Im Verlangen nach Vollkommenheit in der Schöpfung gaben sie auch der Erde die vollkommenste Form.“

Die Lehre des Pythagoras von der Kugelform der Erde, die sich mit seiner Auffassung der „Harmonie der Welt“ verknüpft, wurde nicht mit geometrischen Beweisen erhärtet und konnte keinen nennenswerten Einfluß auf die Weltanschauung seiner Zeitgenossen ausüben.

Doch auch griechische Philosophen, die von anderen Erwägungen ausgingen, vermuteten schon, daß die Erde eine Kugel sei, und diese Ansicht verbreitete sich unter ihnen immer mehr.

Die Anerkennung der Kugelform der Erde schloß noch keinen Verzicht auf die Begriffe des absoluten „oben“ und „unten“ ein. Tatsächlich glaubten die griechischen Philosophen, wenn sie die Kugelform der Erde anerkannten, daß nur der „obere“ Teil der Erdoberfläche bewohnt sein könnte. Doch auch so machten ihre Anschauungen einen bedeutenden Fortschritt aus.

Diese Vermutung wurde bald durch Beobachtungen auf Seereisen bestätigt. Die griechischen – und vor ihnen die phönizischen – Seefahrer unternahmen weite Fahrten auf dem Mittelmeer und drangen auch durch die Meerengen zum Schwarzen und Asowschen Meer vor. Sie bemerkten, daß die Gipfel von Bergen am Horizont früher als ihr Fuß sichtbar werden. Diese Erscheinung und die Beobachtungen, daß der Horizont immer kreis-

förmig bleibt und daß sich die Höhe der Sterne bei Fahrten von Norden nach Süden ändert, legten den gleichen Gedanken nahe.

Die Philosophen und Geometer erfuhren von den Beobachtungen der Seefahrer. Sie erklärten diese Erscheinungen damit, daß die Horizontebene bei der Bewegung des Beobachters auf der Erdoberfläche ihre Lage im Raum verändert; das geschieht, wenn die Erdoberfläche gewölbt ist.

Aber die Krümmung der Oberfläche allein genügt noch nicht, um die Kugelform der Erde zu begründen. Man mußte erst noch feststellen, daß die Erde frei im Raum schwebt.

Bereits die frühen griechischen Philosophen erklärten die tägliche Bewegung der Himmelskörper mit der Umdrehung der Himmelssphäre. Solch eine Umdrehung könnte aber nur bei freiem Schweben der Erde vor sich gehen. Der erste, der auf der Grundlage tief durchdachter Beobachtungen die Kugelform der Erde begründete, war Aristoteles (384–322 v. u. Z.). Er wies darauf hin, daß während der Mondfinsternis der Rand des Erdschattens, der auf die Mondscheibe fällt, immer rund ist. Daraus ergäbe sich, daß die Erde kugelförmig sei. Aristoteles brachte noch andere Beweise für die Kugelform der Erde, die sich aus der Beobachtung ergaben, daß die Sterne ihre Stellung verändern, wenn der Beobachter seinen Standort auf der Erdoberfläche wechselt.

„Eine unbedeutende Verschiebung des Beobachtungsortes nach Süden oder Norden“, schrieb Aristoteles, „ergibt eine große Veränderung in der Stellung der Sterne: einige Sterne, die man in Ägypten sieht, sind in den nördlichen Ländern nicht zu sehen, während die Sterne, die in den nördlichen Ländern nicht vom Himmel herabsinken, in den südlichen am Horizont untergehen. Folglich ist die Erde nicht nur kugelförmig, sondern sie ist auch nicht sehr groß, da sonst bei einem so unbedeutenden Platzwechsel die oben beschriebene Erscheinung nicht bemerkbar wäre . . . Die Mathematiker behaupten, daß der Erdumfang etwa 400 000 Stadien beträgt.“

Der runde Rand des Erdschattens auf der Mondscheibe während der Mondfinsternis, das Verschwinden der sich entfernenden Schiffe unter dem Horizont, das Erscheinen zuvor unsichtbarer Sterne, wenn man sich vom Norden nach dem Süden bewegt – alle diese Beweise werden noch heute in unseren Lehrbüchern angeführt.

Solange die Kugelform der Erde nicht bewiesen war, konnte man auch nicht daran denken, ihre Maße zu bestimmen – wenn man von den Erwägungen der antiken Geographen hinsichtlich des Durchmessers der „Oikumene“, der „bewohnten“ Erde, absieht. Mit der Annahme der These, daß die Erde eine Kugel sei, wurde die Bestimmung ihrer Größenmaße zur

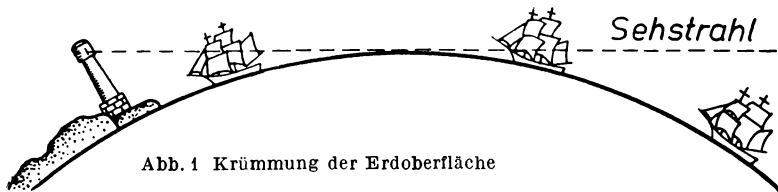


Abb. 1 Krümmung der Erdoberfläche

geometrischen Aufgabe, die mit Hilfe einfacher geodätischer Messungen zu lösen war, wie sie mit der weiteren Entwicklung der Geometrie möglich wurden.

Die griechischen Geometer und Astronomen haben einen besonderen Zweig der Geometrie entwickelt, die „Sphärik“ oder sphärische Trigonometrie. Die „Sphaerica“ des griechischen Astronomen Menelaos blieb uns erhalten und wurde 1758 in Oxford herausgegeben.

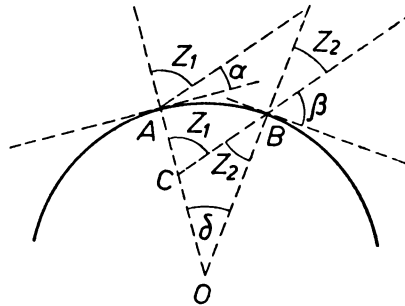
Die Sphärik führte den Begriff des mathematischen Horizontes ein, d. h. der Schnittpunktlinie des Himmelsgewölbes mit der Horizontebene, die durch den Mittelpunkt des Himmelsgewölbes geht, und den Begriff des Zenits (späterer arabischer Ausdruck) oder des Schnittpunktes des Himmelsgewölbes mit der vertikalen Linie, die durch den Scheitel des Beobachters geht.

Da sich mit dem Standortwechsel auf der Erdoberfläche die Lage der Horizontebene und des Zenits zu den Sternen ändert, müssen sich auch die Höhe und der Zenitabstand (die Zenitdistanz) der Sterne entsprechend verschieben. Das Verhältnis der Veränderung der Zenitdistanz und der Höhe der Sterne zur geographischen Breite ist sehr einfach¹. Durch geometrische

¹ Die Höhe des Sternes S (s. Abb. 2) im Beobachtungspunkte A sei in einem bestimmten Augenblick beim Schneiden des Meridians gleich dem Winkel α und im Punkt B gleich dem Winkel β (die Blickrichtungen nach dem Stern kann man infolge des ungeheuer großen Abstandes des Beobachters vom Stern in beiden Fällen als parallel zueinander annehmen). Die Zenitdistanz des Sternes in diesen Punkten ist $Z_1 = 90^\circ - \alpha$ und $Z_2 = 90^\circ - \beta$. Aus dem Dreieck BCO ist ersichtlich, daß die Differenz der Breite der Punkte A und B gleich $Z_1 - Z_2 = (90^\circ - \alpha) - (90^\circ - \beta) = \beta - \alpha$ ist, d. h. gleich der Differenz der Zenitdistanzen oder der Höhen des Sternes über dem Horizont.

Erwägungen ist leicht zu beweisen, daß die Differenz der Breiten zwischen zwei Punkten der Erdoberfläche, die auf demselben Meridian liegen, gleich der Differenz der Höhen oder Zenitdistanzen des gleichen Sternes ist, die in diesen Punkten in dem Augenblick gemessen werden, in dem der Stern durch den Meridian geht.

Abb. 2
Bestimmung der Länge eines Meridiangrades durch die Differenz der geographischen Breiten



Aristoteles selbst hatte sich nicht mit der Bestimmung der Maße der Erde befaßt. Diese Aufgabe übernahm der in Alexandria wirkende Astronom und Geograph Eratosthenes (276–195 v. u. Z.). Anstatt die Höhe der Sterne zu messen, maß er in der dritten Dekade des Juni, während der Sonnenwende, den Zenitabstand der Sonne in Alexandria und ermittelte hierfür einen Wert von $7^{\circ} 12'$. Wie Eratosthenes wußte, konnte man am gleichen Tage in Syene (Assuan) im Wasser sehr tiefer Brunnen das Spiegelbild der Sonne sehen, da sie am Mittag fast im Zenit stand.

Da er annahm, daß Alexandria und Syene auf demselben Meridian liegen, folgerte Eratosthenes, daß der Meridianbogen zwischen diesen Städten gleich der Differenz der Zenitabstände sei, also $\frac{7^{\circ} 12'}{360^{\circ}} = \frac{1}{50}$ des Erdumfangs betrage.

Die Länge des Meridianbogens zwischen Alexandria und Syene nahm Eratosthenes mit 5000 ägyptischen Stadien an, so wie sie die Führer der Handelskarawanen, die diesen Weg oft zurücklegten, schätzten. Damit ergab sich ein Erdumfang von 250 000 Stadien¹.

Bei der Messung der Zenitdistanz der Sonne war Eratosthenes, wie sich

¹ Um Fehlerquellen auszuschalten, schlug Eratosthenes dieser Summe 2000 Stadien zu; er rechnete also mit einem Erdumfang von 252 000 Stadien.

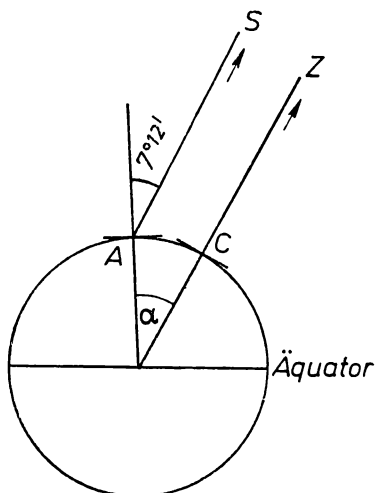


Abb. 3
Bestimmung des Meridianbogens durch Eratosthenes

später herausstellte, infolge der Unvollkommenheit der ihm zur Verfügung stehenden Instrumente ein Fehler von $5'$ unterlaufen, denn sie betrug in Wirklichkeit $7^\circ 7'$.

Der Fehler bei dieser Gradmessung des Meridianbogens betrug

$$\frac{7^\circ 12' - 7^\circ 7'}{7^\circ 7'} \approx 0,012 \text{ oder } 1,2\%.$$

Außerdem liegen Alexandria und Syene nicht genau auf demselben Meridianbogen; das vergrößert den Fehler noch etwas. Die Genauigkeit dieser Messung des Erdumfangs wird jedoch dadurch nicht berührt, da Eratosthenes die Entfernung zwischen Alexandria und Syene nicht gemessen, sondern einfach als glaubwürdig hingenommen hatte. Der Fehler hing hier nur von der Richtigkeit der angenommenen Entfernung zwischen Alexandria und Syene und der Länge des Stadions¹ ab.

Nach Eratosthenes befaßte sich der griechische Gelehrte Poseidonios (135–51 v. u. Z.) mit der Bestimmung der Erdmaße. Dafür wählte er den

¹ Die genaue Länge des griechischen Stadions ist unbekannt; sie wechselte auch häufig. Man kann aber vermuten, daß das Stadion, das Eratosthenes seinen Berechnungen zugrunde legte, ungefähr 157,7 m maß. In diesem Falle bestimmte er den Erdumfang mit 39 740 km, d. h. also mit einem Fehler von ungefähr 0,67%. Nach einer anderen Meinung rechnete Eratosthenes mit dem „Zehntelmeilenstadion“ (148,8 m). Der Erdumfang betrug also 37 498 km (Fehler 6,28 %).

Meridianbogen zwischen der Insel Rhodos, wo er lebte, und Alexandria, wohin die Handelsschiffe von Rhodos oft fuhren. Den Unterschied der geographischen Breiten bestimmte er nach dem Höhenunterschied des Fixsterns Kanopus, der auf Rhodos am Horizont sichtbar war, wenn er sich in Alexandria bis zu einer Höhe von $7^{\circ}30'$ über den Horizont erhob. Aus diesen Beobachtungen folgerte Poseidonios, daß der Meridianbogen zwischen Alexandria und Rhodos $7^{\circ}30'$ betrage. Als Entfernung zwischen Rhodos und Alexandria nahm er 5000 Stadien an – nach der Fahrzeit der Handelsschiffe, die zwischen den beiden Orten verkehrten.

Da ein Meridianabschnitt von $7^{\circ}30' \frac{1}{48}$ der Länge des Meridians ist, ergab sich ein Erdumfang von 240000 Stadien. Später berichtigte Poseidonios seine Berechnung, indem er die Entfernung zwischen Rhodos und Alexandria mit 3750 Stadien und daher einen Erdumfang von 180000 Stadien annahm.

Die Berechnung der Erdmaße durch Poseidonios war weniger genau als die schon vorher von Eratosthenes durchgeführte, da der Meßfehler sich infolge der Refraktion¹, die bei einer geringen Höhe des Sternes über dem Horizont die Genauigkeit der Bestimmungen stark beeinträchtigte, noch besonders vergrößerte. Aber diese Ergebnisse wurden von allen Gelehrten des Altertums und Mittelalters für die korrektesten gehalten. Diese Tatsache erklärt sich nach Meinung der Geschichtsschreiber der Physik dadurch, daß der Astronom Claudius Ptolemäus (2. Jahrhundert u. Z.), der für die europäischen Astronomen und Geographen fast bis zum Ende des 16. Jahrhunderts eine unanfechtbare Autorität war, den Erdumfang mit 180000 Stadien angesetzt hatte, ohne die Quelle zu nennen, der er diesen Wert entnahm.

Bei der Erforschung der Gestalt der Erde verhielten sich die griechischen Gelehrten bereits kritisch gegenüber den unmittelbaren Sinneseindrücken. Doch sie standen jetzt vor einem schwierigen Problem – der Klärung der Frage, ob die Erde stillsteht oder ob sie sich bewegt.

¹ Refraktion wird die Ablenkung des Lichtstrahls genannt, der von einem Himmelskörper nahe dem Horizont ausgeht; sie erfolgt wegen der Brechung des Lichtes in den verschieden dichten Luftschichten.

DIE VERBREITUNG DER GEOZENTRISCHEN WELTANSCHAUUNG

Die Lage der Erde im Weltall, ihre Größe im Vergleich zur Sonne und zum Mond und die Frage, ob sie sich in Ruhe oder Bewegung befindet, waren bis zum 16. Jahrhundert die Hauptprobleme der Kosmologie. Die meisten antiken Gelehrten haben dabei die Glaubwürdigkeit der unmittelbaren Wahrnehmung, daß die Erde unbeweglich sei, nicht bezweifelt. Man hielt die sichtbaren Bewegungen der Himmelskörper für tatsächliche, obwohl bekannt war, daß es scheinbare Bewegungen gab. Die Erkennung der Erdbewegung verhinderte vor allem der Stand der Physik jener Zeit, die nicht erklären konnte, warum diese Bewegung unbemerkt bleiben sollte.

Anaxagoras und Demokrit waren nahe daran, sich die Erde als Himmelskörper mit den gleichen Maßen wie Sonne und Mond vorzustellen. Die Lehre dieser Philosophen hätte durch Beobachtungen und Berechnungen fundiert werden und so zur Bildung richtiger Ansichten von der Struktur des Weltalls und der Lage der Erde in ihm führen können, aber Anaxagoras und Demokrit verfügten nicht über solche Beweise. Ihre Lehre, die dem Stand der Wissenschaft damals weit voraus war, stimmte nicht mit den allgemein angenommenen mechanischen und physikalischen Begriffen überein. Deshalb suchten die Gelehrten die Bewegung der Himmelskörper mit den Mitteln der Physik jener Zeit zu erklären. Zunächst benötigte man eine Erklärung für die tägliche Bewegung der Himmelskörper, die im Osten auf- und im Westen untergingen, am nördlichen Teil des Himmels jedoch um den „Pol der Welt“ kreisten, ohne am Horizont unterzugehen.

Die Gelehrten dieser Epoche konnten sich noch nicht die kreisförmigen Bewegungen eines freien Körpers im Raum vorstellen. Darum schrieben schon die älteren Philosophen dem Himmelsgewölbe selbst eine materielle Natur zu und hielten seine Innenfläche für eine harte, durchsichtige – kristalline – Sphäre, an der die Himmelskörper befestigt zu sein schienen. In das Zentrum dieser Sphäre setzten sie die von allen Seiten im Raum isolierte Erde.

Wir haben bereits gesehen, wie hierbei das schwer lösbare Problem des „Gleichgewichts“ der Erde auftauchte. Aristoteles beseitigte diese Schwierigkeit anders; er verwarf den Begriff des „Unten“ im Weltall. Er stellte die neue These auf, daß die Körper zum Mittelpunkt des sphärischen Weltalls fallen, in dem unweigerlich als schwerer Körper die Erde ruhen müsse.

Diese Auffassung, der man ihre formale Folgerichtigkeit nicht absprechen kann, hat viele Jahrhunderte hindurch die geozentrische Anschauung gefestigt. Die Erde nahm einen zentralen Platz im Weltall ein, und zwar nicht nur angesichts der zu beobachtenden täglichen Bewegung der Sonne, des Mondes und der Sterne, sondern auch als schwerster der Körper, die zum Mittelpunkt der Sternensphäre streben. Die Annahme, daß die Erde sich nicht bewege, stellte die Gelehrten jedoch vor die äußerst schwierige Aufgabe, den Mechanismus der täglichen Bewegung der Himmelskörper sowie auch der jährlichen Bewegung der Sonne und des „Wandelns“ der Planeten inmitten der Sterne aufzudecken.

Die Sonne, die an der täglichen Umdrehung des Himmels teilnimmt, bewegt sich gleichzeitig inmitten der Sterne und beschreibt im Laufe des Jahres einen ganzen Kreis. Die Planeten durchlaufen nicht nur zu verschiedenen Zeiten einen vollen Kreis, sondern jeder von ihnen beschreibt im Laufe eines Jahres eine „Schleife“, wobei er zuerst seine Bewegungen verlangsamt, sich dann in der entgegengesetzten Richtung bewegt und schließlich wieder mit verstärkter Geschwindigkeit die Bewegung in der früheren Richtung aufnimmt.

Die griechischen Gelehrten erwiesen sich als kühne Denker, wenn sie es ablehnten, die verworrenen Bewegungen der Planeten als real anzusehen, zumal sie die beobachteten Bewegungen der Himmelskörper im Lichte der mechanischen Vorstellungen jener Zeit erklären mußten, nach denen die Himmelskörper nur regelmäßige kreisförmige Bewegungen vollführen konnten.

Diese Voraussetzung beruhte auf der Beobachtung, daß die Sterne regelmäßige tägliche Bewegungen zeigten. Wenn man sie aber der Mechanik zugrunde legte, mußte man ihr auch die unregelmäßigen Jahresbewegungen der Planeten unterordnen.

Die Aufgabe, die Bewegungen der Sonne, des Mondes und der Planeten unter der Voraussetzung einer regelmäßigen, kreisförmigen Bewegung zu erklären, wurde von Eudoxos von Knidos (409–356 v. u. Z.) gelöst. Eudoxos richtete zum erstenmal ein Observatorium ein, auf dem er mit Hilfe von Winkelmeßgeräten systematische Beobachtungen anstellte. Leider sind uns über die Ergebnisse dieser Beobachtungen und die Instrumente seines Observatoriums keine Nachrichten überliefert worden.

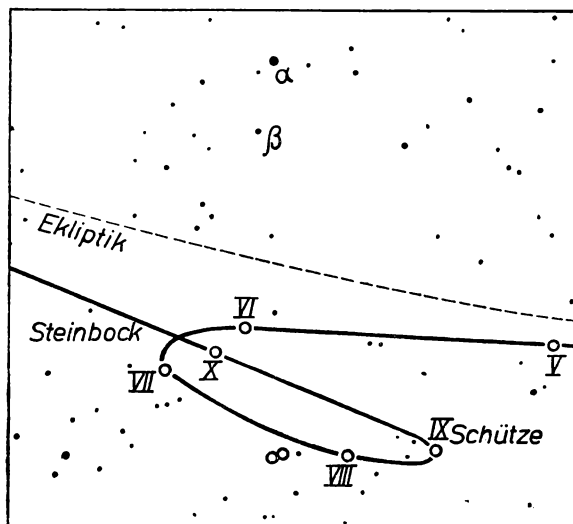


Abb. 4
Schleifenbewegung
des Mars
im Jahre 1939

Zur Erklärung der sichtbaren Bewegungen der Himmelskörper schuf Eudoxos ein scharfsinnig erdachtes Modell aus ineinandergelegten konzentrischen Sphären, die sich gleichmäßig um Achsen von verschiedener Richtung drehten. Durch diesen Mechanismus konnte man ungefähr die beobachtete Bewegung der Sonne, des Mondes und der Planeten inmitten der Sterne und die tägliche Umdrehung des Himmels, vollkommen im Einklang mit den mechanischen Vorstellungen jener Zeit, erklären. Nach Eudoxos ist jeder Planet mit vier konzentrischen, einander umfassenden, kreisenden Sphären verbunden. Die Enden der Achse jeder der Sphären stützen sich auf die Wände der ihr außerhalb anliegenden Sphä-

ren. Die Achsen der Sphären sind so gerichtet, daß sich sowohl die jährliche Vorwärtsbewegung des Planeten zwischen den Sternen vom Westen nach Osten als auch die Veränderung der Länge und der Breite infolge der Schleifenbewegung daraus erklärt, daß die Planeten sich um diese Achsen bewegen.

Im ganzen bestand der Mechanismus des Eudoxos, der die tägliche und jährliche Bewegung des Mondes, der Sonne, der Planeten und der Sterne

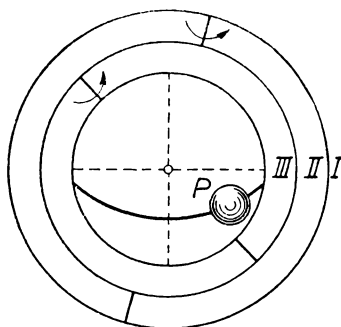


Abb. 5

Schema der Planetenbewegungen
nach Eudoxos

erklärte, aus 26 Sphären. Sein Werk „rettete“, wie sich die griechischen Gelehrten ausdrückten, nicht nur die Erscheinungen des Himmels (d. h. es deutete die zu beobachtenden Bewegungen der Planeten als gleichmäßig und kreisförmig), sondern stützte auch die Lehre von der Unbeweglichkeit der Erde und ihrer zentralen Lage im Weltall.

Aristoteles erkannte dieses „Planetarium“ als Modell des Weltalls an. Seiner Meinung nach kreisen die Sonne und die Planeten um die Erde, die sich – wie schon erwähnt – als „schwerster Körper“ im Mittelpunkt der Welt befindet. Die tatsächlichen Bewegungen der Himmelskörper gehen im allgemeinen viel „richtiger“ – gesetzmäßiger – vor sich als die Bewegungen, die auf der Erde bemerkt werden. Da die Himmelskörper „vollkommener“ als alle anderen Körper sind, „kommt ihnen die richtigste Bewegung“ zu und zugleich die einfachste, die nur kreisförmig sein kann. Das sind die mechanischen Grundlagen der geozentrischen Weltanschauung von Aristoteles. Er erklärte wie Eudoxos die Schleifenbewegungen der Planeten nicht mit Bewegungen der Erde, sondern mit dem sehr komplizierten Mechanismus der kreisenden Sphären.

So war die „Himmelsmechanik“ der alten Griechen aufgebaut, die versuchte, nicht nur die Bewegungen der Himmelskörper als solche zu erklären, sondern auch die „Kraft“ – das Kreisen der Sphären – zu finden, die die Sonne, den Mond, die Planeten und die Sterne fortreißt, d. h. eine „dynamische“ Erklärung für die Bewegung der Himmelskörper auf der Grundlage der aristotelischen Mechanik zu geben.

Dieses „Modell“ des Weltalls gestattete es nicht, den Stand der Planeten am Himmelsgewölbe im voraus zu berechnen.

Im Gegensatz zu den angeführten kosmologischen Konstruktionen standen die Ansichten einiger anderer Philosophen und Astronomen, die aber im alten Griechenland keine große Verbreitung fanden.

So haben z. B. schon am Ende des 6. und am Anfang des 5. Jahrhunderts v. u. Z. der Pythagoreer Heraklides von Pontos und der Philosoph Ekphantus, die ebenfalls die Erde für den Mittelpunkt des Weltalls hielten, die tägliche Bewegung der Himmelskörper durch die Eigenbewegung der Erde erklärt. Aber diese Idee widersprach der unmittelbaren Wahrnehmung und den physikalischen Begriffen jener Zeit. Deshalb konnte sie keine Anerkennung finden.

Die Pythagoreer sollen der Ansicht gewesen sein, daß die Erde, die Sonne und die Planeten um ein „zentrales Feuer“ kreisten. Diese Meinung war Aristoteles bekannt. Zur Verteidigung seiner Ansicht, daß die Erde sich nicht bewege, wies er darauf hin, daß ihre jährliche Bewegung unbedingt von scheinbaren Verschiebungen der Sterne begleitet sein müßte, die für den Beobachter, dessen Standort sich zugleich mit der sich bewegendem Erde verändert, nicht unbemerkt bleiben könnten.

Dieses Argument, das Aristoteles als Beweis für die Unbeweglichkeit der Erde anführte, konnte nicht nur damals, sondern auch viele Jahrhunderte später nicht widerlegt werden, denn die ungeheuer großen Entfernungen der Sterne verhinderten es, daß man ihre scheinbaren, durch die Bewegung der Erde hervorgerufenen Verschiebungen erkannte.

Auf diese Weise wurde Aristoteles' Lehre von der unbeweglichen Erde, die im Mittelpunkt des Weltalls ruht, für viele Jahrhunderte zur herrschenden Anschauung. Aber bereits im 3. Jahrhundert v. u. Z. nahm der alexandrinische Gelehrte Aristarchos von Samos die Entdeckung des Kopernikus um

1800 Jahre vorweg, indem er die geniale Vermutung aussprach, daß sich die Erde gleich den Planeten um die Sonne dreht, die also der Mittelpunkt der Welt ist.

Die astronomischen Werke des Aristarchos sind nicht erhalten geblieben. Von seinen Anschauungen weiß man nur durch andere Gelehrte, die sie erwähnen, insbesondere durch den großen Mathematiker Archimedes (287 bis 212 v. u. Z.). Daher ist schwer zu sagen, welche Beweise Aristarchos zugunsten seiner Meinung anführte. Aber es läßt sich denken, daß sein Hauptargument die von ihm zum erstenmal bestimmte Entfernung von der Erde zur Sonne war, auf Grund deren er feststellen konnte, daß die Sonne um viele Male größer ist als die Erde. Diese Messung war der erste Versuch, die Geometrie zur Bestimmung der Entfernung zwischen den Himmelskörpern anzuwenden. Aristarchos bediente sich dabei folgender Methode: Wenn der Mond sich in der Quadratur befindet, bilden die Linien, die die Mittelpunkte der Sonne, der Erde und des Mondes verbinden, ein rechtwinkliges Dreieck mit dem rechten Winkel im Mittelpunkt des Mondes. Die Messung des Winkels zwischen den Sehrichtungen von der Erde zu den Mittelpunkten der Sonne und des Mondes läßt erkennen, um wievielfach die Entfernung bis zur Sonne größer ist als der Radius der Mondbahn.

Die geometrischen Erwägungen des Aristarchos waren richtig, aber er konnte die nötige Genauigkeit in der Winkelmessung nicht erreichen. So glaubte er, daß die Sonne 19mal weiter als der Mond von der Erde entfernt sei, während in Wirklichkeit die Entfernung von der Erde zur Sonne 400mal größer ist als die zum Mond. Jedoch konnte man auch aus dem von Aristarchos erzielten Ergebnis folgern, daß die Sonne wesentlich größer ist als die Erde. Es ergab sich, daß der Radius der Sonne 6- bis 7mal größer als der der Erde und der Rauminhalt der Sonne etwa 200- bis 350mal größer als derjenige der Erde sein müsse.

Nach dem griechischen Historiker Plutarch vermutete Aristarchos, daß die Erde sich nicht nur um die Sonne, sondern auch um ihre eigene Achse drehe. Daraus kann man schließen, daß ihm die Relativität der Bewegungen nicht unbekannt war.

Die Beobachtungserfahrungen zeigen, daß ruhende Gegenstände sich zu bewegen scheinen, wenn der Beobachter sich selbst gleichmäßig bewegt.

Wenn wir uns z. B. auf einem gleichmäßig fahrenden Segelschiff befinden, kann es sein, daß wir seine Bewegung nicht wahrnehmen, da die Vorgänge, die auf ihm stattfinden, nicht beweisen, daß es sich gegenüber der Küste bewegt: Ein Gegenstand, der uns aus der Hand gleitet, fällt senkrecht auf das Deck; wenn wir uns einen Ball zuwerfen, bemerken wir keine seitliche Abweichung. Alle Gegenstände am Ufer jedoch scheinen sich in der entgegengesetzten Richtung fortzubewegen.

Auf die gleiche Weise nimmt der Beobachter, der sich auf der Erde befindet und sich mit ihr fortbewegt, die Bewegungen der fernen Himmelskörper wahr. Die sichtbare tägliche Bewegung der Sonne und der Sterne vom Osten zum Westen, die von den Astronomen des Altertums für eine tatsächliche Bewegung gehalten wurde, ist in Wirklichkeit das Ergebnis der Erdrotation vom Westen nach dem Osten. Es ist sehr wahrscheinlich, daß Aristarchos' Meinung, daß die Erde sich drehe, eben mit der Relativität der Bewegungen begründet wurde.

Aristarchos war nicht der erste Gelehrte, der behauptete, daß sich die Sterne in unvorstellbar großer Entfernung von uns befänden. Archimedes schrieb: „Aristarchos denkt, daß die unbeweglichen Sterne und die Sonne ihren Platz im Raum nicht wechseln, daß sich die Erde in einem Kreis bewegt, in dessen Mittelpunkt sich die Sonne befindet, daß der Mittelpunkt der Kugel der unbeweglichen Sterne mit dem Mittelpunkt der Sonne zusammenfällt und daß diese Kugel so groß ist, daß der Kreis, den nach seiner Vermutung die Erde beschreibt, zur Entfernung der unbeweglichen Sterne in demselben Verhältnis steht wie der Mittelpunkt der Kugel zu ihrer Oberfläche.“ Aristarchos behauptete also, die Erdbahn bilde einen Punkt im Vergleich zu der Entfernung bis zu den Sternen. Daher konnte er die scheinbaren („parallaktischen“) Verschiebungen der Sterne unberücksichtigt lassen, da er wußte, daß sie eben wegen der weiten Entfernung der Sterne nicht bemerkt werden können.

Aristarchos rief in der antiken Wissenschaft eine Revolution hervor. Er war seiner Zeit um viele Jahrhunderte voraus. Seine Zeitgenossen blieben Anhänger des Aristoteles, der an der Unbeweglichkeit der Erde und ihrer zentralen Lage im Weltall festhielt. Die Lehre des Aristarchos widersprach gleichzeitig der Religion der alten Griechen, für die die Erde der unverrück-

bare Mittelpunkt der Welt war. Aristarchos war wegen seiner Lehre Verfolgungen ausgesetzt, ähnlich wie 18 Jahrhunderte später die Anhänger von Kopernikus.

Im 3. Jahrhundert v. u. Z. begann in Rom die Entwicklung des wissenschaftlichen und philosophischen Denkens. Zunächst übernahmen die Römer die wissenschaftlichen Kenntnisse von den Griechen und ahmten wie in der Literatur die hellenischen Vorbilder nach. Die Entwicklung der nationalen römischen Kultur begann mit dem Wachsen der Macht des Römischen Reiches. Rom verwandelte sich allmählich zu einem neuen Zentrum der Kultur des Mittelmeergebietes. Seit dem 2. Jahrhundert entstanden dort Schulen, an denen ursprünglich Griechen als Lehrer wirkten. In diesen Schulen wurde griechische Philosophie gelehrt, und so lernten die Römer die Anschauungen der griechischen Gelehrten und Philosophen von der Natur kennen. Auch große römische Gelehrte und Philosophen traten hervor, die sich für kosmologische Probleme interessierten. Der materialistische Philosoph und Dichter Lucretius Carus (98–55 v. u. Z.) erklärte z. B. in seinem Lehrgedicht „Über die Natur der Dinge“ die Ursache des „Gleichgewichts“ der Erde im Raum:

„Um in der Mitte zu ruhen der Welt, muß unsere Erde
an Gewicht sich mindern und etwas verlieren,
von andrer Natur von unten umgeben, in diese,
die von der frühesten Zeit mit den luftigen Teilen des Weltraums
innig vereint schon war, fest eingepflanzt nun leben.
Und so drückt sie mit Last die unten befindliche Luft nicht . . .“

Später, zu Beginn unserer Zeitrechnung, sucht der Geograph Strabo, ein gebürtiger Grieche, in seiner „Geographie“ die Kugelform der Erde dadurch zu beweisen, daß „nur die Krümmung des Meeres die Seefahrer hindert, in der Ferne das Licht zu unterscheiden, das sich in gewöhnlicher Augenhöhe befindet, und daß es genügt, dieses Licht nur etwas höher zu heben, damit es auch auf große Entfernung hin sichtbar ist, ebenso wie das Auge nur von einer großen Höhe zu sehen braucht, um das zu entdecken, was ihm früher verborgen blieb.“

Der römische Gelehrte Plinius (23–79), der Verfasser einer vielbändigen

„Naturgeschichte“, glaubte nicht nur an die Kugelform der Erde, sondern vermutete auch die Existenz von „Antipoden“, Bewohnern der gegenüberliegenden Seite der Erdkugel.

„Die Wissenschaft und die Meinung der Masse“, schrieb er, „befinden sich im äußersten Widerspruch. Der Wissenschaft zufolge ist die Erde ringsum von Menschen besiedelt, die daher mit den Füßen zueinander gerichtet sind und alle genauso das Himmelsgewölbe über sich haben. Aber nach Meinung der anderen taucht die Frage auf, warum die Antipoden nicht fallen. Mit dem gleichen Recht könnte man fragen, warum sie sich nicht wundern, daß auch wir nicht fallen.“

Die von Plinius geäußerte Meinung über die Antipoden wurde wahrscheinlich von vielen seiner Zeitgenossen geteilt; die Lehre von der Kugelform der Erde aber war damals schon Gemeingut aller gebildeten Menschen.

Die Vorstellung vom Weltall, die in der römischen Wissenschaft herrschte und sich bis ins Mittelalter erhalten hat, gab der Schriftsteller und Politiker Cicero (106–43 v. u. Z.) eindrucksvoll mit folgenden Worten wieder: „Das Weltall besteht aus neun Kreisen oder besser aus neun Sphären, die sich ineinander drehen. Die äußere Sphäre ist die Himmelssphäre, von der alle anderen umfungen werden und in der die Sterne befestigt sind. Unter ihr rollen sieben Globen, die von einer Bewegung fortgerissen werden, die der Bewegung der Himmelssphäre entgegengesetzt ist. Im ersten Kreis rollt der Stern, den die Menschen Saturn nennen; auf dem zweiten strahlt Jupiter, der den Menschen als wohltätiges und gnadenreiches Licht gilt, danach kommt Mars, der glänzt und Schrecken und Furcht erweckt; weiter unten, inmitten des Weltalls, rollt die Sonne, das Haupt, der Herrscher, der Führer der übrigen Himmelslichter, die Seele der Welt, eine ungeheure Kugel, die erwärmt und ihr Licht über das ganze Weltall verbreitet. Der Sonne nach, gleich zwei Begleitern, schreiten Venus und Merkur. Die unterste Bahn endlich nimmt der Mond ein, der sein Licht von der Tagesleuchte nimmt. Unter diesem letzten Himmelskreis ist alles sterblich und vergänglich... Über dem Mond ist alles ewig. Unsere Erde, die sich im Mittelpunkt der Welt befindet und vom Himmel von allen Seiten getrennt ist, bildet die neunte Sphäre. Sie ist unbeweglich, und alle schweren Körper streben zu ihr.“

Man nahm dabei an, daß die sich drehenden Sphären aus einer kristallinen Materie bestanden. Zur Erklärung ihrer Bewegung wurde die Existenz eines besonderen „Bewegungsprinzips“ vermutet. Einen materiellen Charakter sollten auch die Achsen haben, um die diese Sphären kreisen. Der römische Architekt Vitruvius hat sogar ein Stützzapfenlager der Himmels-sphäre konstruiert.

Einige römische Gelehrte zweifelten jedoch schon an der physikalischen Realität der Himmelssphären und daran, daß man die tägliche Bewegung der Sterne mit dem Kreisen der Sphären erklären könne. So sagte z. B. der römische Philosoph Seneca (1. Jahrhundert u. Z.), es müsse untersucht werden, „ob die Welt sich dreht und die Erde unbeweglich bleibt, oder ob die Erde sich dreht und die Welt im Ruhestand bleibt. Es gibt Menschen, die behaupten, daß die Natur der Dinge uns trägt, ohne daß wir es wissen; daß der Auf- und Untergang der Himmelslichter nicht von der Bewegung des Himmels herrührt, sondern daher, daß wir selbst gegenüber der Position der Sterne am Himmelsgewölbe bald auf- und bald untergehen.“

Aus diesen Worten spricht die Einsicht in die Relativität der Bewegungen, die der Hypothese von Aristarchos zugrunde lag.

Es könnte scheinen, als ob bereits alle Voraussetzungen vorhanden gewesen wären, um die Ideen dieses großen antiken Gelehrten, der die Entdeckung des Kopernikus vorweggenommen hatte, im Bewußtsein der Menschen zu festigen. Aber der Entwicklungsgang der Wissenschaft war schwer. Es konnte noch kein echtes wissenschaftliches Verständnis der Natur aufkommen. Die Menschheit blieb im Bann falscher physikalischer und mechanischer Vorstellungen, mit denen die Lehre von der Bewegung der Erde unvereinbar war.

Wie schon erwähnt, waren die Sphären von Eudoxos und Aristoteles, die als „homozentrisch“ bezeichnet wurden, d. h. als Sphären, die mit der Erde, dem Wohnsitz der Menschen, einen „gemeinsamen Mittelpunkt“ haben, ein schematisches Gebilde, das keinerlei Möglichkeit gab, praktische Aufgaben zu lösen, d. h. astronomische Tabellen, die für die Seefahrt unbedingt erforderlich sind, richtig zu berechnen. Die kreisenden Sphären erklärten nicht die Unregelmäßigkeiten oder „Ungleichheiten“ in den Bewegungen der Sonne, des Mondes und der Planeten, die von den Astronomen bemerkt

worden waren. So war z. B. bekannt, daß sich die Sonne inmitten der Sterne im Winter etwas schneller bewegt als im Sommer. Die Hälfte ihres jährlichen Weges von der herbstlichen Tagundnachtgleiche an legt sie um einige Tage schneller als den restlichen Teil zurück. In den Bewegungen des Mondes und der Planeten wurden noch wesentlich größere „Ungleichheiten“ entdeckt.

Es war unbedingt notwendig, ein Schema der Bewegungen der Himmelskörper auszuarbeiten, das alle bemerkten „Ungleichheiten“ zufriedenstellend erklären konnte. Diesem Verlangen kam in der ersten Hälfte des 2. Jahrhunderts u. Z. der Astronom Claudius Ptolemäus (70–147) aus Alexandria nach. Ptolemäus lehnte die rotierenden Sphären des Eudoxos und Aristoteles ab und ersetzte sie durch ein sehr kompliziertes System von Kreisen, auf denen die Himmelskörper regelmäßig umlaufen sollten. Ptolemäus nahm an, daß die Planeten um einen außerhalb der Erde im Raum liegenden Mittelpunkt kreisen. Dieser Punkt ruhe nicht, sondern umkreise seinerseits die Erde.

Aber diese Vorstellung stimmte nicht mehr mit der Mechanik der alten Griechen überein, nach der alle Himmelskörper um materielle Körper kreisten. Darum hielt man das System von Ptolemäus nur für ein künstliches geometrisches Schema.

Ptolemäus hat sein System in einem umfangreichen Werk *μεγάλη συντάξις* = „Die große Zusammenstellung“ dargelegt, das später von den Arabern unter dem Titel „Almagest“ übersetzt wurde. Er erkannte selbst, daß sein Schema der Bewegungen der Himmelskörper künstlich konstruiert war, und sagte: „Es ist unmöglich oder zumindest äußerst schwer, die Prinzipien zu finden, und man braucht sich nicht über die große Zahl der von uns eingeführten Kreise zu wundern, wenn man die Unregelmäßigkeiten in der Bewegung der Himmelskörper berücksichtigt, die man aber gleichwohl durch richtige und kreisförmige Bewegungen erklären kann.“

Die Hypothese des Aristarchos von Samos war Ptolemäus bekannt; er sah ein, daß man das Bild der Bewegung der Himmelskörper vereinfachen könne, wenn man annimmt, daß sich die Erde selbst um die Sonne dreht und daß man deren tägliche Bewegung durch das Rotieren der Erde erklären könne. Der Stand der mechanischen Kenntnisse jener Zeit hinderte

ihn jedoch, diese Hypothese zu übernehmen, die bereits vier Jahrhunderte früher entwickelt worden war. Ptolemäus sagte darüber folgendes:

„Es gibt Menschen, die behaupten, daß der Himmel unbeweglich sei, die Erde sich aber um ihre eigene Achse vom Westen nach Osten drehe und daß sie diese Umdrehung alle 24 Stunden vollziehe. In der Tat, wenn man von den Himmelskörpern spricht, hindert uns nichts, dies der größeren Einfachheit halber anzunehmen, wenn man nur die sichtbaren Erscheinungen berücksichtigt.“

Daraus kann man entnehmen, daß Ptolemäus es als Astronom zwar für möglich hielt, daß die Erde rotiere, als Physiker aber dieser Hypothese widersprach und erklärte, daß, wenn die Erde sich drehe, die Vögel, die sich in die Luft erheben, schnell hinter der rotierenden Erdoberfläche zurückbleiben würden und sich kein Körper nach Osten bewegen könne, da die Erde bei ihrem Rotieren seiner Bewegung zuvorkäme. Ptolemäus nahm an, daß sich die schweren Gegenstände von der sich drehenden Erde losreißen würden wie ein Stein bei dem kreisenden Schwung einer Schleuder. Aus ähnlichen physikalischen Erwägungen lehnte Ptolemäus auch den Umlauf der Erde um die Sonne ab.

„Wenn die Erde“ – so schrieb er – „eine gemeinsame Bewegung mit allen anderen schweren Körpern hätte, so würde sie offensichtlich, infolge ihrer Masse, diese Körper überholen, alle Tiere und auch sämtliche übrigen schweren Körper ohne jeden Halt in der Luft lassen und schließlich selbst sehr schnell vom Himmel fallen.“

Die Kosmologie entwickelte sich immer in engem Zusammenhang mit den allgemeinen sozial-ökonomischen Prozessen. In den ersten Jahrhunderten unserer Zeit gingen im gesellschaftlichen Leben des Römischen Reiches große Veränderungen vor sich. Die Produktionsweise der Sklavenhalterordnung geriet in eine tiefe Krise. Es entstanden die Produktionsverhältnisse einer neuen, der feudalen Gesellschaft. Ihre Entwicklung führte im 4. bis 5. Jahrhundert zum Zusammenbruch der Sklavenhaltergesellschaft.

Die Krise der Sklavenhalterordnung wurde durch die revolutionäre Bewegung der Sklaven und der kleinen Pächter, der „Kolonen“, hervorgerufen. Das riesige Römische Imperium wurde durch diese inneren Erschütterungen und den gleichzeitigen Angriff fremder Völker von außen her

geschwächt. Im Jahre 476 brach das Weströmische Reich endgültig zusammen.

Diese Ereignisse führten seit dem 3. Jahrhundert zum Zerfall der römischen Kultur; zu Beginn des 4. Jahrhunderts u. Z. wurde das Christentum zur Staatsreligion des Römischen Reiches; es stand der antiken, „heidnischen“ Wissenschaft feindlich gegenüber. Die gebildeten Vertreter der römischen Gesellschaft sahen die Rettung der antiken Kultur und Philosophie in der Lehre der Neuplatoniker, die auf Aristoteles, Pythagoras und andere griechische Philosophen zurückging. Der Gründer der Schule der Neuplatoniker war der Ägypter Plotin (205–270 u. Z.).

Die Neuplatoniker befaßten sich nicht mit dem Studium der Natur und entwickelten auch keine kosmologischen Theorien. Einige von ihnen, z. B. Proklos (412–485 u. Z.), kehrten in ihren Ansichten über die Natur zur mystischen Weltanschauung der Völker des Alten Orients zurück.

Proklos schrieb ein Werk über die Einwirkung der Himmelskörper auf das Schicksal der Menschen, der Pflanzen und der Tiere. Dabei hielt er den Mond seiner Natur nach für feucht, Saturn für kalt und trocken und Mars für trocken und heiß. Diese „Eigenschaften“ der Planeten übten seiner Meinung nach eine entsprechende Wirkung auf die Erdoberfläche aus.

Die Wissenschaft von der Natur konnte schon in der Philosophie der Neuplatoniker keine Stütze finden, in der christlichen Religion begegnete sie vollends einem mächtigen und unduldsamen Gegner. Mit der Verbreitung des Christentums ist der Verfall vieler hervorragender Denkmäler der antiken Kultur verbunden.

Im Jahre 390 zerstörte ein Haufe christlicher Fanatiker unter Anführung des Erzbischofs Theophilus die berühmte Bibliothek in Alexandria. Im Jahre 415 steinigten die Christen während der Unruhen die Astronomin Hypatia. Aus der Mitte der Christen traten Gegner der Naturwissenschaft wie Lactantius (gest. 340) hervor. Dieser Fürsprecher der Unwissenheit lehnte die Lehre von der Kugelgestalt der Erde mit Argumenten ab, die nur in der voraristotelischen Epoche überzeugend gewesen sein konnten.

„Was soll man aber über die sagen“, schrieb Lactantius, „die glauben, daß es Menschen gibt, die unseren Füßen gegenüberstehen, die Antipoden genannt werden. Was soll man denn dazu sagen? Und wird jemand so dumm

sein, zu glauben, daß es Menschen gibt, bei denen die Füße höher als der Kopf sind, oder daß, was bei uns liegt, bei ihnen hängt? Daß die Früchte und Bäume in umgekehrter Richtung wachsen, der Regen und der Hagel auf die Erde von unten nach oben fallen?“

Einer der Kirchenväter, Augustinus (354–430 u. Z.), erkannte die Kugelgestalt der Erde an, leugnete aber die Möglichkeit von Antipoden mit der Begründung, daß von ihnen in der „Heiligen Schrift“ nichts gesagt sei.

Aber auch unter den Christen entstanden Strömungen, deren Vertreter sich für die antike Wissenschaft interessierten. So gründeten z. B. die Nestorianer in Syrien und in Mesopotamien Schulen, in denen die altgriechische Philosophie gelehrt wurde. Die herrschende christliche Kirche bekämpfte diese Richtung, die sie als Ketzerei betrachtete. Nachdem ihr Gründer Nestorius 431 auf dem ökumenischen Konzil verurteilt worden war, wurden die Schulen, in denen die griechische Wissenschaft blühte, geschlossen. Damals eröffneten die Nestorianer ihre Schule in der Provinz Chusistan, wo sie von den persischen Königen beschützt wurden. Hier übersetzten sie die Werke der griechischen Philosophen in die syrische Sprache.

Das Studium der altgriechischen Philosophie fand ein Ende, als der byzantinische Kaiser Justinian 529 die athenischen philosophischen Schulen schloß und nach der Eroberung Alexandrias durch die Araber 640 die Alexandrinische Akademie aufgelöst wurde.

Die Naturwissenschaft der alten Griechen war unter den Volksmassen nur sehr wenig bekannt. Die Idee der Popularisation war den Gelehrten des Altertums vollkommen fremd; mit dem Ende der Tätigkeit der alexandrinischen Akademie und der athenischen Schulen lag die Wissenschaft in den Folianten der Bibliotheken begraben, die der Zerstörung entgangen waren.

Der Untergang der Sklavenhaltergesellschaft beendete die Geschichte des Altertums und mit ihr auch die Entwicklung der antiken Wissenschaft. Erst später, im Mittelalter, wandte man sich in den von den Arabern eroberten Ländern wieder der antiken Wissenschaft zu, obwohl der Islam, ebenso wie das Christentum, der Naturwissenschaft ablehnend gegenüberstand.

DIE ENTWICKLUNG DER WISSENSCHAFT VON DER ERDE UND DEM HIMMEL BEI DEN ARABERN UND DEN VÖLKERN MITTELASIENS

Im 7. und 8. Jahrhundert spielten die Araber, die aus den Wüsten der arabischen Halbinsel gekommen und Persien, die asiatischen und afrikanischen Besitzungen von Byzanz, einen Teil Mittelasiens, Nordafrika und die Pyrenäenhalbinsel erobert hatten, eine große Rolle in der Geschichte.

Die nomadischen und die sesshaften Araber hatten sich in den ersten Jahrhunderten u. Z. im Zustand der Urgesellschaft befunden; die Zersetzung dieser Gesellschaftsordnung begann noch vor der Entstehung des Islams. Gegen Ende des 6. und zu Beginn des 7. Jahrhunderts bildeten sich bei den Arabern bereits starke wirtschaftliche und soziale Widersprüche heraus. Besonders weit war die Zersetzung der urgesellschaftlichen Verhältnisse in Westarabien fortgeschritten.

Der Islam entstand in diesem Teil Arabiens, als die Araber zur feudalen Ordnung übergingen; allerdings blieb in einigen Gebieten die Sklavenhalterordnung und sogar die Urgesellschaft erhalten. Die Macht über einen bedeutenden Teil Arabiens lag in den Händen des „Gründers“ der neuen Religion, Mohammed.

Nach dem Tode Mohammeds im Jahre 632 wurden die Häupter der mohammedanischen Gemeinde, die Kalifen – „Nachfolger“ oder „Vertreter“ – gleichzeitig auch weltliche Herrscher des geeinten Arabiens. Schon die ersten Kalifen begannen, die benachbarten Länder zu erobern und deren Bevölkerung gewaltsam zum Islam zu bekehren.

Die arabischen Eroberer zerstörten mit Feuer und Schwert die antike Kultur; sie verbrannten die Bibliotheken, zerstörten die Meßapparate der Observatorien und setzten der Tätigkeit wissenschaftlicher Institutionen und Schulen ein Ende. Doch später, im 9. Jahrhundert, übernahmen die Araber die altgriechische und die iranisch-indische Kultur. Auf Befehl der Kalifen von Bagdad wurden viele Werke griechischer Philosophen, Mathematiker

und Astronomen in die arabische Sprache übersetzt. Gleichzeitig übten die Kulturvölker Mittelasiens, des Irans und Indiens einen bedeutenden Einfluß auf die Araber aus.

Einige mohammedanische Kulthandlungen erforderten es, daß man die Richtung zur „heiligen“ Stadt Mekka wenigstens annähernd bestimmen konnte. Die arabischen Kaufleute unternahmen weite Reisen mit Karawanen durch die Wüste und umschifften Afrika auf der Fahrt nach Indien. Die Notwendigkeit, nach den Sternen auf Reisen die Richtung zu bestimmen und die Phasen des Mondes zu verfolgen, veranlaßte die arabischen Gelehrten, den Himmel zu beobachten. Darum begannen sie, sich für die astronomischen Mitteilungen in den Werken der griechischen Gelehrten zu interessieren.

Nachdem sie aus den Büchern von Aristoteles die Lehre von der Kugelgestalt der Erde kennengelernt hatten, versuchten die arabischen Gelehrten ihre Maße zu bestimmen. Im 9. Jahrhundert wurden auf Anordnung des Kalifen al-Mamun zwei Messungen des Meridianbogens vorgenommen, eine auf der Tadmurebene, die andere in der Sindscharwüste in Mesopotamien. In beiden Fällen wählten die Astronomen einen Ausgangspunkt, an dem die Höhe des Polarsternes gemessen wurde. Von diesem Punkt aus ging ein Teil der Expedition nach Norden, der andere nach Süden. Die zurückgelegte Entfernung wurde mit Holzstangen ausgemessen. Als die nördliche Gruppe zu dem Punkt kam, wo die Höhe des Polarsternes sich um 1 Grad vergrößert hatte, und die südliche Gruppe zu dem Ort, wo der Polarstern um genauso viel niedriger stand, machten sie halt. So wurde ein Meridianbogen von 2 Grad gemessen.

Diese Messungen waren nach der Meinung der Geschichtsschreiber genauer als die Messung des Eratosthenes. Die hierbei ermittelte Länge eines Meridiangrades beträgt etwa $56\frac{2}{3}$ arabische Meilen (1 arabische Meile = fast 2 km).

Der hervorragendste arabische Astronom in der zweiten Hälfte des 9. und der ersten Hälfte des 10. Jahrhunderts war der in Kleinasien geborene Mohammed Ibn Dschabil al Battani, der Statthalter des Kalifen in Antiochia war. Er präzierte das ptolemäische System, das er in seinen Grundlagen anerkannte. Später vervollkommnete der arabische Astronom Sarkali

(1029–1087) die Methoden der astronomischen Beobachtungen und verbesserte eines der Winkelmeßinstrumente, die damals in den Observatorien verwendet wurden, das Astrolabium.

In der Kosmologie hielten sich manche arabischen Astronomen an die Anschauungen des Aristoteles, die anderen an die des Ptolemäus. So kam es zu einem Kampf zwischen den Verfechtern zweier geozentrischer Systeme. Der arabische Gelehrte Ibn Roschd, in der Geschichte der Wissenschaft auch unter dem Namen Averroes bekannt (1126–1198), rief dazu auf, das Schema von Ptolemäus als unreal zu verwerfen. In seiner Übersetzung des „Almagest“ schrieb er: „Die Astronomie des Ptolemäus ist wertlos für das, was existiert, aber sie eignet sich dazu, das zu berechnen, was nicht existiert.“

Die arabischen Astronomen legten die Lehre von der Kugelform der Erde in einem großen Werk dar, das im Jahre 1410 in die lateinische Sprache übersetzt wurde und Kolumbus' Entschluß, den Seeweg nach Indien auf der Fahrt über den Atlantik zu suchen, entscheidend mitbestimmte.

Das arabische Reich, das sich auf der Pyrenäenhalbinsel gebildet hatte, das Kalifat von Cordoba, war kulturell und insbesondere auch in der Entwicklung der Wissenschaft seinen westeuropäischen Nachbarn bedeutend überlegen.

Gemeinsam mit den von ihnen unterjochten Völkern schufen die Araber ihre Kultur, die eine Weiterentwicklung der altgriechischen und der iranisch-indischen Kultur war.

Die Völker Mittelasiens und des Irans befreiten sich schon im 9. Jahrhundert von der Araberherrschaft. Dort bildeten sich einige feudale Staaten, an deren Spitze einheimische Dynastien traten. Durch die Befreiung vom fremden Joch kam es in diesen Ländern zu einer Steigerung der Produktivkräfte und einem kulturellen Aufstieg.

In Mawaranachr oder Transoxanien, dem nördlich des Amu Darja gelegenen Teil von Mittelasien, entstand bereits im 10. Jahrhundert die höchste Kultur des gesamten mohammedanischen Asiens. Ein Teil dieses Gebietes, das am Unterlauf des Amu-Darja gelegene Choresm, hat selbst während der arabischen Eroberungen faktisch fast völlig seine Unabhängigkeit bewahrt.

Aus Choresm stammt der bekannteste Mathematiker des 9. Jahrhunderts, Mohammed Ibn-Musa al-Chwarismi, der Verfasser eines grundlegenden Werkes über die Algebra und anderer mathematischer Arbeiten. Der Astronom Abd ul Machmud Chudschandi, der im 10. Jahrhundert am Observatorium in Bagdad arbeitete, stammt aus Chodshent, dem heutigen Lenina-bad. Er erfand den Sextant, ein Instrument zur Sternorthbestimmung, das später in großartiger Weise am Observatorium in Samarkand angewendet wurde.

Obwohl Mawaranachr gegen Ende des 10. und in der ersten Hälfte des 11. Jahrhunderts durch die inneren Kämpfe der Feudalherren verfiel und von den turkmenischen Stämmen der Seldschuken erobert wurde, wahrte es doch seine kulturelle Eigenart und entwickelte sie weiter. Die Wissenschaft der Völker Mittelasiens hat in der Geschichte der Naturwissenschaft eine wesentlich größere Rolle gespielt als die arabische Wissenschaft; diese kam über die von der antiken Wissenschaft und den alten Kulturen von Babylon, Iran und Indien übernommenen Traditionen nicht wesentlich hinaus.

Für die Entwicklung der Vorstellungen von der Erde im Mittelalter sind die Werke des Choresmiers Abu'l-Raichan-al-Biruni und die des Tadshiken Omar Chajjam von größter Bedeutung.

Al-Biruni (973–1048) lebte in Choresm und später in Ghasna. Er erlernte die altindische Sprache, das Sanskrit, und kannte die wissenschaftliche Literatur Indiens sehr gut. Zwei große Werke al-Birunis über Astronomie und Geometrie sind erhalten. Al-Biruni war von der Kugelgestalt der Erde überzeugt. „Wenn die Erde nicht rund wäre“, schrieb er, „würden sich Tag und Nacht im Winter und im Sommer nicht voneinander unterscheiden, und die Bedingungen für die Sichtbarkeit der Planeten und ihrer Bewegungen wären vollkommen andere, als sie in Wirklichkeit sind.“

Diese Meinung al-Birunis wurde auch von anderen mittelasiatischen Gelehrten, z. B. von Kaswini (13. Jahrhundert), geteilt.

Al-Biruni bestimmte mehrfach die Erdmaße, wobei er die Ergebnisse mit denen verglich, die Eratosthenes und nach ihm arabische Astronomen erzielt hatten. Bei diesen Messungen benutzte er das Astrolabium als Winkelmaß. Dabei entdeckte er eine neue Methode, mit der man unmittel-

bar die Größe des Erdradius bestimmen konnte. Er erstieg einen 652 arabische Ellen hohen Berg, von dem aus man den Meereshorizont sah, maß den Winkel, den die Sehrichtung zum Horizont mit der Horizontallinie bildete und berechnete nach diesem Winkel den Erdradius.

Diese Methode gründete sich auf folgende Überlegung: Wenn man den Punkt, an dem sich der Beobachter befindet, und den Punkt des Horizontes, auf den sein Blick gerichtet ist, mit dem Mittelpunkt der Erde verbindet, ergibt sich ein rechtwinkliges Dreieck, dessen eine Kathete gleich dem Erdradius ist, während die Hypotenuse um die Höhe des Berges länger ist als der Erdradius. Der im Mittelpunkt der Erde von der Kathete und der Hypotenuse eingeschlossene Winkel ist gleich dem Winkel zwischen dem auf den Horizont gerichteten Sehstrahl und der Horizontalen.

Wenn man diesen Winkel gemessen hat und die Höhe des Punktes kennt, an dem sich der Beobachter befindet, kann man den Erdradius leicht nach den Regeln der Trigonometrie berechnen.¹

Die Bestimmung der Erdmaße nach dieser Methode konnte nicht sehr genau sein, da der Lichtstrahl, der vom Horizont zum Auge des Beobachters führt, beim Übergang aus einer Luftschicht in die andere eine Ablenkung (Refraktion) erfährt. Infolgedessen erscheint der Horizont etwas höher, als er in Wirklichkeit ist. Al-Biruni erzielte etwa dieselben Ergebnisse wie die Gelehrten, die vor ihm Gradmessungen vornahmen; seine Methode ist jedoch insofern sehr interessant, als sie darauf hinausläuft, daß nur der Winkel zwischen zwei Linien auf der Erde und die Höhe des Standpunktes über dem Meeresspiegel gemessen wird.

¹ Der Winkel zwischen der Horizontalen und dem auf den Horizont gerichteten Sehstrahl sei α . Den gleichen Winkel α schließen auch die vom Erdmittelpunkt O zum Standort A des Beobachters und zum Kimmungspunkt B gezogenen Geraden ein (Winkel sind gleich, wenn ihre Schenkel paarweise aufeinander senkrecht stehen).

Im Dreieck AOB gilt dann:

$$\overline{AB}^2 + \overline{BO}^2 = \overline{AO}^2, \text{ und daraus } AB = \sqrt{\overline{AO}^2 - \overline{BO}^2},$$

$$AB = \sqrt{(R+h)^2 - R^2} = \sqrt{2Rh + h^2}.$$

Da $R \gg h$, kann man ohne erheblichen Fehler schreiben:

$$AB = \sqrt{2Rh}$$

Nun ist aber $AB = R \cdot \operatorname{tga}$, und daher $R \cdot \operatorname{tga} = \sqrt{2Rh}$; daraus ergibt sich der gesuchte Radius:

$$R = \frac{2h}{\operatorname{tg}^2 \alpha}$$

Ohne eine Messung des Meridianbogens kann man nach al-Biruni's Methode die Länge des Erdradius bestimmen, selbst wenn man sich auf einer kleinen Insel befindet. Sogar wenn die Erde, wie die Venus, von einer undurchdringlichen Wolkenschicht bedeckt wäre, könnte man nach dieser Methode die Größe des Erdballs bestimmen, obgleich, wir wiederholen es, diese Bestimmung infolge der Refraktion nicht sehr genau sein kann.

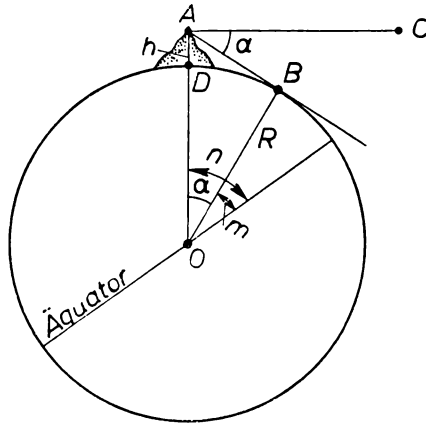


Abb. 6
Messung des Krümmungsradius der Erde nach der Methode von Abu'l-Raichan-al-Biruni

Die von al-Biruni angewandte Vermessungsmethode sowie die Gradmessung des Eratosthenes weisen die Krümmung der Erdoberfläche nach. Wenn man eine Korrektur für die Refraktion einführen würde, könnte man beweisen, daß diese Krümmung überall ziemlich gleich ist; daraus kann man folgern, daß die Erde annähernd Kugelgestalt besitzt.

Al-Biruni war einer der fortgeschrittensten Denker des Mittelalters. Er behauptete, daß wahres Wissen nur durch die Wissenschaft erreicht werden kann. Bereits 500 Jahre vor Kopernikus sprach er von der Rotation der Erde und ihrer Bewegung im Raum.

Der tadshikische Dichter und Astronom Omar Chajjam (1040–1123) entwickelte beachtliche Gedanken über die Unendlichkeit der Welt. Auch er war anscheinend der Meinung, daß die Erde sich im Raum bewegt. Aber dieser Gedanke konnte auch damals noch keine allgemeine Anerkennung finden.

Ein hervorragender usbekischer Astronom war Ulug Beg (1394–1449), ein Herrscher von Sarmarkand. In dieser Stadt, die im 14. und 15. Jahrhundert das bedeutendste Kulturzentrum Mittelasiens war, erbaute Ulug Beg ein ausgezeichnetes Observatorium und rüstete es mit erstklassigen Instrumenten aus. Das größte von ihnen war der gigantische „Sextant Fachri“.

Ulug Beg arbeitete in Sarmarkand mit einer großen Gruppe von Astronomen zusammen, unter denen die hervorragendsten Qadi-zadeh-al-Rumi, Dschemschid ben Mesud ben Mahmud und Ala al-din al Queschdschi waren. Ihre langjährigen Beobachtungen auf dem Observatorium ergaben ein sehr umfangreiches Material, auf Grund dessen Ulug Beg neue Tabellen über die Bewegung der Planeten und einen neuen Sternkatalog zusammenstellte. Es war der erste selbständig erarbeitete Katalog nach dem des alexandrinischen Astronomen Hipparchos. In diesem Katalog waren die Sternörter sehr genau angegeben. Die Tabellen und der Sternkatalog waren in tadshikischer Sprache geschrieben und wurden erst später ins Arabische übersetzt. Die mittelasiatischen Astronomen haben in der Genauigkeit ihrer Beobachtungen alle ihre Vorgänger und Zeitgenossen übertroffen.

Eine größere Genauigkeit erreichte Tycho Brahe – aber erst gegen Ende des 16. Jahrhunderts. Nach dem Tode des von mohammedanischen Fanatikern ermordeten Ulug Beg wurde sein Observatorium vollkommen zerstört. Die Astronomen aus der Schule Ulug Begs arbeiteten danach in anderen orientalischen Ländern. Erst in den letzten Jahrzehnten wurden an der Stelle des Observatoriums von Ulug Beg Ausgrabungen unternommen, durch die man eine klare Vorstellung von dem großartigen Gebäude des Observatoriums und seinen Instrumenten gewinnen konnte.

Die Geschichte der Wissenschaft Indiens, Chinas und Mittelasiens wurde häufig entstellt wiedergegeben, um die Überlegenheit der europäischen Kultur zu zeigen. Dabei wurden die wissenschaftlichen Leistungen der mittelasiatischen Völker oft den Arabern zugeschrieben. Erst sowjetische Gelehrte haben die wissenschaftliche Entwicklung in Asien und besonders die Geschichte der Naturwissenschaft Mittelasiens untersucht.

DIE KOSMOLOGIE IM MITTELALTERLICHEN EUROPA

Im frühen Mittelalter waren die kosmologischen Vorstellungen in Europa sehr primitiv. Sie unterschieden sich stark von den Anschauungen der antiken Gelehrten und Philosophen. Die christlichen Theologen hielten nicht das Studium der Natur, sondern das der „göttlichen Offenbarung“ für notwendig.

Ein Schriftsteller jener Zeit, Vinzent von Beauvais, behauptete in seinem „Spiegel der Geschichte“, daß die „Wissenschaft die unsichtbaren Ursachen der sichtbaren Dinge zum Gegenstand hat. Das Wissen aller Weisheit ist nutzlos, wenn darin nicht das Wissen um Gott ist.“

Der charakteristische Zug der damaligen Weltanschauung war der Anthropozentrismus. Alles in der Welt, die Erde, die Sonne, der Mond und die Sterne, sollte nur für den Menschen geschaffen sein. Der Mensch selbst galt als Mittelpunkt der Welt. Außerdem wurde der Erde, die dem Menschen zum Bewohnen gegeben worden war, ein zentraler Platz im Weltraum zugeschrieben.

Die Kirche billigte die Lehren der antiken Philosophen nicht, da sie den biblischen Vorstellungen widersprachen und die Grundlagen der christlichen Weltanschauung untergruben.

Die christliche Geistlichkeit leugnete hartnäckig die Kugelgestalt der Erde. Es wurden Werke verbreitet, in denen der Aufbau des Weltalls in einer Art dargelegt wurde, die vollkommen mit den biblischen Legenden übereinstimmte. Das bekannteste von ihnen war die „Christliche Topographie des Weltalles“, die Kosmas Indikopleustes im Jahre 535 verfaßte.

Kosmas Indikopleustes („der Indienfahrer“) unternahm als Kaufmann zahlreiche Reisen und wurde dann im Alter Mönch. Er betrachtete aber die Welt mit den Augen eines altägyptischen Bauers, der sein Ackerland nie verlassen hat. Dieser Seefahrer behauptete, daß die Erde genau die Form habe, die ihr von den biblischen Propheten zugeschrieben wird. „Wir werden“, so schrieb er, „mit dem Prophet Jesaja sagen, daß die Form des

Himmels, der das Weltall umspannt, gleich einem Gewölbe ist; mit Hiob übereinstimmen, daß der Himmel mit der Erde vereint wurde, und die Meinung Moses' teilen, daß die Erde länger als breit ist.“

Kosmas Indikopleustes lehnte die Kugelgestalt der Erde ab; berief sich dabei darauf, daß es unmöglich Antipoden geben könne, da sie ja „mit dem Kopf nach unten“ gehen müßten. Seiner Meinung nach ist die Erde – eine rechteckige Scheibe – das Fundament des Weltalls, und ein festes Himmelsgewölbe ist sein Dach. Am Rande der Welt erhebt sich ein Berg, hinter dem abends die Sonne untergeht.

Auf das Buch des Kosmas Indikopleustes beriefen sich die Geistlichen des Mittelalters, wenn sie mit den Gelehrten über die Kugelgestalt der Erde disputierten. Im Mittelalter herrschten unter der Bevölkerung Europas Anschauungen von der Form der Erde, die vor vielen Jahren in den Ländern des Alten Orients anerkannt, aber bereits drei Jahrhunderte vor unserer Zeitrechnung von den griechischen Philosophen widerlegt worden waren. Obwohl Kaiser Karl der Große (747–814) an den Klöstern die ersten Schulen einrichtete und sogar eine gelehrte Gesellschaft zur Pflege mathematischer und astronomischer Kenntnisse in seinem Reich gründete, lag ihm doch vor allem daran, Geistliche auszubilden. Die meisten dieser Schulen wurden nach seinem Tode wieder geschlossen.

In den weiterhin bestehenden Schulen lag der Unterricht in den Händen der Kirche und hatte demzufolge einen vorwiegend religiösen Charakter. Jegliche Abweichungen von den biblischen Anschauungen wurden als Ketzerei bezeichnet und unerbittlich bekämpft. Das kulturelle Niveau der feudalen Gesellschaft blieb auch im 9.–11. Jahrhundert sehr niedrig. Damals gab es in Westeuropa keine exakte Naturwissenschaft, hingegen waren Astrologie, Alchimie und Magie weit verbreitet. Ebenso wie die Priester des Alten Orients sagten die europäischen Astrologen das Schicksal der Menschen, das Wetter und andere Ereignisse nach den Mondphasen und anderen Himmelserscheinungen voraus.

Doch mit der Veränderung der sozial-ökonomischen Bedingungen der feudalen Gesellschaft änderte sich auch die in ihr herrschende Weltanschauung. Im frühen Mittelalter hatte sich die Arbeitsteilung zwischen Stadt und Land noch nicht herangebildet, und auch das Handwerk war noch nicht von der

Landwirtschaft getrennt. Die Naturalwirtschaft der ersten Phase des Feudalismus stellte noch keine technischen Probleme. Um das 11. Jahrhundert wurde der Stillstand in der wirtschaftlichen Entwicklung jedoch durch das Wachsen der Produktivkräfte überwunden, das einen allgemeinen Aufschwung herbeiführte.

Die alten, schon in der Römerzeit gegründeten Städte entwickelten sich weiter und neue entstanden. Gleichzeitig wurde eine neue Gesellschaftsschicht geschaffen – die Bürger, zu denen die Kaufleute und Handwerker gehörten. In den feudalen Städten steigerte sich die Produktion; ihre Bevölkerung vergrößerte sich durch die freien Handwerker und Kaufleute, die sich von der Leibeigenschaft befreit hatten.

Einige Städte, z. B. Venedig und Genua, verwandelten sich in große Handelszentren, die mit den Arabern und durch diese mit Indien und China Handel trieben.

Zu dieser Zeit gab es in Europa bereits viele verarmte Adlige, eine Folge des „Majorats“, d. h. des Erbrechts, nach dem das ganze Vermögen des Feudalherrn auf seinen ältesten Sohn überging. Unter landlosen Edelleuten fanden sich stets Elemente, die zur Teilnahme an Eroberungsfeldzügen bereit waren.

Die von den Feudalherren ausgebeuteten Bauern erhoben sich häufig, und viele träumten von den Ländern des Orients, über die sie von den Wallfahrern, die in Jerusalem gewesen waren, so viel gehört hatten. Dort könnten sie sich, so dachten sie, von dem feudalen Joch befreien, unter dem sie in Europa so sehr litten.

Unter diesen Umständen fanden die Aufrufe zu den Kreuzzügen ein lebhaftes Echo. Sowohl die Kaufleute, die die Handelsbeziehungen mit dem Orient festigen wollten, als auch die katholische Kirche, die bestrebt war, ihren Einfluß auf den Osten auszudehnen, waren daran interessiert. Zur Zeit der Kreuzzüge haben die Europäer die Handelsbeziehungen zum Orient erweitert und zugleich auch kulturelle Errungenschaften von dort übernommen.

Der Aufschwung der Produktivkräfte und die Belebung des Handels setzten die Entwicklung der Naturwissenschaft voraus. Insbesondere waren neue astronomische Tabellen erforderlich, da die auf der Grundlage des

ptolemäischen Systems zusammengestellten immer größere Abweichungen von den Beobachtungen der arabischen und mittelasiatischen Astronomen zeigten. Nachdem ein großer Teil der Pyrenäenhalbinsel, die seit dem Anfang des 8. Jahrhunderts die Araber besetzt hielten, zurückerobert worden war, wirkten dort in dem neu erstandenen Königreich Kastilien auch weiterhin arabische, jüdische und syrische Gelehrte.

Auf Anordnung des Königs Alfons X. von Kastilien stellten sie etwa im Jahre 1252 neue astronomische Tabellen auf, die die alfonsischen oder toledanischen genannt wurden – da sie in Toledo, der Hauptstadt von Kastilien, errechnet wurden – und schrieben, um die Astronomie zu popularisieren, eine astronomische Enzyklopädie in kastilischer Mundart.

Im 12. Jahrhundert entstanden die ersten europäischen Universitäten. Die katholische Kirche wollte die höhere Bildung in ihre Hände nehmen und ihr die für die Kirche wünschenswerte Richtung geben. Der Theologie wurde an den Universitäten der erste Platz eingeräumt. Die Naturwissenschaft war nur die „Dienerin“ der Theologie und wurde nur in dem für die Kirche notwendigen Umfang gelehrt. Die erste Universität, die Theologen ausbildete, entstand in Paris. Etwas früher war die Universität in Bologna gegründet worden, die sehr bald große Berühmtheit erlangte; sie richtete ihr Hauptaugenmerk auf das Rechtsstudium.

An der Spitze der Universitäten Frankreichs und Italiens standen von der Kirche ernannte Kanzler. Auch die Professoren wurden nicht gewählt, sondern von der Kirche ernannt. Etwas später entstanden in der gleichen Art die Universitäten in anderen europäischen Ländern.

Neben den von Kanzlern geleiteten Universitäten wurden in einigen europäischen Staaten königliche Universitäten gegründet, deren Hauptaufgabe die Ausbildung von Staatsbeamten war. Für die Entwicklung der Wissenschaft waren von diesen Universitäten die in Prag (1348 gegründet) und die in Krakau (1364 entstanden) die wichtigsten. An der Krakauer Universität erhielt der Begründer der neuzeitlichen Astronomie, Nikolaus Kopernikus, seine Ausbildung.

Doch auch die königlichen Universitäten standen unter der Kontrolle der katholischen Kirche. Auch in ihren Lehrplänen herrschte die Theologie vor. Andere Wissenschaften, wie Grammatik, Rhetorik, Dialektik, Arithmetik

und Astronomie, wurden im Sinne der Kirche gelehrt. So war die Astronomie nur die Wissenschaft vom Kalender und seiner Berechnung.

Nach einem Beschluß der Kirchenkonzile vom Jahre 1209 und 1215 wurden die Physik und die Mathematik des Aristoteles verboten, da sie das Entstehen von ketzerischen Abweichungen förderten. Erst am Ende des 13. Jahrhunderts wurde an den Universitäten die Darlegung der aristotelischen Philosophie wieder zugelassen, nachdem sie sorgfältig von allem gesäubert worden war, was der Bibel widersprach.

Seit dieser Zeit waren die „verbesserten“ und kommentierten Werke des Aristoteles die einzige erlaubte Quelle für die Naturkenntnisse. Die Universitätswissenschaft, die Scholastik, beschränkte sich auf das Studium der Werke des Aristoteles und einiger anderer Gelehrten des Altertums, zu denen auch Ptolemäus gehörte. Doch das bedeutete keine Rückkehr zur antiken Weltanschauung, sondern es war nur eine Anpassung der altgriechischen Philosophie an die christliche Theologie. Wie W.I. Lenin sagte, hat das „Pfaffentum in Aristoteles das Lebendige erschlagen und das Tote verewigt“.

Das „Lebendige“ in der Lehre des Aristoteles war das Studium der Natur, die Versicherung, daß man sie ergründen könne. Die Kirche aber benützte die idealistischen Elemente seiner Philosophie und verwandelte sie in Waffen für den Kampf gegen die wissenschaftliche Naturforschung.

Auf welche Weise sich im Bewußtsein des mittelalterlichen Menschen die religiöse Weltanschauung mit der Kosmologie des Aristoteles vereinte, davon gibt die „Göttliche Komödie“ des großen italienischen Dichters Dante (1265–1321) eine lebhafteste Vorstellung. In dieser Dichtung wird erzählt, wie Dante auf seinem Weg ins Paradies an einem Kreis nach dem anderen – den Sphären des Aristoteles – vorüberkommt, um die sich die Planeten drehen, und den Wohnort Gottes, der Engel und der Seelen der Gerechten erreicht. An Stelle des Bewegungsprinzips von Aristoteles werden die Planeten durch Engel, die ihnen beigegeben sind, in Bewegung gesetzt.

Die Entwicklung der kosmologischen Anschauungen verlief im größten osteuropäischen Reich, der Kiewer Rus, unter günstigeren Bedingungen als im Westen. Die Kiewer Rus wurde im 9. Jahrhundert gegründet, als Fürst

Oleg die meisten der slawischen Stämme unter seiner Herrschaft vereint hatte. Die Kiewer Rus schuf sich eine eigenständige Kultur, höher entwickelt als die westeuropäische jener Zeit.

Die antike Kosmologie wurde hier bereits im 11. und 12. Jahrhundert durch den „Schestodnew“ (Hexaneron) des Johann Exarch, die „Quelle der Erkenntnis“ des Johannes Damascenus, die Chronik von Georgios Hamartolos und durch andere Quellen bekannt.

Die gebildeten Leute in der Kiewer Rus waren mit der antiken Literatur vertraut, die in Westeuropa damals noch nicht wieder bekannt war.

In Westeuropa wurde die wissenschaftliche Forschung durch die Auslegung der von der Kirche gutgeheißenen philosophischen Thesen des Aristoteles ersetzt. Es wurden öffentliche Diskussionen über die Natur der Engel, über ihre Verdauung und über ähnlichen Unsinn geführt. Die Scholastiker hielten die von ihnen festgelegten abstrakten Begriffe von den Naturerscheinungen für wahr und leugneten die Möglichkeit, die Natur auf dem Wege der Beobachtung und des Experiments zu erkennen. Das war die herrschende Weltanschauung bis zur Mitte des 14. Jahrhunderts. Sie forderte die scharfe Kritik der fortschrittlichen Menschen heraus, die der Ansicht waren, daß die Erforschung der Wahrheit Sache der Wissenschaft und nicht der Religion sei.

Solch ein fortschrittlicher Mensch und Kündler einer neuen Wissenschaft war Roger Bacon (1214–1294). Er befaßte sich mit astronomischen Beobachtungen und alchimistischen Versuchen und erfand auch einige Mechanismen; doch wurde er nicht dadurch berühmt. Seine Bedeutung liegt in der Behauptung, daß die Natur durch Beobachtungen und Experimente erkannt werden kann. Er hielt die Beherrschung der Naturkräfte für die grundlegende Aufgabe der Wissenschaft. Gleichzeitig verurteilte Bacon den blinden Glauben an die Autorität der Kirchenväter.

Im 14. Jahrhundert traten dann noch andere Gelehrte hervor – der bedeutendste von ihnen war Wilhelm von Occam (1270–1347) –, die behaupteten, daß die durch Vernunft errungene Wahrheit nicht durch die „Heilige Schrift“ widerlegt werden könne, selbst wenn diese ihr widerspricht. Das war einer der ersten Versuche, die Wissenschaft aus den Fesseln der Scholastik zu befreien. Die Kirche verfolgte die Anhänger dieser

philosophischen Richtung. Wilhelm von Occam wurde von der Kirche mit dem Bann belegt.

Die Theologen leugneten auch weiterhin die Erkennbarkeit der Welt. So behauptete z. B. Simplicius in seinem Kommentar zu Aristoteles' „Vom Himmel“, daß die wirklichen Bewegungen der Planeten nicht erkennbar und die sichtbaren illusorisch seien.

Die zentrale Lage der Erde im Weltall und ihre Unbeweglichkeit galt allen mittelalterlichen europäischen Gelehrten als völlig gewiß; davon waren sie ebenso überzeugt wie ehemals die alten Babylonier und Ägypter. Es bereiteten sich damals aber schon die Bedingungen vor, unter denen später die revolutionäre Lehre entstand, die die scheinbar unerschütterlichen Grundpfeiler der herrschenden geozentrischen Vorstellungen stürzte. Im 13. bis 15. Jahrhundert entwickelten sich die Produktivkräfte rasch, neue Produktionsverhältnisse entstanden und mit ihnen eine neue Klasse, das Bürgertum.

Im 15. und am Anfang des 16. Jahrhunderts genügte die theologische Weltanschauung nicht mehr den kaufmännischen und gewerblichen Ansprüchen der Gesellschaft. Es bildete sich eine neue Weltanschauung, die der Scholastik fremd war und sie negierte – der Humanismus. Mit dem Humanismus erwachte das Interesse an der antiken Kultur, Wissenschaft und Kunst. Daher wurde diese Epoche auch die Renaissance genannt (im Sinne einer Wiedergeburt der Wissenschaften und der Künste). Die humanistische Literatur trug einen weltlichen Charakter.

Die erste Eigenart des Humanismus, der von dem aufstrebenden Bürgertum geschaffen wurde, war der Individualismus, der auf allen Gebieten hervortrat. So wird in des italienischen Humanisten Pico della Mirandola (1463–1494) Werk „Von der Menschenwürde“ ein Mensch verherrlicht, der sein Schicksal selbst bestimmt und das Recht auf freie Forschung und auf Zweifel an den allgemein angenommenen oder von der Kirche vorgeschriebenen „Wahrheiten“ beansprucht.

Eine andere Eigenart des Humanismus war, daß er gegenüber dem feudalen Kosmopolitismus das Nationalbewußtsein weckte. F. Engels schrieb: „Das Königtum, sich stützend auf die Städtebürger, brach die Macht des Feudaladels und begründete die großen, wesentlich auf Nationalität basier-

ten Monarchien, in denen die modernen europäischen Nationen und die moderne bürgerliche Gesellschaft zur Entwicklung kamen . . .“¹

Die dritte Eigenart des Humanismus schließlich war das Interesse an der experimentellen Wissenschaft, das auf den Bedürfnissen der frühkapitalistischen Produktion beruhte.

Jetzt kamen Zweifel an der Richtigkeit der geographischen Angaben in den Werken des Ptolemäus und anderer antiker Geographen auf. Die Reisenden wandten sich der Erforschung ferner Länder und der Entdeckung neuer Seewege zu.

Die Wißbegier trieb die Menschen zum Studium der alten Autoren, zur Untersuchung alter Archive und veranlaßte sie, nach alten Landkarten und Instrumenten zu forschen.

Um die Mitte des 15. Jahrhunderts verbreitete sich der Humanismus von Italien nach Frankreich, England, Deutschland und anderen Ländern; er erhielt jedoch in ihnen eine andere Ausprägung.

In Italien wirkte der Humanismus am stärksten auf Kunst und Literatur, die eine nie dagewesene Blütezeit erlebten. Die italienischen Humanisten verhielten sich meist der Religion gegenüber neutral; viele von ihnen brachen nicht mit dem Katholizismus. In Deutschland und anderen Ländern richtete sich die Tätigkeit der Humanisten mehr gegen die katholische Kirche. Sie spielten deshalb eine große Rolle in der Reformation, die in Deutschland mit dem Namen Luthers (1483–1546) und in der Schweiz mit dem Calvins (1509–1564) verbunden ist.

Die katholische Kirche wehrte sich erbittert gegen die Ausbreitung des Protestantismus. Ihre Hauptwaffe in diesem Kampf wurde der 1534 gegründete Jesuitenorden. Die Mitglieder dieses Ordens drangen in alle Gesellschaftsschichten ein und bemächtigten sich der Schulen und Universitäten. Sie arbeiteten nach dem zynischen Leitsatz „Der Zweck heiligt die Mittel“.

Trotz aller Hindernisse bestanden zu dieser Zeit schon die Voraussetzungen für die Schaffung eines neuen kosmologischen Systems, das an die Stelle der überlebten geozentrischen Anschauungen trat.

¹ Fr. Engels, Dialektik der Natur, Berlin 1955, S. 7.

DIE GROSSEN GEOGRAPHISCHEN ENTDECKUNGEN

Den stärksten Anstoß zur Entwicklung der kosmologischen Weltanschauung des Mittelalters gaben die geographischen Entdeckungen gegen Ende des 15. und zu Beginn des 16. Jahrhunderts.

Jahrhundertlang wurde der Handel mit Indien und China von arabischen Kaufleuten mit Karawanen betrieben. Die Araber verkauften die indischen und chinesischen Waren acht- bis zehnmal teurer, als ihr Wert im Lande war. Außerdem hemmte die Türkei nach der Eroberung Konstantinopels im Jahre 1453 die Handelsbeziehungen zwischen Westeuropa und den Ländern des Orients auf jegliche Weise.

Die italienischen Kaufleute beklagten sich zwar nicht über die hohen Preise und verkauften die teuren Waren mit großem Gewinn, aber die mit ihnen konkurrierenden Portugiesen und Spanier versuchten, einen Seeweg nach Indien ausfindig zu machen und damit die arabischen Vermittler auszuschalten.

Zu diesem Zweck rüsteten die Portugiesen Expeditionen aus, und schon im Jahre 1434 erreichte der Portugiese Gil Eannes die Küste von Guinea. Durch diese Seefahrten wurde die Meinung der antiken Geographen widerlegt, es sei unmöglich, Afrika zu umschiffen, da in den Tropen das Meer koche, die Segel und die Verschalung des Schiffes anbrennen und der dort hin verschlagene Mensch sofort schwarz, d. h. zum Neger würde.

Die Expeditionen der Portugiesen drangen an der Westküste Afrikas immer weiter nach Süden vor. 1484 landete Diego Cão an der afrikanischen Küste in der Nähe der Kongomündung, und zwei Jahre danach erreichte Bartolomeo Diaz die Südspitze Afrikas, das Kap der Guten Hoffnung. Diese weiten Fahrten wurden durch die Verwendung des Kompaß erleichtert, den die Europäer am Ende des 12. Jahrhunderts von den Arabern übernommen hatten, der aber in China bereits seit langem bekannt war. Einige Schriftsteller schreiben seine Erfindung zu unrecht dem Italiener Flavio

Gioja aus Amalfi zu, der sich aber anscheinend nur um die Einführung des Kompasses und seine Verbesserung bemüht hatte.

Nach den ersten Seereisen der Portugiesen um Afrika erweiterte sich der Gesichtskreis der Europäer. Es stellte sich nun heraus, daß der „Erdkreis“ der mittelalterlichen Geographen nur das Ergebnis ihrer Einbildung und eines zu festen Glaubens an die geographischen Kenntnisse des Ptolemäus und anderer Gelehrter des Altertums gewesen war.

Als sich die Portugiesen von der Unrichtigkeit der Meinung des Aristoteles überzeugt hatten, daß Afrika sich im Süden bis zum Pol erstrecke, beschlossen sie, eine Expedition nach Indien zu schicken, die Afrika umsegeln sollte.

Die weiten Seereisen überzeugten die Menschheit von der Kugelgestalt der Erde. Es tauchte der Gedanke auf, man könne Indien erreichen, wenn man westwärts über den Atlantischen Ozean fahre. Als aber der Genuese Christoph Kolumbus (1446–1506) dieses Projekt dem König von Portugal vorlegte, erhielt er keinerlei Unterstützung von ihm.

Nach 18 Jahren vergeblichen Wartens und Bittens verließ Kolumbus Portugal und beschloß, sein Glück in Spanien zu versuchen. Der katholische Klerus jedoch, der in Spanien sehr einflußreich war, widersetzte sich seinen Plänen. Die Anhänger der Kirche waren überzeugt, daß die Erde eine flache Scheibe sei, an deren Rändern sich der Himmel mit dem Wasser vermengt. Aber selbst wenn die Erde an den Rändern wirklich abgerundet wäre, müßten die Schiffe, so nahmen viele an, dort von der Erde herabstürzen. Schließlich wurde als besonders überzeugender Beweis gegen diese Seereise die Meinung des heiligen Augustinus angeführt, nach der es keine Antipoden geben könne.

Kolumbus wurde von einem Verfechter der Kugelgestalt der Erde, dem betagten italienischen Geographen Paolo Toscanelli, unterstützt, der ihm seine Landkarte mit der Darstellung der rückseitigen Halbkugel schickte, wo sich Indien mit seinen unzähligen Reichtümern befinden mußte. Mit der Karte, die die Ausführbarkeit des Unternehmens zeigte, gab er ihm noch eine eindrucksvolle Beschreibung der Stadt Kinsai, die sich auf der „umgekehrten“ Seite der Erde befand, und der Schätze, die auf der Insel Zipangu – Japan – im Überfluß vorhanden seien. Diese Beschreibung be-

wog die spanische Königin und ihre höfischen Berater noch mehr als die Karte Toscanellis, Kolumbus die erforderlichen Schiffe, Matrosen und Mittel für die Seereise zu geben.

Bei dem Stand der damaligen geographischen und kosmographischen Kenntnisse waren weite Reisen ein gefährliches und gewagtes Abenteuer. Kolumbus unterschied sich von den meisten früheren Seefahrern durch seine gute wissenschaftliche Ausbildung. Er war mit der Handhabung des Astrolabiums und des Quadranten des Astronomen Regiomontanus vertraut, mit dem die geographische Breite bestimmt wurde. Aber die Entdeckung Amerikas im Jahre 1492 war eine der Überraschungen, wie sie den Seefahrern jener Zeit nicht selten widerfuhr. Sie rief in Europa eine ungewöhnliche Begeisterung hervor. Unzählige Abenteurer, Kaufleute und Missionare machten sich in das neue Land auf. Von Hand zu Hand gingen die in italienischer und spanischer Sprache geschriebenen Berichte der Seefahrer, die zu neuen Seefahrten anspornten.

Aber selbst in dieser Zeit, in der der Reisende Amerigo Vespucci die Erforschung des neuen Kontinents in Angriff nahm, der ihm zu Ehren seinen Namen erhalten hat, wurden in Europa immer noch die Arbeiten des Ptolemäus und anderer antiker Gelehrter herausgegeben. Die Scholastiker versuchten zu beweisen, daß die Entdeckung Amerikas insofern eine Bestätigung der Voraussagen des Aristoteles, Ptolemäus und sogar des heiligen Augustinus sei, als dieser Kirchenvater die Frage der Antipoden behandelt habe, wenn er auch freilich ihre Existenz leugnete. So bemühten sich die Scholastiker angesichts unwiderlegbarer Tatsachen ihre Position zu wahren.

Die Erforschung der Erde machte rasche Fortschritte. Núñez de Balboa überquerte den amerikanischen Kontinent an seiner schmalsten Stelle – dem Isthmus von Panama – und erblickte den Stillen Ozean. Die Seefahrer suchten eine Durchfahrt von dem Atlantik nach der anderen Seite des amerikanischen Kontinents. Am hartnäckigsten verfolgte dieses Ziel der Portugiese Fernando Magalhães.

Magalhães wußte, daß auf einer der Karten eine Meerenge angegeben war, die den Atlantischen und den Stillen Ozean verbindet. Er bat den portugiesischen König, eine See-Expedition nach Indien auszurüsten. Dieser Vorschlag wurde sehr ungnädig aufgenommen, da der Portugiese Vasco da

Gama erst vor 20 Jahren einen bequemen Seeweg nach diesem Land entdeckt hatte, der um Afrika führte und den portugiesischen Kaufleuten vollkommen genügte.

Da wandte sich Magalhães an den spanischen Hof. Aber auch der König von Spanien war nicht geneigt, Mittel für den endgültigen Beweis auszugeben, daß die Erde kugelförmig ist. Die Handelsrivalität zwischen Spanien und Portugal, die beide bestrebt waren, die Reichtümer des Orients auszubeuten, bestimmte ihn jedoch, 1519 ein Geschwader unter dem Kommando des Magalhães auf die Suche nach einem neuen Weg nach Indien zu schicken.

Ein aufsehenerregendes Ereignis war es, als 1522 eines der fünf Schiffe von Magalhães' Geschwader, die in westlicher Richtung in den Atlantik gesegelt waren, nun von Osten her, um Afrika herum, heimkehrte. Die übrigen Schiffe waren während der Expedition untergegangen, und auch Magalhães selbst war umgekommen. Diese Tatsache bewies unwiderlegbar, daß das Schiff rund um die Erde gesegelt war. Nach der erfolgreichen Beendigung der ersten Weltumseglung konnte man es als erwiesen betrachten, daß die Erde keine gewölbte Scheibe, sondern kugelförmig ist. Ein erstaunliches Faktum, das zu jener Zeit keine Erklärung fand und danach auch wieder halb vergessen wurde, war es, daß Magalhães' Geschwader auf der Fahrt einen Tag „eingebüßt“ hatte.

Als das Schiff sich auf der Rückfahrt der Küste der Kapverdischen Inseln näherte und man mit den Einwohnern Kontakt aufnahm, stellte sich heraus, daß ihre Zeitrechnung genau um einen Tag differierte. Auf den Inseln war Donnerstag und auf dem Schiff Mittwoch, obwohl das Schiffstagebuch ununterbrochen geführt worden war. Dieser Verlust eines Tages bei der Umschiffung der Erde in westlicher Richtung, der sich aus ihrer Drehung erklärt, war für die Besatzung des Schiffes überaus rätselhaft.

Die Entdeckung Amerikas und des Seewegs um Afrika schuf dem Bürgertum ein neues Betätigungsfeld. Der ostindische und der chinesische Markt, die Kolonisation Amerikas und die Vergrößerung der Warenmenge förderten die Entwicklung des Handels, der Seefahrt und der Industrie.

Die großen geographischen Entdeckungen waren auch für die Entwicklung der kosmologischen Anschauungen in Europa von gewaltiger Bedeutung.

Seit dem Beginn der Weltreisen gewann die Frage nach dem Umfang der Erde praktische Bedeutung. Als Kolumbus seine erste große Entdeckungsfahrt unternahm, glaubte er auf Grund der Karte von Toscanelli, daß die Erdkugel wesentlich kleiner sei, als sie in Wirklichkeit ist, da die Geographen nichts von der Existenz des Stillen Ozeans ahnten, vielmehr annahmen, Europa sei von China, Japan und Indien nur durch den nicht sonderlich breiten Atlantischen Ozean getrennt.

Von der tatsächlichen Größe der Erde konnte man sich auch nach der Fahrtdauer der Schiffe des Magalhães keine richtige Vorstellung bilden. Erwiesen war nur, daß die Erde viel größer ist, als die Geographen vermutet hatten, die von der bereits im Altertum von Eratosthenes vorgenommenen Messung des Meridiangrades nichts mehr wußten.

Es wurde praktisch notwendig, die Größe der Erde festzustellen. Der französische Arzt und Mathematiker Jean Fernel (1497–1558) begann, aus eigener Initiative, sich mit dieser Aufgabe zu befassen. Da er keinerlei Mittel zur Verwirklichung seines Vorhabens bekam, unternahm er die Vermessung der Erde auf eigene Kosten.

1525, drei Jahre nach Abschluß der Magalhãesschen Weltumseglung, fuhr Jean Fernel von Paris im Reisewagen nach dem Norden, wobei er angeblich die Radumdrehungen zählte; vielleicht hatte er aber auch einen automatischen Zähler. So maß Fernel die von ihm zurückgelegte Entfernung. Mittags bestimmte er die Höhe der Sonne und stellte anhand astronomischer Tabellen fest, auf welcher Höhe an diesem Tag die Sonne in Paris stand.

Als er nach Amiens kam, betrug der Unterschied der Sonnenhöhe gegenüber Paris 1° . Da er den Radius des Kutschenrades kannte, bestimmte Fernel die Länge des Grades mit 57070 toises¹. Diese Vermessung eröffnete eine neue Ära in der Erforschung der Form und Größe der Erde.

Bei den damaligen Gradmessungen lag die größte Schwierigkeit in der genauen Bestimmung der Meridianabschnitte in Längenmaßen, da die Länge eines Meridiangrades über 110 km beträgt. Aber bereits zu Beginn des 17. Jahrhunderts entwickelte der holländische Mathematiker und

¹ Da die Toise, ein altes französisches Längenmaß, gleich 1,949 m ist, ergibt sich nach Fernels Berechnung ein Erdumfang von 40042 km. Diese außerordentliche Genauigkeit seiner Berechnung erklärt sich dadurch, daß sich zufällig die Vermessungsfehler aufhoben.

Physiker Snellius (1591–1626) eine Methode, bei der man auf eine Vermessung großer Entfernungen verzichten konnte.

Nach seiner Methode führte Snellius 1615 bis 1617 die Vermessung des Meridianbogens von Alkmaar bis Leiden durch ($1^{\circ} 11' 30''$). Dabei wählte er an den Seiten dieses Meridianbogens Punkte, von denen aus jeweils mehrere andere zu sehen waren. Von diesen Punkten befanden sich zwei an den Enden des zu messenden Bogens. Danach bestimmte er die Winkel, die die Verbindungslinien von jedem Punkt zu zwei anderen bildeten und übertrug alle diese Vermessungsergebnisse auf einen Plan. Der Raum zwischen den Enden des Bogens war jetzt mit 32 Dreiecken bedeckt. Danach maß Snellius die Entfernung zwischen zwei besonders nahen Punkten, die sich auf ebenem Gelände befanden. So erhielt er die Seite eines der Dreiecke (die unmittelbar gemessene Seite eines Dreiecks bei der Vermessung wird Basis genannt).

Jetzt konnte er leicht aus dieser Seite und den Winkeln alle übrigen Seiten der Dreiecke und danach die Diagonalen des aus den Dreiecken gebildeten Vielecks trigonometrisch berechnen. Eine dieser Diagonalen, die die Punkte an den Enden des Bogens verband, war der Meridianbogen selbst.

Die Methode von Snellius, die man Triangulation nennt, wird seit jener Zeit bei allen Gradmessungen angewandt. Die erste Triangulation, die von ihrem Erfinder selbst ausgeführt wurde, war allerdings nicht sehr genau, da ihm hierbei technische und Berechnungsfehler unterliefen, aber nach Vornahme der erforderlichen Korrekturen wurde die Länge des Grades mit 57033 toises berechnet. Snellius erreichte also fast den gleichen Wert wie Fernel.

Die früher so seltenen Gradmessungen wurden jetzt sehr häufig durchgeführt. Bereits 1636 bestimmte der englische Gelehrte R. Norwood (1590 bis 1675) die Länge des Meridianbogens zwischen London und York. Er wählte für die Vermessung ebene Flächen und eine gebrochene Linie, wobei er die Winkel ihrer einzelnen Abschnitte bestimmte, was sehr genau geschehen konnte. Mit dieser Methode erzielte er einen ziemlich genauen Wert der Länge des Meridiangrades (57300 toises), obwohl die Vermessung der ganzen Strecke einfach mit einer Kette vorgenommen wurde.

Angesichts der Unterschiede zwischen den einzelnen Gradmessungen be-

auftragte die französische Akademie der Wissenschaften Jean Picard (1620 bis 1682), eine Gradvermessung für den Meridian von Paris vorzunehmen. In den Jahren 1669 bis 1670 triangulierte Picard eine Strecke bei Amiens. Er benutzte zum erstenmal beim Visieren mit dem Winkelmeßgerät ein Fernrohr, mit dem er sehr genaue Meßresultate erzielte. Insgesamt wurden 35 Dreiecke abgesteckt und eine Basis gemessen.

Nach Picards Angaben hat der Grad des Pariser Meridians eine Länge von 57060 toises. Dieser Wert erwies sich in der Folgezeit als sehr genau; das erklärt sich durch die Anwendung des Sehrohrs bei der Winkelmessung.

Ein Bericht über diese Vermessungsarbeiten wurde 1671 in Picards Arbeit „Das Messen der Erde“ veröffentlicht. Die von Picard errechnete Größe des Erdradius spielte, wie wir später noch sehen werden, in der weiteren Entwicklung der Wissenschaft eine wichtige Rolle.

DIE ENTSTEHUNG DER LEHRE VON DEN BEWEGUNGEN DER ERDE

Die großen Veränderungen in den ökonomischen Verhältnissen beeinflussten auch die kosmologischen Anschauungen.

Die Entdeckung Amerikas und die Weltumsegelungen weckten den Drang, neue Länder zu erforschen und sich dabei zu bereichern. Dieser Unternehmungsgeist ergriff nicht nur die Seefahrer, sondern auch viele Gelehrte.

Der erste Schritt zur Widerlegung der Auffassung, daß die Erde der unbewegliche Mittelpunkt des Weltalls sei, war getan, als man erkannte, daß die Beurteilung einer Bewegung durch einen Beobachter, der selbst auf einem sich bewegenden Körper steht, subjektiv ist.

Die Gelehrten des Altertums wußten das auch; sie hatten aber diese Erkenntnis nicht benutzt, um die sichtbaren Bewegungen außerhalb der Erde zu erklären. Lediglich Aristarchos von Samos machte eine Ausnahme. Im 15. Jahrhundert jedoch nahm der Philosoph Nikolaus von Kues (Krebs), 1401 bis 1464, sie wieder auf. Er lehrte die Relativität der Bewegungen und behauptete, auch die Erde sei ein sich bewegender Körper.

„Jetzt ist es klar“, schrieb er, „daß sich die Erde tatsächlich bewegt, obwohl wir es nicht bemerken, weil wir die Bewegung nur im Vergleich zu etwas Unbeweglichem wahrnehmen können... Wenn jemand nicht wüßte, daß das Wasser fließt und kein Ufer sähe, wie könnte er dann auf einem auf dem Wasser fahrenden Schiff bemerken, daß sich das Schiff vorwärts bewegt? Da es jedem, ob er sich auf der Erde, auf der Sonne oder auf einem anderen Stern befindet, so vorkommen wird, als stehe er auf einem unbeweglichen Mittelpunkt, während sich alles rings um ihn zu bewegen scheint, so wird er, wenn er auf der Sonne, dem Mond oder dem Mars steht, immer auf andere Pole hinweisen.“

Mit diesen Worten behandelt Nikolaus von Kues die Relativität der Bewegung als Philosoph vom Standpunkt der Erkenntnistheorie und nicht als Mathematiker. Wenn er aber Bewegungen der Erde für möglich hielt, die von ihren Bewohnern nicht bemerkt werden, so zeugt diese Behaup-

tung davon, daß die aus dem Altertum übernommenen kosmologischen Vorstellungen veraltet waren.

Die an den Universitäten gelehrt Wissenschaft hielt in der zweiten Hälfte des 15. Jahrhunderts noch immer an der geozentrischen Anschauung fest. Die hervorragenden Astronomen dieser Zeit, Georg Purbach (1423–1461) und sein Schüler Regiomontanus (Johann Müller, 1436–1476), waren überzeugte Anhänger des Ptolemäus. Purbachs „Kurze Darstellung der Astronomie“, die 1473 von Regiomontanus vervollständigt und neu herausgegeben wurde, diente als Lehrbuch des ptolemäischen Systems. Wenn einer der Universitätsprofessoren doch an der damals herrschenden geozentrischen Konzeption zweifelte, hütete er sich, diese Zweifel innerhalb der Universitätsmauern oder gar in Vorlesungen auszusprechen.

Die Kirche überwachte die Wissenschaft sehr sorgfältig, und sie hatte auch genügend Mittel in den Händen, um auf die Professoren einen Druck auszuüben. Es gab jedoch Gelehrte, die an der Richtigkeit der geozentrischen Lehre zweifelten. Zu ihnen gehörte z. B. der polnische Astronom Wojciech z Brudzewa (1445–1497), der im letzten Viertel des 15. Jahrhunderts den Lehrstuhl für Astronomie an der Universität Krakau innehatte. Aber die Professoren waren verpflichtet, das ptolemäische System zu lehren, und Wojciech z Brudzewa hielt Vorlesungen nach dem Lehrbuch von Purbach und Regiomontanus, zu dem er einen Kommentar geschrieben hatte, der 1495 in Mailand herausgegeben wurde.

Um sich von dem ptolemäischen System loszusagen, genügte es nicht, seine Zuverlässigkeit anzuzweifeln; dieses Schema mußte vielmehr durch eine neue Theorie ersetzt werden, die es ermöglichte, die Planetentabellen hinreichend genau zu berechnen.

Vor allem aber mußte die Ablehnung des ptolemäischen Systems das geozentrische Weltbild widerlegen, eine Aufgabe, die eine besondere Tiefe des Denkens und „Geistesfreiheit“ erforderte, wie später der „Gesetzgeber des Himmels“ Kepler äußerte.

Ein revolutionärer Schritt in der Kosmologie war die Lehre des polnischen Denkers Nikolaus Kopernikus (1473–1543), des genialen Schöpfers der neuzeitlichen Astronomie, der die Erde gleichsam aus dem Mittelpunkt des Weltalls in den Weltraum stieß.

Kopernikus stammte aus einer Kaufmannsfamilie. Sein Vater betrieb in Krakau Handelsgeschäfte. Bereits 1460 lebte er in der Stadt Thorn an der Weichsel, die zusammen mit anderen Gebieten an Polen gekommen war. Kopernikus verlor früh seine Eltern und wuchs unter der Obhut seines Onkels Lukas Watzenrode (oder Watzelrode), eines bedeutenden polnischen Staatsmanns, auf. Später wurde Watzenrode Bischof von Ermland, dem nördlichen Teil Polens. Kopernikus besuchte die Kathedralschule von Wloclawek. Nachdem er sie absolviert hatte, studierte er an der Universität Krakau.

Schon als Schüler lernte der spätere Umgestalter der Astronomie diese Wissenschaft kennen und begann, sich für sie zu interessieren. An der Universität in Krakau wollte er die Vorlesungen über Astronomie von Wojciech z Brudzewa hören, aber dieser Professor hatte kurz vor Kopernikus' Immatrikulation seine Vorlesungen eingestellt. Er hatte den Lehrstuhl für Astronomie aufgegeben, weil er für Krakau nicht mehr das „Horoskop“, die astrologische Voraussage des Schicksals der Stadt, aufstellen wollte, was zu den Obliegenheiten der Astronomieprofessoren gehörte.

Wojciech z Brudzewa erteilte jedoch weiterhin für Interessenten Privatunterricht. Auch Kopernikus nahm bei ihm Unterricht und hörte so einen Lehrgang der Astronomie.

An der Krakauer Universität gab es eine Gruppe junger Professoren, die in Italien gewesen und vom Geist des Humanismus durchdrungen waren. Diese jungen Gelehrten besprachen auf Zusammenkünften Fragen der Philosophie, der antiken Geschichte und Literatur. So lernte Kopernikus bereits in seiner Krakauer Studienzeit humanistische Ideen kennen.

1496 fuhr er, um sein Studium fortzusetzen, in die Heimat des Humanismus, nach Italien, wo er die Universität von Bologna besuchte. Hier studierte er praktische Astronomie unter der Leitung des Meisters der Himmelsbeobachtung Domenico di Novara (1454–1504) und wurde mit der Verwendung astronomischer Meßapparate vertraut gemacht.

Sein Studium brachte Kopernikus an der Universität von Padua zum Abschluß. Obwohl Padua ein Bollwerk des Aristotelismus war, drang der Widerhall des Kampfes zwischen den Anhängern des Aristoteles und des

Ptolemäus auch hierher. Wahrscheinlich hat auch Kopernikus selbst mit ihm Nahestehenden die Vorzüge und Mängel dieser Systeme erörtert. Wir wissen beispielsweise, daß ein junger Gelehrter namens Girolamo Fracastoro (1483–1543), ein Anhänger von Eudoxos und Aristoteles, oft mit Kopernikus in Padua zusammenkam. Später schrieb Fracastoro ein großes Werk, die „Homozentrik“, in der er zu dem System der Sphären zurückkehrte, das er noch mehr komplizierte.

Die persönlichen Beziehungen und Gespräche mit den jungen italienischen Gelehrten waren für Kopernikus von großer Bedeutung, denn damals wurde, wie einer seiner Biographen schrieb, „nicht alles gedruckt, was geschrieben, und nicht alles geschrieben, was gedacht wurde“.

In Italien lernte Kopernikus die Ideen von den Bewegungen der Erde kennen. Da er die Werke der antiken Wissenschaft und Philosophie eingehend studiert hatte, kannte Kopernikus auch die unklaren Vorstellungen der Pythagoreer von der Bewegung der Erde, der Planeten und der Sonne um ein „zentrales Feuer“ und die wissenschaftliche Hypothese des Aristarchos von Samos. Davon zeugt die Erwähnung des alexandrinischen Astronomen im Manuskript seines unsterblichen Werkes.

Nach einem fast zehnjährigen, nur vorübergehend unterbrochenen Aufenthalt in Italien ließ sich Kopernikus im Ermland nieder, wo er zum Kanoniker der Kathedrale in Frombork, der Hauptstadt dieses Gebietes, gewählt wurde.

Das Bistum Ermland gehörte zum polnischen Staat. Dem Bischof unterstand nicht nur die geistliche, sondern auch die weltliche Verwaltung. Die Kanoniker der Kathedrale von Frombork waren mit Verwaltungsaufgaben betraut. Kopernikus nahm sehr rege an dem politischen Leben von Ermland teil.

Eine Zeitlang war er Verwalter der kirchlichen Besitztümer. Er hatte einen hervorragenden Anteil an der Verteidigung des Bistums während des Krieges gegen den Deutschen Orden und wurde nach Beendigung des Krieges und nach dem Rückzug der Ordensritter zu den Friedensverhandlungen hinzugezogen.

Trotz seiner vielseitigen gesellschaftlichen Aufgaben führte Kopernikus seine Forschungen über kosmologische Probleme fort. 1515 beendete er

den „Kleinen Kommentar des Nikolaus Kopernikus zu seinen Hypothesen über die Himmelsbewegungen“.

In diesem kleinen Werk legte er bereits die grundlegenden Ideen des heliozentrischen Systems dar. Seine Hauptthesen oder Axiome gegen die geozentrische Weltanschauung formulierte er in folgender Weise:

1. Es gibt keinen einheitlichen Mittelpunkt für alle Himmelskreise und -sphären.
2. Der Mittelpunkt der Erde ist nicht der Mittelpunkt des Weltalls, er ist nur der Schwerpunkt und Mittelpunkt der Mondbahn.
3. Alle Sphären bewegen sich um die Sonne als ihren Mittelpunkt, also ist die Sonne der Mittelpunkt des Weltalls.
4. Das Verhältnis der Entfernung der Erde zur Sonne ist minimal im Vergleich zu der Weite des Weltraums.
5. Was uns am Himmelsgewölbe als Bewegung erscheint, ist nicht die Folge einer Bewegung am Himmel, sondern einer Bewegung der Erde selbst. Die Erde dreht sich mit allem, was sich auf ihrer Oberfläche befindet, einmal am Tag um sich selbst. Dabei bleibt die Lage ihrer beiden Pole unverändert, und das Himmelsgewölbe und die äußeren Himmelsgrenzen bleiben unbeweglich.
6. Was uns als Bewegung der Sonne inmitten der Sterne erscheint, ist nicht die Folge ihrer tatsächlichen Bewegung, sondern hängt von der Bewegung der Erde und ihrer Sphäre ab, mit der wir, wie jeder andere Planet, um die Sonne kreisen. Die Erde hat also nicht nur eine Bewegung.
7. Die uns sichtbaren direkten und indirekten Bewegungen der Planeten rühren nicht von ihren eigenen Bewegungen her, sondern von der Bewegung der Erde. Daher genügen die Bewegungen der Erde, um viele Himmelserscheinungen zu erklären.

Diese Leitsätze übernahm Kopernikus jedoch nicht einfach von den antiken Autoren, vielmehr suchte er sie zu beweisen.

„Es soll niemand denken“, schrieb er im „Kleinen Kommentar“, „daß ich willkürlich mit den Pythagoreern die Bewegung der Erde annehme; in meiner Darlegung (Theorie der Sphären) wird man strenge Beweise finden; denn die grundlegenden Argumente, mit denen die Philosophen die Unbeweglichkeit der Erde beweisen wollten, sind zum großen Teil auf dem

Schein begründet; aber eben diese Argumente entfallen hier, da ich die Unbeweglichkeit der Erde nur als Schein betrachte.“

Durch das erste der Axiome wurde festgestellt, daß der Mond nicht zu den Planeten gehört, deren Bahn die Sonne als Mittelpunkt hat, vielmehr kreist der Mond um die Erde.

In der zweiten These wies Kopernikus darauf hin, daß die Erde als „Schwerpunkt“ dient, d. h. die Ursache dafür ist, daß die Körper auf sie fallen. Später nahm er auch von anderen Himmelskörpern an, daß sie als „Schwerpunkte“ wirkten.

Die dritte These bestätigte die heliozentrische Auffassung und billigte der Erde nur den Charakter eines Planeten zu.

Im vierten Axiom spiegelten sich Elemente der antiken kosmologischen Anschauungen wider. Kopernikus erkennt noch die „Sternensphäre“ an, weist aber auf ihre im Vergleich zur Größe des Sonnensystems unermeßliche Ausdehnung hin.

Das fünfte Axiom stellt die Tatsache der Erdrotation fest, die die tägliche Bewegung des Himmels erklärt.

Im sechsten und siebenten Axiom gibt Kopernikus eine Erklärung für die Bewegung der Sonne und der Planeten innerhalb der Tierkreiszeichen, indem er von der Tatsache des jährlichen Umlaufs der Erde um die Sonne ausgeht.

Bevor noch der „Kleine Kommentar“ in Abschriften Verbreitung fand, war Kopernikus bereits unter den Astronomen bekannt. Darum wurde er auch 1514 von der päpstlichen Kurie zu einem Kirchenkonzil eingeladen, auf dem auch eine Reform des Kalenders beraten werden sollte, den bereits im 1. Jahrhundert v. u. Z. Julius Cäsar eingeführt hatte. Der Julianische Kalender setzte für das Jahr einen etwas zu langen Zeitraum an, und es bestand die Gefahr, daß Ostern im Laufe der Zeit in den Sommer fallen würde. Kopernikus lehnte diese Einladung ab, da er der Meinung war, daß die Bewegung der Sonne innerhalb der Tierkreiszeichen noch nicht genügend erforscht sei.

Die Ideen des Kopernikus drangen auch zu dem Italiener Celio Calcagnini (1479–1540), der 1525 eine kleine Broschüre schrieb „Wie der Himmel unbeweglich ist und die Erde sich dreht, oder von der ewigen Bewegung

der Erde . . .“ Aber diese Broschüre wirkte nicht besonders überzeugend und blieb unbeachtet. Sie wurde erst 1544 herausgegeben, als das große Werk des Kopernikus bereits erschienen war.

In den dreißiger Jahren drang die Kunde von der im „Kleinen Kommentar“ dargelegten Lehre des Kopernikus sogar in Kreise, die keinerlei Beziehung zur Wissenschaft hatten.

Im Jahre 1531 wurde Kopernikus auf der Bühne verspottet. Auch Luther kritisierte ihn scharf. Als er 1533 die kopernikanische Lehre kennenlernte, sagte er: „Man erzählt von einem neuen Astrologen, der beweisen will, daß sich die Erde bewege und nicht der Himmel, die Sonne und der Mond, wie wenn jemand im Wagen oder im Schiff fährt und denkt, daß er am Ort bleibt und daß sich die Erde und die Bäume bewegen . . . Auch wenn die ganze Astrologie umgewälzt ist, glaube ich der Heiligen Schrift, denn Josua ließ die Sonne stillstehen und nicht die Erde.“

Luthers Freund Melanchthon war gleichfalls ein Gegner des kopernikanischen Systems, er führte als Gegenbeweis die sinnliche Wahrnehmung an und rief die weltliche Macht auf, den „sarmatischen Astronomen“ zu zügeln, der die Erde sich bewegen und die Sonne stillstehen lasse.

Es ist für die Kennzeichnung der Verhältnisse, unter denen sich die Lehre des Kopernikus verbreitete, interessant festzustellen, daß Melanchthon, der gebildetste von Luthers Anhängern, an der Wittenberger Universität Vorlesungen über Astrologie hielt, die 1559 in Wittenberg unter dem Titel „Philipp Melanchthons Elemente der Physiklehre“ herausgegeben wurden.

Als Kopernikus noch an seinem Hauptwerk arbeitete, dem die Axiome des „Kleinen Kommentars“ zugrunde lagen, verbreitete sich die Kunde davon bereits unter den jungen Gelehrten.

1539 kam der 25jährige Mathematikprofessor der Wittenberger Universität, Georg Joachim von Lauchen (1514–1576), in der Geschichte der Wissenschaft unter dem Namen Rheticus oder Rhäticus bekannt – da er aus Rhätien gebürtig war –, nach Frombork.

Nachdem er lange Zeit bei Kopernikus gearbeitet und sein System gründlich studiert hatte, veröffentlichte Rheticus 1540 eine kleine Broschüre mit der Darlegung der neuen astronomischen Theorie. Die Broschüre war so populär geschrieben, daß sie einem großen Kreis gebildeter Menschen zu-

gänglich wurde. Besonders aber weckte sie das Interesse der Astronomen und Mathematiker für diese Lehre und bereitete den Boden für das Erscheinen des Hauptwerkes von Kopernikus selbst. Daraufhin beschloß Kopernikus, die gelehrte Welt mit seinem System vertraut zu machen und ließ sein Manuskript veröffentlichen. Sein Werk erschien in Nürnberg unter dem Titel „Die Umdrehung der Himmelskörper“ und trug auf dem Titelblatt den Leitspruch „Niemand trete ein, der die Mathematik nicht kennt“, da es für Gelehrte bestimmt und in lateinischer Sprache geschrieben war.

Der mathematische Teil des Buches war wenigen zugänglich, aber das Pathos seiner ersten Kapitel konnte auch auf die breiten Massen wirken; darin bestand die Gefahr für die geozentrische Weltanschauung. Kopernikus' Lehre von den Bewegungen der Erde war ein Schlag gegen die veraltete Vorstellung von der Welt.

Kopernikus gab sich keinerlei Hoffnungen hin, daß sein Werk von der Kirche und allen Gelehrten seiner Zeit freundlich aufgenommen werde. Er sah voraus, welchen Eindruck seine der „Heiligen Schrift“ widersprechende Ablehnung der Idee von der Unbeweglichkeit der Erde hervorrufen würde. Um seine Hypothese zu rechtfertigen, wies er darauf hin, daß die Menschheit bereits einen Wandel ihrer Anschauungen von der Gestalt der Erde erleben mußte, wenn auch die neuen Ansichten dem unmittelbaren Sinneseindruck widersprachen.

„Wenn es leere Schwätzer geben sollte“, schrieb er, „die, obwohl sie nichts von den mathematischen Wissenschaften verstehen, sich erlauben, mein Unternehmen zu verurteilen oder zu widerlegen, indem sie vorsätzlich irgendeine Stelle der Heiligen Schrift entstellen, so werde ich ihnen gar keine Aufmerksamkeit schenken, sondern solche törichten Urteile verachten; denn es ist nicht unbekannt, daß der berühmte Lactantius, der im übrigen auf dem Gebiet der Mathematik nicht besonders beschlagen war, ziemlich kindliche Vorstellungen von der Gestalt der Erde hatte und diejenigen verspottete, die sie für kugelförmig hielten.“

Mit diesen Worten weist Kopernikus auf die Unzuverlässigkeit der unmittelbaren Sinneswahrnehmung bei der Beurteilung der Gestalt der Erde hin und kommt zu dem Analogieschluß, daß ebenso die Unbeweglichkeit der Erde eine Illusion sein kann.

„Obwohl die Mehrzahl derer, die darüber geschrieben haben, sich einig sind“, sagt Kopernikus im V. Kapitel seines Werkes, „daß die Erde in der Mitte der Welt ruht, und sie die gegenteilige Meinung für Unsinn halten oder sogar lächerlich finden, ergibt sich, wenn man diese Frage einmal aufmerksam untersucht, daß sie bei weitem noch nicht gelöst ist und daß man sie keineswegs unbeachtet lassen darf. Denn jede sichtbare Veränderung der Lage erfolgt wegen der Bewegung des beobachteten Gegenstandes oder des Beobachters oder infolge einer Ortsveränderung – selbstverständlich nicht der gleichen – dieser beiden. Denn bei einer gleichen Bewegung des einen und des anderen, d. h. des beobachteten Gegenstandes und des Beobachters in ein und derselben Richtung kann man die Bewegung nicht wahrnehmen. Die Erde aber ist der Ort, von dem aus wir das Himmelsgewölbe beobachten, von dem aus es sich unseren Augen öffnet. Wenn man daher irgendeine Bewegung der Erde vermutet, wird sie sich unbedingt in den äußeren Teilen des Weltalls zeigen, aber so, als verlief sie in entgegengesetzter Richtung, gleichsam an der Erde vorbei. Das gilt vor allem auch von der täglichen Umdrehung.“

Nachdem er auf diese Weise das Prinzip der Relativität der Bewegungen dargelegt hat, aus dem sich die Möglichkeit scheinbarer Bewegungen der Himmelskörper ergibt, behauptet Kopernikus, daß die tägliche Bewegung der Himmelskörper, die nur die Widerspiegelung der Bewegung der Erde selbst ist, zu der Meinung geführt hat, das ganze Weltall rotiere.

Wie kann man sich aber davon überzeugen, ob sich das ganze Weltall oder die Erde dreht? Auf diese Frage antwortet Kopernikus: „Da der Himmel ein gemeinsamer, alles enthaltender und bergender Behälter ist, so ist keineswegs klar, warum man die Bewegung nicht eher dem Inhalt als dem Behälter, dem Enthaltenen als dem Aufnehmenden zuschreiben soll.“ Er zeigt also die Irrealität und den Widerspruch der Annahme, daß sich das unermessliche Weltall um die kleine Erde drehe.

Noch klarer ist dieser Gedanke später von Kopernikus in den Worten ausgedrückt worden: „Und warum sollen wir noch weiter an der natürlichen und ihrer Form entsprechenden Beweglichkeit der Erde zweifeln, statt daran, daß sich das ganze Weltall bewegt, dessen Grenzen unbekannt und

unerreichbar sind. Und warum sollen wir nicht den Schein der täglichen Umdrehung auf den Himmel beziehen und ihre Realität auf die Erde?“

Kopernikus griff auch zu mechanischen Beweisen seiner Meinung. Er weist das Argument des Ptolemäus, daß die Erde sich bei der Rotation im Raum verstreuen würde, zurück und fragt: „Warum soll man dies nicht in noch größerem Maße vom Weltall vermuten, dessen Bewegung um so viel schneller sein muß, als der Himmel größer als die Erde ist?“

Mit diesen Beweisen widerlegte Kopernikus den Glauben an die Unbeweglichkeit der Erde. Darum sagt er weiter: „Da nichts gegen die Beweglichkeit der Erde spricht, nehme ich an, daß man untersuchen muß, ob ihr auch einige Bewegungen zukommen, nach denen man sie für einen Planeten halten kann“, und er geht zu der Betrachtung astronomischer Beobachtungen über, die eine Bestätigung dafür geben, daß sich die Erde um die Sonne bewegt.

Die Unregelmäßigkeiten in den Bewegungen der Sonne und der Planeten, die sich seiner Meinung nach gleichmäßig und in Kreisen drehen müssen, beweist die Exzentrizität der Erde gegenüber deren Bahnen. Aber da „nicht festgestellt ist, ob die Erde sich ihnen nähert und sich von ihnen entfernt, oder ob sie sich der Erde nähern und sich von ihr entfernen, wird es nicht verwunderlich sein, wenn jemand der Erde außer ihrer täglichen Umdrehung noch irgendeine andere Bewegung zuschreibt“.

So bekräftigt Kopernikus, wiederum auf die Relativität der Bewegungen gestützt, den Umlauf der Erde um die Sonne und nimmt den schleifenförmigen Bahnen der Planeten den Schein des Geheimnisvollen.

Diese „Schleifen“ sind für Kopernikus nur die Widerspiegelung der eigenen Bewegung der Erde.

Nehmen wir an, daß sich die Erde um die Sonne bewegt, erklärt Kopernikus, so werden wir auch in diesem Falle eine scheinbare jährliche Bewegung der Sonne auf der Ekliptik durch die Sternbilder des Tierkreises beobachten. Wenn sich außerdem die Erde um die Sonne dreht und sich innerhalb der Bahnen von Mars, Jupiter und Saturn befindet, bewegen sich diese Planeten zur Zeit der Opposition in größter Erdnähe und müssen strahlender als gewöhnlich sein; während der Konjunktur müssen sie am weitesten von ihr entfernt und weniger hell als gewöhnlich sein, was auch

tatsächlich beobachtet wird. Diese Veränderungen in der Helligkeit werden durch das System des Ptolemäus nicht erklärt.

„Und darum“ – sagt Kopernikus – „werden wir uns nicht schämen, zuzugeben, daß die Bahn des Mondes und der Mittelpunkt der Erde im Laufe des Jahres um die Sonne kreisen, in einem großen Kreis, in dessen Mittelpunkt sich die Sonne befindet.“

Bei dieser Annahme wird es auch begreiflich – wie Kopernikus beweist –, daß beim Mars als dem nächstliegenden Planeten die Schleifen der scheinbaren Bewegung größer sein müssen als bei Jupiter und beim Jupiter wiederum größer als beim noch weiter entfernten Saturn. Die Schleifenbewegungen der Planeten sind von der Erde unter den Winkeln sichtbar, unter denen von diesen Planeten die Bahn der Erde sichtbar ist; diese Winkel sind den Entfernungen dieser Planeten von der Erde annähernd proportional. Auf diese Weise ergab sich eine Möglichkeit, die relativen Entfernungen der äußeren Planeten von der Sonne zu finden.

Kopernikus kritisiert auch die Einwände, die Ptolemäus vom Standpunkt der Mechanik gegen die Erdbewegung erhob. In dieser Polemik bleibt er noch auf dem Stand der aristotelischen Physik, beispielsweise, wenn er beweist, daß das Rotieren der Erde „eine natürliche und nicht eine erzwungene Bewegung ist“ und daß daher die Behauptung des Ptolemäus, daß die Erde infolge der Rotation zerfallen müsse, unbegründet sei. Gleichzeitig spricht aber Kopernikus den tiefen Gedanken aus, mit dem er praktisch den später von Galilei entwickelten Beweis für die Bewegung der Erde vorwegnimmt, daß „sich nicht nur das Festland mit dem mit ihm verbundenem Wasserelement bewegt, sondern auch ein beträchtlicher Teil der Luft und alles, was auf diese oder jene Weise mit der Erde verbunden ist“.

Als Sohn seines Jahrhunderts vermutete Kopernikus, daß die Erde bei ihrem Umlauf um die Sonne ihr gegenüber die gleiche Achslage beibehalten müsse. Um die unveränderte Richtung der Erdachse im Raum zu erklären, mußte er der Erdachse eine langsame Drehung in der Richtung zuschreiben, die der jährlichen Bewegung der Erde entgegengesetzt ist. Von diesem Gedanken lösten sich seine Anhänger bald, da Galilei feststellte, daß bei der Bewegung der Erde um die Sonne die Richtung der Erdachse stets parallel zu sich selbst bleiben muß.

Schließlich wies Kopernikus auf eine weitere Bewegung der Erde hin und löste so auf geniale Weise das Rätsel der Veränderung der Sternörter am Himmel. Diese Erscheinung war zuerst von dem hervorragenden griechischen Astronomen Hipparchos (180–125 v. u. Z.) bemerkt worden. Hipparchos entdeckte bei dem Vergleich der von ihm bestimmten Lage der Sterne zum Frühlingspunkt mit den Vermessungen, die von früheren Astronomen gemacht worden waren, daß sich diese Lagen langsam verändern, und zwar bei allen Sternen gleichmäßig. Hipparchos glaubte, daß dies nur durch die Verschiebung des Frühlingspunktes zur Sonne, d. h. von Osten nach Westen, erklärt werden könne. Die Ursache dafür sah er in der langsamen Drehung der Sternensphäre um das Lot auf die Fläche der Ekliptik, wenn die Neigung des Äquators gegen sie konstant bleibt.

Im System des Kopernikus gilt diese rätselhafte Drehung der Himmelsphäre nur als scheinbar. Sie wird durch eine Drehung der Erdachse im Raum auf einer kegelförmigen Fläche um das Lot auf die Fläche der Ekliptik erklärt. Dabei verändert sich ihre Neigung zu dieser Fläche nicht, aber der Schnittpunkt der Ekliptik mit dem Himmelsäquator verschiebt sich vom Osten nach dem Westen.

Kopernikus' Lehre drohte die Autorität der Kirche zu erschüttern, die die primitiven kosmologischen Anschauungen der Bibel für verbindlich erklärt – kanonisiert – hatte. Sie nahm der Erde ihre Sonderstellung im Weltall und eröffnete damit der Annahme, daß es eine große Anzahl bewohnter Welten gäbe, den Weg. Nach der Meinung des bedeutendsten Theologen des späten Mittelalters, Thomas von Aquino, führte diese Idee jedoch zum Atheismus.

Die katholische Kirche begriff nicht sofort das Revolutionäre der kopernikanischen Lehre. Das lag zum Teil an dem anonymen Vorwort, das, wie erst viel später bekannt wurde, der lutherische Theologe Osiander, der an der Herausgabe des Buches beteiligt war, geschrieben und ohne Wissen des Autors eingefügt hatte. „Es besteht kein Zweifel“, schrieb Osiander im Vorwort, „daß, da sich die Kunde von den neuen Hypothesen dieses Werkes verbreitet hat, bei einigen Gelehrten ein starker Unwillen erregt wurde, weil in diesem Werk die Erde als sich bewegend dargestellt wird, die Sonne dagegen als unbeweglich im Mittelpunkt des Weltalls stehend, und man

ihrer Meinung nach die Wissenschaft nicht erschüttern darf, die seit jeher auf wahren Grundlagen beruht. Aber bei näherer Betrachtung werden wir sehen, daß der Verfasser dieses Werkes nichts Tadelnswertes getan hat; denn die Aufgabe des Astronomen besteht darin, daß er sich mit Hilfe gründlicher und geschickter Beobachtungen ein Bild von der Bewegung der Himmelskörper macht; danach ist er bemüht, die Ursachen dieser Bewegung zu untersuchen, und wenn es unmöglich ist, diese zu finden, stellt er Hypothesen auf, auf deren Grundlage man mittels geometrischer Theoreme diese Bewegungen sowohl für die zukünftige als auch für die vergangene Zeit berechnen kann. Diesen beiden Bedingungen genügt die Kunst des Verfassers vollkommen. Die Hypothesen können unbillig oder sogar unwahrscheinlich sein; es genügt, wenn sie uns zu Berechnungen führen, die unseren Beobachtungen entsprechen . . . Darum wollen wir diesen neuen Hypothesen einen Platz neben denen des Altertums einräumen, die auch nicht wahrscheinlicher sind, da sie genauso erstaunlich wie verständlich sind . . . In allem aber, was die Hypothesen anbetrifft, soll sich niemand an die Astronomie wenden, der etwas Zuverlässiges erfahren will; sie selbst kann das nicht geben, und wenn jemand das für Wahrheit ansieht, was infolge fremder Anregungen erdacht wurde, wird er durch dieses Studium dümmer als vorher werden.“

Auf diese Weise entstellte Osiander die Ideen des Kopernikus und stellte seine Lehre nur als Hypothese für eine bequemere Berechnung der Planetenbewegungen hin, nicht aber als revolutionäre wissenschaftliche Theorie, die die wahre Struktur der Welt aufdeckt. Osianders Vorwort stand dem richtigen Verständnis des Werkes im Wege.

Als Kopernikus die geozentrische Weltanschauung widerlegte, dachte er immer noch, daß sich die Planeten gleichmäßig auf kreisförmigen Bahnen bewegten. Er mußte zur Erklärung einiger Eigenarten der Bewegungen noch die Epizyklen und die Exzentren zur Hilfe nehmen, von denen erst Kepler die Astronomie befreite. Aber Kopernikus war stolz, daß er die Zahl der Kreise von fast 80 im System des Ptolemäus auf 34 reduzieren konnte.

Die verhältnismäßig einfache Berechnung der Planetenbewegungen im kopernikanischen System mußte die Astronomen anziehen, wenn ihnen auch sein Grundgedanke zweifelhaft erschien.

Tatsächlich wurden auch 1582 bei der Reform des Julianischen Kalenders Berechnungen zugrunde gelegt, die Kopernikus vorgenommen hatte; dementsprechend mußte man 10 Tage zum Datum addieren. So schrieb man denn auch tatsächlich nach dem 5. den 15. Oktober.

Allmählich vergrößerte sich die Zahl der Astronomen, die sich zu der Lehre von den Bewegungen der Erde bekannten. So wissen wir, daß in den achtziger Jahren des 16. Jahrhunderts der Italiener Fontana in seinen Vorlesungen an der Krakauer Universität auch das kopernikanische System darlegte.

An den Universitäten jedoch, die unter der direkten Kontrolle der römischen Kirche standen, durfte man die Lehre des polnischen Denkers nur erwähnen, wenn man sie mit Argumenten aus der „Heiligen Schrift“ oder vom Standpunkt der aristotelischen Mechanik widerlegen wollte.

Auch die Räte der Universitäten protestantischer Länder konnten angesichts der Erklärungen Luthers und Melanchthons der öffentlichen Darlegung des Systems von Kopernikus kaum wohlwollend begegnen.

Jedenfalls mußte der Professor Michael Moestlin (1550–1631) in den achtziger Jahren des 16. Jahrhunderts an der Universität Tübingen seine Astronomievorlesungen im Sinne des Ptolemäus halten und wagte nur zu Hause, seine Hörer in die Lehre des Kopernikus einzuführen, dessen überzeugter Anhänger er war.

Der Anerkennung der kopernikanischen Lehre stand in der zweiten Hälfte des 16. und in der ersten Hälfte des 17. Jahrhunderts nicht nur die katholische Kirche im Wege, sondern auch die Rückständigkeit des Denkens der damaligen Gelehrten. Die Bewegung der Erde anzuerkennen, erforderte die Überwindung jener „Trägheit“ des menschlichen Geistes, von der der Begründer des englischen Materialismus, Francis Bacon (1561–1626), im „Neuen Organon“ sprach. Übrigens kann man behaupten, daß auch Bacon selbst den Einfluß dieser „Trägheit“ spürte, da er ein Gegner des kopernikanischen Systems blieb. Deshalb wurden auch in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts viele Hand- und Lehrbücher veröffentlicht, in denen die ptolemäische Astronomie dargestellt wurde, während das Werk des großen polnischen Denkers und die Broschüre des Rheticus nur zweimal herausgegeben wurden.

Engels charakterisiert die Entwicklungsbedingungen der Wissenschaft zur Zeit der Renaissance mit den Worten: „Auch die Naturwissenschaft lebte und webte in dieser Revolution, war revolutionär durch und durch, ging Hand in Hand mit der erwachenden modernen Philosophie der großen Italiener, und lieferte ihre Märtyrer auf die Scheiterhaufen und in die Gefängnisse. Es ist bezeichnend, daß Protestanten wie Katholiken in ihrer Verfolgung wetteiferten. Die einen verbrannten Servet, die anderen Giordano Bruno.“¹

Aber selbstverständlich konnte die rohe Gewalt nicht eine Idee unterdrücken, die aus dem Zeitgeist und der sozialökonomischen Entwicklung der Gesellschaft geboren war.

Das System von Kopernikus lenkte nicht nur die Aufmerksamkeit gelehrter Kreise auf sich, sondern interessierte auch die breiten Schichten Italiens, die sich im 16. Jahrhundert mit kosmologischen Fragen befaßten. Es war der Gegenstand öffentlicher Diskussionen in Gesellschaften, die damals in Italien entstanden. Aus einer Gesellschaft, die der Schuhmacher Gelli und der Apotheker Grazzini 1540 in Florenz gründeten, entstand die florentinische Akademie. Hier hielten Vertreter der Wissenschaft außerhalb der Universität Vorlesungen über Mathematik, Mechanik und Astronomie.

In diesen Gesellschaften, die sich von der Scholastik abkehrten und der Erforschung der Natur zuwandten, war die Lehre des Kopernikus ein vielfach erörtertes Thema. Bald erschienen auch populärwissenschaftliche Bücher, in denen die Leser auf die eine oder andere Weise die Idee von den Bewegungen der Erde kennenlernten.

Bereits 1552 erschien z. B. ein Werk von Antonio Doni, das für die breiten Massen bestimmt war. Hier wurden verschiedene wissenschaftliche und künstlerische Probleme in Dialogform behandelt. Der zweite Dialog enthält ein Gespräch über das System des Kopernikus. Einer der Gesprächspartner, der im Buche mit vollem Namen genannte, in ganz Florenz bekannte Spaßvogel Carafulla (Maestro Antonio), erklärt, daß die Sonne unbeweglich ist und daß um sie die Erde, der Mond und die Planeten kreisen. Obwohl Carafulla seine Ansicht mit den unsinnigsten Argumenten verteidigt, ist der Verfasser des Buches offensichtlich mit seiner Meinung ein-

¹ Engels, Dialektik der Natur. Berlin 1955. S. 205.

verstanden. Als Beweis für die Bewegung der Erde nennt Carafulla auch Ebbe und Flut, die er für ein Schwanken der Wassermasse auf der sich bewegenden Erde hält.

Offenbar war das Interesse für die neue Lehre so groß, daß Giovanni Memo bereits 1545 ein Buch gegen die gefährliche Lehre veröffentlichte, in dem er das heliozentrische System und die von den griechischen Philosophen Leukippos, Pythagoras und Demokrit entwickelte Lehre von der Vielzahl der Welten verwarf. Dieses in italienischer Sprache geschriebene Werk war ebenfalls in Dialogform verfaßt und nicht für Fachgelehrte, sondern für die breiten Kreise der Gebildeten berechnet. Doch gerade diese Bücher, die die Idee von der Bewegung der Erde widerlegen sollten, lenkten auf sie die Aufmerksamkeit. Die Kunde von der Lehre des Kopernikus wurde auch ungewollt von den Predigern verbreitet, die in der Kirche gegen sie auftraten.

Trotz des Widerstands der Kirche wurde das kopernikanische System, das die Bewegung der Erde lehrte, bereits zu Beginn des 17. Jahrhunderts in hervorragender Weise weiterentwickelt.

DER KAMPF FÜR DIE LEHRE VON DEN BEWEGUNGEN DER ERDE

Einer der bedeutendsten Anhänger des Kopernikanischen Systems, dessen Name unvergessen blieb, war der italienische Philosoph Giordano Bruno (1548–1600).

Er wurde in einem Dominikanerkloster erzogen und sollte Mönch werden, sollte demnach auch das von der Kirche anerkannte ptolemäische System verteidigen. Aber als er die Lehren der materialistischen Philosophen des Altertums und die Werke des Nikolaus von Kues und des Kopernikus kennengelernt hatte, wurde er ein erbitterter Gegner der aristotelischen Lehre und der geozentrischen Weltanschauung. Da er in Italien von der Inquisition bedroht war, mußte er in die Schweiz fliehen.

In Genf gab er eine Broschüre heraus, die die unsinnigen Klügeleien der calvinistischen Universitätsprofessoren verspottete, und wurde aus diesem Grunde ins Gefängnis geworfen.

Zum Glück gelang es Bruno, nach Frankreich zu fliehen, wo er in Toulouse einen Lehrstuhl für Philosophie erhielt. Aber bald nahm seine Ablehnung der Lehre des Aristoteles den Rat der Universität gegen ihn ein.

Nachdem er nach Paris übersiedelt war, hielt er eine öffentliche Vorlesung, der König Heinrich III. beiwohnte. Darüber berichtete Bruno bei einem Verhör vor dem Inquisitionsgericht, daß er in Frankreich einen solchen Ruf errungen hatte, daß König Heinrich ihn zu sich eingeladen und ihn gefragt habe, ob sein Gedächtnis angeboren oder durch irgendeine magische Kunst erworben sei. Der König bot Bruno einen Lehrstuhl an der Sorbonne, der berühmten französischen Universität, an, aber Bruno lehnte dies ab, um nicht die für alle Professoren verbindliche Verpflichtung übernehmen zu müssen, am Gottesdienst teilzunehmen. Schließlich machte ihm der katholische Klerus das Leben in Frankreich unmöglich, und Bruno suchte das protestantische England auf.

In London hielt Bruno Vorlesungen, in denen er seine kosmologischen Anschauungen entwickelte. 1584 veröffentlichte er sein berühmtes Werk „Über die Unendlichkeit des Weltalls und der Welten“.

In seinen Werken, in Diskussionen und in Vorlesungen vertrat Bruno die Ansicht, daß die Erde einer der Planeten sei, die um die Sonne kreisen.

Er ging dabei nicht, wie Kopernikus, von mathematischen Überlegungen aus, sondern von seiner weltanschaulichen Konzeption, deren Ursprung man in der Philosophie Demokrits erblicken kann. Kopernikus' Werk zog ihn nicht durch die geometrischen Erklärungen der beobachteten Planetenbewegungen an – denn Bruno schätzte die Mathematik nicht und lehnte einige ihrer Lehrsätze ab, z. B. den von der Unmöglichkeit, das Verhältnis zwischen Radius und Umfang eines Kreises durch eine rationale Zahl auszudrücken –, sondern dadurch, daß Kopernikus die Erde zu einem gewöhnlichen Planeten degradierte und der Idee zum Durchbruch verhalf, daß es zahlreiche bewohnte Welten geben könne.

Unter dem Eindruck bildhafter Vorstellungen, nicht aber abstrakter Begriffe schrieb Bruno auch sein Werk. Er legte hier Gedanken dar, die im krassen Widerspruch zu der geozentrischen Konzeption des Aristoteles und dem religiösen Anthropozentrismus standen.

Die Menschheit, lehrte Bruno, muß sich von dem Gedanken lossagen, daß nur für sie das Weltall existiert, daß für sie die Sonne, der Mond und die Sterne leuchten. Die Erdenwelt ist nur ein nichtiges Stäubchen im unendlichen Raum. Das Planetensystem des Kopernikus war nur die erste Etappe für Bruno, als er im Geiste den unermesslichen Ozean des Weltalls mit seinen unzähligen bewohnten Welten durchschweifte.

„Der Himmel ist ein unermesslicher Raum“, sagte Bruno, „in dem sich alles bewegt und verschiebt, was Leben hat – unzählige Sonnen und Erden . . . Das Weltall setzt sich auf diese Weise aus einem unendlichen, äthererfüllten Raum und unzähligen sich in ihm bewegenden Körpern zusammen. Der Himmel besteht nicht aus harten, kristallinen Gewölben, in die die Sterne wie Nägel eingesteckt sind, sondern das ganze Äthergebiet ist ein unteilbares, flüssiges Kontinuum, in dem jeder Himmelskörper kraft seines eigenen Lebens frei um seinen Mittelpunkt und um die Sonne kreist.“

Der Vorstellung Brunos von einer Vielheit der Welten lag ein unein-

geschränkter Glaube an die Unendlichkeit des Weltalls zugrunde, der ihm den Mut gab, auf den Scheiterhaufen zu steigen und den Märtyrertod für die Wissenschaft zu erleiden.

Dadurch, daß er die Vorstellung von einer Sternensphäre ablehnte, hat Bruno Kopernikus spekulativ weit überholt, denn dieser hatte das Weltall noch durch eine Sternensphäre begrenzt, die freilich ungeheuer groß sein sollte. Da er an die Phantasie seiner Leser und Hörer appellierte, war Bruno ein für die Kirche gefährlicher Verfechter der Lehre von der Bewegung der Erde.

Bruno fesselte die Jugend mit seinen glänzenden Vorlesungen; die alten Professoren der Oxforder Universität, an der er disputierte, nahmen hingegen die Widerlegung der aristotelischen Kosmologie kühl auf, und es wurde Bruno verboten, in Oxford öffentliche Vorlesungen zu halten.

Bruno verließ England und kehrte nach Paris zurück, wo er an der Sorbonne einen dreitägigen Disput austrug. Danach sah sich Bruno gezwungen, nach Deutschland zu fliehen. In Marburg wurde ihm das Doktordiplom für Philosophie zuerkannt, aber der Rektor der Universität erlaubte ihm nicht, Vorlesungen zu halten. Etwas später begann Bruno an der königlichen Universität in Prag seine Ideen vorzutragen; aber schon nach einem halben Jahr machten die Dominikaner seinen Aufenthalt in Prag unmöglich. Nachdem er so viele Jahre in Europa von Land zu Land gezogen war, kehrte Bruno nach Italien zurück. 1592 wurde er in Venedig von der Inquisition verhaftet, ins Gefängnis geworfen und im Jahre 1600 öffentlich in Rom verbrannt. Auf der Hinrichtungsstätte wurde 1889 feierlich ein Denkmal für diesen Märtyrer der Wissenschaft enthüllt.

Brunos kosmologische Ideen von der Unendlichkeit des Weltalls, von den Sternensonnen, die sich in ungeheurer Entfernung von der Erde befinden, von den bewohnten Planeten, die um diese fernen Sonnen kreisen, waren für seine Zeitgenossen zu kühn. Seine Lehre ging weit über den Rahmen der Astronomie seiner Zeit hinaus, die noch nicht einmal das kopernikanische System begriffen hatte.

Ein Zeitgenosse Brunos, der hervorragende dänische Astronom Tycho Brahe (1546–1601), blieb zeit seines Lebens ein Gegner der Lehre des Kopernikus und hielt die Erde für unbeweglich. Er entwickelte ein eigenes

System, nach dem alle Planeten um die Sonne, die Sonne und der Mond aber um die unbewegliche Erde kreisen sollten.

Kopernikus' Werk wurde von dem deutschen Astronomen Johann Kepler (1571–1630) fortgesetzt, der in der Theorie der Planetenbewegungen weiter ging als er. Als Sohn eines kleinen württembergischen Kaufmannes besuchte Kepler die Universität in Tübingen und studierte zunächst Theologie. Als er in den Privatvorlesungen Professor Moestlins das kopernikanische System kennenlernte, wurde Kepler zum überzeugten Anhänger dieser Lehre. Nach Beendigung des Universitätsstudiums wurde er als Mathematiklehrer an einer höheren Schule in Graz (Steiermark) angestellt; dort gehörte auch die Aufstellung von Horoskopen zu seinen Obliegenheiten. So gab er einen Kalender heraus, in dem für das kommende Jahr die Zukunft vorausgesagt wurde.

Diese astrologische Tätigkeit übte Kepler nach seinen eigenen Worten nur unter Zwang aus. Er sagte, es sei besser, einen Almanach mit Prophezeiungen zu veröffentlichen, als um Almosen zu bitten, und die Astrologie sei die Tochter der Astronomie, wenn auch eine illegitime, und daher sei es natürlich, daß die Tochter die Mutter ernähre, die sonst vor Hunger sterben könne.

Schon damals begann Kepler sein großes Werk „Vorbote des Werkes, das das kosmographische Geheimnis von dem erstaunlichen Verhältnis der Proportionalität der Himmelskreise enthält, das durch fünf richtige geometrische Körper erklärt wird“. Dieses Werk, das 1597 erschien, und auch unter dem Einfluß der pythagoreischen Idee von der „Sphärenharmonie“ geschrieben war, enthielt viele Berechnungen. Obwohl es an und für sich keinen wissenschaftlichen Wert hatte, zeugte es doch von dem Willen Keplers, allgemeine Gesetze für die Bewegung der Planeten zu finden, was ihm später auch gelang.

1600 verließ Kepler die Steiermark, wo man die Protestanten zu verfolgen begann, und siedelte nach Prag über. Zu dieser Zeit befand sich in Prag auch Tycho Brahe, der kurz vorher Dänemark und sein Observatorium auf der Insel Hven hatte verlassen müssen und als Astronom und Astrologe an den Hof Rudolfs II. gekommen war. Kepler nahm Tycho Brahes Vorschlag an, mit ihm zu arbeiten und ihm bei der Zusammenstellung der

neuen Planetentabellen zu helfen, an denen Tycho Brahe bereits an seinem früheren Observatorium viele Jahre gearbeitet hatte.

Nach Tycho Brahes Tod wurde Kepler zum „kaiserlichen Mathematiker“ ernannt, und als ihm das Beobachtungsmaterial Tycho Brahes zur Verfügung gestellt wurde, fuhr er in der von diesem begonnenen Zusammenstellung der Tabellen fort. Als er die genauen Beobachtungsergebnisse über die Marsbewegungen bearbeitete, bemühte sich Kepler vergebens, sie mit dem gleichmäßigen kreisförmigen Umlauf, von dem das kopernikanische System ausging, in Einklang zu bringen. Er vermutete, daß sich der Mars um die Sonne nicht in einem Kreis, sondern in einer Ellipse und unregelmäßig bewegt. Es gelang ihm, eine Ellipse zu finden, auf der sich ein Körper mit wechselnder Geschwindigkeit so um die in einem ihrer Brennpunkte befindliche Sonne bewegte, wie es den am Mars beobachteten Bewegungen entsprach.

So entdeckte Kepler seine ersten beiden Gesetze:

1. Die Planetenbahnen sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkte die Sonne steht.
2. Die Verbindungslinie Sonne–Planet (der Radiusvektor) überstreicht in gleichen Zeiträumen gleiche Flächen.

Diese Gesetze wurden von Kepler 1609 in seinem Werk „Neue Astronomie, dargelegt an den Untersuchungen der Bewegungen des Mars“ veröffentlicht.

Kepler lebte und arbeitete unter sehr schweren Bedingungen. Da er in Prag arbeitete, wo die Katholiken herrschten, war Kepler, der aus einer protestantischen Familie stammte, Verfolgungen ausgesetzt. Die Feindschaft zwischen den Katholiken und Protestanten führte im Jahre 1618 zum Dreißigjährigen Krieg.

1611 siedelte Kepler nach Linz in Österreich über, wo er wieder Mathematiklehrer wurde; danach wanderte er einige Jahre in Deutschland von Stadt zu Stadt. Während dieser Periode schrieb und veröffentlichte er zwei Werke: „Die Harmonie der Welt“ und „Abriß der Astronomie des Kopernikus“ (1618–1620).

In der „Harmonie der Welt“ (1619) gab Kepler sein drittes Gesetz der Planetenbewegungen bekannt. Es lautet in der neuzeitlichen Formulierung:

Die Quadrate der Umlaufzeiten der Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen der großen Halbachsen ihrer Bahnen.

Das ist der Beitrag Keplers zur theoretischen Astronomie. Seine Gesetze festigten die Grundlagen des kopernikanischen Systems und befreiten es von allen epizyklischen und exzentrischen Bewegungen. Das Sonnensystem bekam nach den Entdeckungen Keplers ein sehr viel einfacheres Aussehen als nach dem ursprünglichen kopernikanischen System.

Eine große Bedeutung für die Entwicklung der kosmologischen Weltanschauung hatte der von Kepler in Dialogform geschriebene „Abriß der Astronomie von Kopernikus“. In diesem Werk war die Theorie der Mond- und Sonnenfinsternisse ausgezeichnet dargelegt, waren die Bewegungen der Planeten vom heliozentrischen Standpunkt erklärt und war schließlich gezeigt, daß die von ihm entdeckten Gesetze nicht nur für die Bewegungen des Mars, sondern auch für alle anderen Planeten gelten.

Kepler ging hier auch auf die Struktur der Sternwelt ein. Er behauptete, daß sich die Planeten nicht auf der gleichen Sphäre wie die Fixsterne, sondern innerhalb dieser Sphäre befinden, da sie die Fixsterne manchmal verdecken. Jeder Stern kann wie die Sonne von einem Planetensystem umgeben sein, oder, was dasselbe ist, unsere Welt mit ihrer Sonne ist eine von unzähligen Welten.

Wenn man aber auch feststellt, daß sich die Mittelpunkte der Fixsterne nicht auf derselben sphärischen Fläche befinden, so folgt daraus nach Kepler noch nicht, daß das Gebiet, in dem die Fixsterne verstreut sind, überall gleichförmig ist: Auf jeden Fall hat es einen gewissen leeren Raum, um den die Sterne verstreut sind und eine Art Wand oder Gewölbe bilden. In diesem Hohlraum ist unsere Erde mit der Sonne und den Planeten eingeschlossen.

Man kann hieraus sehen, daß Kepler, wenn er auch die heliozentrische Lehre durch die Entdeckung der Gesetze der Planetenbewegungen festigte, doch in seinen allgemeinen kosmologischen Anschauungen noch nicht ganz mit der Wissenschaft der Antike gebrochen hatte.

Von größter Bedeutung für die Kosmologie waren die astronomischen Entdeckungen von Galileo Galilei (1564–1642), eines Zeitgenossen Keplers.

Als er erfuhr, daß in Holland ein Fernrohr erfunden worden sei, baute

Galilei selbständig eine Kombination von Linsen, mit deren Hilfe man nach der Konstruktion eines entsprechenden Rohres entfernte Gegenstände in vielfacher Vergrößerung sehen konnte.

Die Besitzer der ersten Fernrohre begnügten sich damit, entfernte Gegenstände auf der Erde zu betrachten. Galilei hat wahrscheinlich als erster das Fernrohr auf den Himmel gerichtet und dabei für alle seine Zeitgenossen erstaunliche Entdeckungen gemacht.

Das Fernrohr erweiterte die Grenzen des Weltalls, indem es zahlreiche dem bloßen Auge unsichtbare Sterne sichtbar werden ließ und so bewies, daß die Sterne sich nicht an der Innenfläche einer einzigen Sphäre befinden.

Im Blickfeld des Rohres erschienen die Planeten, im Unterschied zu den Sternen, gleich dem Mond als Scheiben. Als die Phasen der Venus entdeckt wurden, war es bewiesen, daß die Planeten dunkle Körper sind, die von den Strahlen der Sonne beleuchtet werden. Beim Jupiter entdeckte man zunächst vier Trabanten, die ihm bei seinem Umlauf um die Sonne folgen, so wie der Mond der Erde folgt. Dieser Umstand war besonders bedeutsam, da die Gegner des kopernikanischen Systems bestritten, daß die Erde den Mond bei ihrer Bewegung um die Sonne nach sich ziehen könne.

„Jetzt haben wir ein offensichtliches Argument, um die Bedenken derer zu zerstreuen, die zwar geneigt sind, anzunehmen, daß die Planeten um die Sonne kreisen, sich aber nicht vorstellen können, wie sich der Mond um die Erde dreht und zugleich mit ihr den jährlichen Kreis um die Sonne beschreibt“, schrieb später Galilei.

Alle diese Entdeckungen stellten die Erde den Planeten gleich, die bis dahin dem Aussehen nach nicht von den Sternen zu unterscheiden gewesen waren. Es wurde offensichtlich, daß die Erde ebenso wie Venus, Mars und Jupiter leuchtet, weil sie das Sonnenlicht widerspiegelt, und wenn man sie z. B. vom Mond aus beobachtete, dieselben Phasen zeigen würde, die wir beim Mond wahrnehmen.

Seit dieser Entdeckung setzte sich Galilei ebenso eifrig für die kopernikanische Lehre ein wie Kepler.

Die Mitteilungen Galileis in seinem Werk „Der Sternenbote“ (1610) über die unebene Oberfläche des Mondes, über die scheinbare Scheibenform,

durch die sich die Planeten von den Sternen unterscheiden, über die früher unbekannten Trabanten des Jupiter und etwas später über die Phasen der Venus und die Sonnenflecken wirkten auf seine Zeitgenossen revolutionierend.

In der Zeit von 1610 bis 1612 erklärte Galilei in öffentlichen Vorträgen die Bedeutung seiner astronomischen Entdeckungen. Er sprach und schrieb in der allen verständlichen italienischen Sprache und machte aus seinen Hörern und Lesern Anhänger der Lehre des Kopernikus. In seinem Briefwechsel mit Freunden betonte er, daß er Anhänger der kopernikanischen Lehre in Rom, Florenz, Venedig, Padua, Neapel, Pisa, Parma und in anderen Städten nennen könnte, die sich nur nicht öffentlich zu ihr bekannt hätten.

Gelegentlich einer Reise nach Rom wurde Galilei 1611 in die Accademia dei Lincei aufgenommen, die sich die Förderung von Wissenschaft und Kunst zur Aufgabe machte. Seinem Wirken begegneten damals die Kardinäle Bellarmino und Barberini mit Toleranz. Der erstere war ein einflußreiches Mitglied der römischen Kongregation, der zweite der spätere Papst Urban VIII.

Doch schon damals warnte ihn anscheinend Bellarmino, Folgerungen aus seinen astronomischen Beobachtungen zu ziehen. In der Tat wird in dieser Zeit Galilei erstmalig in den Inquisitionsakten erwähnt.

Trotz der Gefahr, sich Verfolgungen auszusetzen, veröffentlichte Galilei 1613 drei Briefe, in denen von den Sonnenflecken und den Phasen der Venus die Rede war und in denen er sich offen als Anhänger des Kopernikus bekannte. Die Lehre des Kopernikus, die bis dahin in dessen schwer verständlichem, mathematischem Werk verborgen geblieben war, fand plötzlich einen Propagandisten, der sie nicht nur erläuterte, sondern auch durch neue, unerwartete Entdeckungen an demselben Himmel bestätigte, der bis zu dieser Zeit nur den spitzfindigen Voraussagen der Astrologen gegnert hatte.

Die Verbreitung der kopernikanischen Lehre beunruhigte den Klerus. Viele Gegner zogen gegen Galilei los und veröffentlichten Schmähschriften, in denen sie die Lehre von der Erdbewegung mit Zitaten aus der Bibel und den Werken des Aristoteles widerlegten und sogar die Richtigkeit der Ent-

deckungen, die mit Hilfe des Teleskopes gemacht worden waren, in Abrede stellten.

Bereits 1615 schrieb der Kardinal Bellarmino in einem Brief an den Pater Foscarini, einen Anhänger der kopernikanischen Lehre: „Mir scheint, daß Sie und Signor Galilei vorsichtig handeln würden, wenn Sie sich damit begnügen würden, Vermutungen und nicht Absolutes auszusagen; so hielt es, wie ich immer meinte, auch Kopernikus. In der Tat, wenn man behauptet, daß unter der Voraussetzung, daß sich die Erde drehe und die Sonne unbeweglich sei, alle beobachteten Erscheinungen besser einzuordnen sind als bei Zuhilfenahme von epizyklischen und exzentrischen Bewegungen, so ist das vortrefflich gesagt und birgt keinerlei Gefahr in sich; und das genügt auch für die Mathematik. Wenn man jedoch zu behaupten beginnt, daß die Sonne wirklich im Mittelpunkt der Welt steht und sich nur um sich selbst, nicht aber vom Osten nach dem Westen bewegt, und daß die Erde . . . mit großer Geschwindigkeit um die Sonne kreist, so ist das eine sehr gefährliche Sache, nicht nur, weil das alle Philosophen und gelehrten Theologen reizt, sondern auch deshalb, weil es dem heiligen Glauben schadet, da sich hieraus die Unrichtigkeit der Heiligen Schrift ergibt.“

Bald konnte sich Galilei selbst davon überzeugen, wie gefährlich es war, in aller Öffentlichkeit die Lehre von den Bewegungen der Erde zu verteidigen. Er wurde bei der römischen Inquisition denunziert, die im geheimen diese Angelegenheit zu untersuchen begann. Als er davon erfuhr, reiste Galilei nach Rom und setzte durch, daß er der Häresie für unschuldig befunden wurde, aber er wollte außerdem die Kardinäle bewegen, das System des Kopernikus zu legalisieren. In Rom führte er in Privathäusern Dispute mit Vertretern der offiziellen Wissenschaft und mit gebildeten Laien und überraschte alle durch die dialektische Kunst, mit der er ihre Entgegnungen widerlegte.

Aber bereits im März 1616 stellte die heilige Kongregation in Rom fest, daß „... die falsche und völlig der Heiligen Schrift widersprechende pythagoreische Lehre von der Bewegung der Erde und der Unbeweglichkeit der Sonne, die von Nikolaus Kopernikus in dem Buch von der Umdrehung der Himmelskörper . . . gelehrt wird, sich schon weit verbreitet hat und von vielen aufgenommen wird . . . Damit sich eine derartige Meinung nicht

nach und nach noch mehr verbreite, zum Verderb der katholischen Wahrheit, hat die Kongregation beschlossen: Die genannten Bücher . . . müssen zeitweilig bis zu ihrer Korrektur zurückgehalten werden . . .“ In der Folgezeit wurden diese „Korrekturen“ tatsächlich vorgenommen. Sie bestanden in der Beseitigung aller Stellen, mit denen die Bewegungen der Erde bewiesen wurden.

Galilei wurde ein Inquisitionsverfahren angedroht, wenn er künftig die kopernikanische Lehre mündlich oder schriftlich verbreite.

Für einige Zeit stellte Galilei die Veröffentlichung seiner astronomischen Entdeckungen ein. Aber bereits 1624 verfaßte er ein kleines „Sendschreiben an Francesco Ingoli“, das nicht gedruckt, sondern nur in Abschriften verbreitet wurde. Darin setzte er sich aufs neue für die Lehre von den Bewegungen der Erde ein und legte seine kosmologischen Anschauungen dar. Dieses kleine Werk war die Antwort auf Ingolis „Betrachtungen über den Ort der Erde und über ihre Unbeweglichkeit; gegen das System des Kopernikus“, das Galilei 1616 bekommen, aber damals nicht beantwortet hatte. Aber auch 1624 blieb Galileis Schreiben Ingoli anscheinend unbekannt, da es Galilei nicht darum zu tun war, diesen gelehrten Ignoranten zu überzeugen, sondern zu klären, wie sich Rom dazu stellen werde, wenn er die Bewegung der Erde wieder in Druckschriften behandelte.

In dem „Sendschreiben“ an Ingoli bediente sich Galilei bereits der vorsichtigen Methode indirekter Argumente zugunsten der Lehre des Kopernikus und der direkten Widerlegung jener Argumente, die Ingoli gegen ihn geführt hatte.

Der Stil des „Sendschreibens“ ist so gehalten, wie es ihm das Bewußtsein eingab, daß es gefährlich sei, die verbotene Lehre zu verteidigen. Empört darüber, daß der in der Astronomie unerfahrene Theologe selbstbewußt die durchdachte, zutiefst wissenschaftliche Schöpfung des großen Kopernikus mit Hilfe der allen bekannten Einwände der Scholastiker widerlegen wollte, erklärte Galilei ihm umständlich elementare geometrische und astronomische Begriffe, wobei er die Verachtung für seinen Gegner unter der Maske der Ehrerbietung und des Wohlwollens verbarg.

In seinem „Sendschreiben“ hat Galilei sehr treffend dargelegt, warum wir die Bewegung der Erde nicht bemerken, wenn wir uns auf ihr befinden.

„Schließen Sie sich mit einem ihrer Freunde in einer Kajüte unter dem Deck eines großen Schiffes ein“, schrieb Galilei, „und richten Sie es so ein, daß sich darin Fliegen, Schmetterlinge und andere fliegenden Insekten befinden; nehmen Sie auch ein großes Gefäß mit Wasser und kleinen Fischen, bringen Sie noch irgendein Gefäß etwas höher an, aus dem das Wasser tropfenweise in ein unteres Gefäß fällt, das einen engen Hals hat, und beobachten Sie aufmerksam, solange das Schiff noch nicht fährt, wie diese Insekten mit gleicher Geschwindigkeit in allen Richtungen durch die Kajüte fliegen. Sie werden sehen, wie sich die Fische in jeder beliebigen Richtung im Gefäß bewegen; alle Tropfen werden herabfallen und in das Gefäß gelangen, das darunter steht... Wenn Sie nun alle diese Erscheinungen gut wahrgenommen haben, lassen Sie das Schiff mit beliebiger Geschwindigkeit fahren, dann werden Sie – wenn die Bewegung nur gleichmäßig ist und das Schiff nicht hin und her schwankt – nicht den geringsten Unterschied in allem, was beschrieben wurde, wahrnehmen, und Sie werden an keiner dieser Erscheinungen erkennen können, ob sich das Schiff bewegt oder nicht... Werden Sie sich nun nicht von jedem Zweifel daran los-sagen, daß dasselbe auf der Erdkugel vor sich gehen muß, wenn sich die Luft mit ihr bewegt?“

Mit diesem Beispiel hat Galilei die auf der Erdrotation beruhende Bewegung der Erdoberfläche den gleichmäßigen, geradlinigen Bewegungen zugerechnet, für die sein Trägheitsgesetz nur gilt. Die Wirklichkeit rechtfertigt diese theoretisch nicht ganz richtige These, da die trägen, zentrifugalen Kräfte, die bei dieser Bewegung der Erde entstehen, sehr gering sind und nur bei einer besonders exakten Versuchsanordnung festgestellt werden können.

Das „Sendschreiben an Ingoli“ war nur ein Versuchsballon. Nachdem er sich überzeugt hatte, daß dieses nicht im Druck veröffentlichte Werk bei Urban VIII. keinen Unwillen erregt und daß ihm sogar seine literarische Form gefallen hatte, begann Galilei angestrengt an dem „Dialog über die zwei Weltsysteme“ zu arbeiten, einem Werk, dem es bestimmt war, die Lehre von den Bewegungen der Erde in den Augen der breiten Massen unwiderlegbar zu machen.

Galilei sah es für notwendig an, vorsichtig zu verfahren, und wies in dem

vollen Titel des „Dialogs“ darauf hin, daß dies eine Abhandlung über die zwei hervorragendsten Weltsysteme sei, des ptolemäischen und des kopernikanischen, wobei die Argumente, ohne ihren Wert zu bestimmen, sowohl für das eine wie auch für das andere dargelegt werden. Um den Eindruck abzuschwächen, den dieses Buch auf die Theologen und Scholastiker machen mußte, wurde ihm ein Vorwort vorangeschickt, worin sein Erscheinen vom religiösen und nationalen Standpunkt damit gerechtfertigt wurde, daß die Protestanten Rom nicht als ein Reich der Finsternis und der Verblendung betrachten sollten.

In diesem Werk, das 1632 erschien, werden Probleme gelöst, die unmittelbar mit der Lehre des Kopernikus in Zusammenhang stehen. Galilei beweist, daß es keinerlei Grund gibt, zu leugnen, daß die Erde sich bewegen könne. Die Bedeutung des „Dialogs“ für die Entwicklung der Wissenschaft bestand in der Zusammenfassung aller Tatsachen, die die physikalische Natur der Erde als Planet charakterisieren, d. h., es wurde einleuchtend geklärt, daß die Erde ein Körper wie der Mond und die Planeten Venus, Mars, Jupiter und Saturn ist und daß sie sich gleich ihnen im Zustand der Bewegung befinden kann. Im dritten Teil des „Dialogs“ weist Galilei auf Ebbe und Flut als mechanischen Beweis der Bewegungen der Erde hin und vergleicht sie mit dem Schaukeln des Wassers in einer Barke, die ihre Fahrt bald beschleunigt, bald verlangsamt.

Wenn er in dem „Wogen“ der Wassermassen die Ursache der Gezeiten sah, so ging Galilei davon aus, daß im Laufe von 24 Stunden die Bewegung eines jeden Punktes auf der Erdoberfläche infolge der Erdrotation bald in der gleichen Richtung wie ihre Umlaufbewegung, bald ihr entgegengesetzt erfolgt. Darum wechselt die summarische Geschwindigkeit jedes Punktes der Erde beständig, und daher müßten sich auch die beweglichen Wassermassen durch das Beharrungsvermögen gegenüber der Erdoberfläche verschieben.

Die summarische Geschwindigkeit, mit der sich die Punkte auf der Erdoberfläche bewegen, ändert sich zwar tatsächlich, ist aber von geringerer Bedeutung.

Es könnte seltsam erscheinen, daß Galilei, der die Bewohner der Erde mit Schiffspassagieren verglich, die nicht erkennen können, ob sich das Schiff

bewegt oder nicht, trotzdem meinte, daß die Gezeiten auf die Bewegung der Erde hindeuten. Aber man darf nicht vergessen, daß der „Dialog“ für die breiten Massen bestimmt war. Man findet in ihm vereinfachte Beweise und Ungenauigkeiten, auf die spätere Gelehrte hingewiesen haben.

Galilei war die Zentrifugalkraft bekannt – der Trägheitswiderstand eines Körpers, der sich in einer Kurve bewegt –, und er wußte, daß auf der rotierenden und sich in einem Kreis bewegenden Erde Erscheinungen vorliegen können, die von diesen Bewegungen abhängen. Für eine solche Erscheinung hielt er irrtümllicherweise auch die Gezeiten. Obwohl es ihm nicht gelang, einen physikalischen Beweis für die Erdrotation zu finden – was erst zwei Jahrhunderte später geschah –, war der „Dialog“ doch von großer Bedeutung für die Verbreitung richtiger Vorstellungen von dem Planetencharakter der Erde. Einige Monate nach der Veröffentlichung wurde der „Dialog“ in Italien verboten, er erschien aber in anderen Ländern.

Das Erscheinen des „Dialogs“ versetzte den Klerus in Wut. Galileis Feinde bestanden darauf, daß er nach Rom vor das Inquisitionsgericht geladen würde. 1633 wurde gegen ihn die Anklage erhoben, daß er „eine Lehre glaube und unterstütze, die falsch und der Heiligen göttlichen Schrift entgegengesetzt sei“. Die Inquisition drohte ihm mit der Folter, nach der ihn der Tod auf dem Scheiterhaufen erwartete, und verlangte von ihm, daß er sich öffentlich von der Lehre des Kopernikus lossage.

Der kranke siebzigjährige Galilei war gezwungen, sich zu unterwerfen und von der Meinung „daß die Sonne der unbewegliche Mittelpunkt der Welt ist, die Erde aber nicht der Mittelpunkt ist und sich bewegt“ loszusagen. Der Akt der Lossagung wurde in Druckschriften weit verbreitet, aber keiner der Anhänger des Kopernikus schenkte ihr Glauben. Alle begriffen, daß die Lossagung erzwungen worden war.

Der alte Gelehrte mußte seinen Lebensabend in seinem Landhaus unter Aufsicht der Inquisitoren verbringen. Er hatte keinerlei Möglichkeit mehr, astronomische Werke zu veröffentlichen. Galilei kehrte jedoch zu den Untersuchungen auf dem Gebiet der Mechanik zurück, die er schon vor seinen astronomischen Entdeckungen begonnen hatte.

Die katholische Kirche beschränkte sich in ihrem Kampf gegen die kopernikanische Lehre und ihre Vertreter nicht auf Folter und Scheiterhaufen.

Die Jesuiten, die an den Universitäten Professuren innehatten, beschäftigten sich mit astronomischen Beobachtungen, aber sie waren bestrebt, ihre Ergebnisse, wenn nicht mit der Bibel, so doch mit der von der Kirche kanonisierten Lehre des Aristoteles in Einklang zu bringen. Sie waren nicht berechtigt, irgendwelche Entdeckungen oder Theorien ohne das Einverständnis der Obrigkeit ihres Ordens zu veröffentlichen. Zu diesen „Gelehrten“ gehörten z. B. Scheiner, Kircher, Schott, Riccioli u. a. Als Scheiner seinem Ordensvorgesetzten von den Sonnenflecken, die er beobachtet hatte, berichtete, wurde ihm nur gestattet, dies bekanntzugeben, wenn er gleichzeitig erklärte, daß die Flecke sich nicht auf der Sonne selbst befinden (das hätte Aristoteles widersprochen), sondern dunkle Körper seien, die vor ihrer Scheibe vorüberziehen.

Die Jesuiten waren bestrebt, von den von ihnen beobachteten Erscheinungen möglichst schnell zu allgemeinen Betrachtungen überzugehen und auf Grund der formalen Logik die Tatsachen in eine scheinbare Übereinstimmung mit der Philosophie des Aristoteles zu bringen.

Der Autorität der Kirche dienten auch die Versuche, die Dinge so darzustellen, als befänden sich die Fortschritte der Kosmologie und der Erkenntnisse über die Erde in vollem Einklang mit der Wissenschaft, die an den scholastischen Universitäten herrschte.

Früher hatten die Scholastiker behauptet, die Entdeckung Amerikas sei von Ptolemäus und sogar von Augustinus vorausgesagt worden. Später, sogar noch im neunzehnten Jahrhundert, fanden sich Gelehrte, die bestrebt waren, Wissenschaft und Religion in Einklang zu bringen, z. B. behauptete der französische Physiker Duhem allen Ernstes, die physikalischen Entdeckungen Galileis seien schon der scholastischen Naturwissenschaft bekannt gewesen.

DIE ENTSTEHUNG DER EXPERIMENTELLEN RICHTUNG IN DER MECHANIK

Der Begriff der Schwere als einer Anziehung der Körper durch die Erde bildete sich im menschlichen Bewußtsein durchaus nicht ohne weiteres. Die griechischen Philosophen des Altertums sahen im Gewicht eines Körpers nur eine natürliche Eigenschaft, die sie nicht mit der Anziehungskraft der Erde in Verbindung brachten. Das Fallen der Körper wurde durch ihr Streben nach „unten“ erklärt, und die Erde selbst hätte nach der Meinung dieser Philosophen auch fallen müssen. Wir haben schon erwähnt, wie schwer es den griechischen Gelehrten fiel, zu erklären, warum sich die Erde im Raum im „Gleichgewicht“ hielt. Erst Aristoteles fand einen Ausweg aus dieser Schwierigkeit, indem er erklärte, daß die Körper nicht nach „unten“, sondern zum Mittelpunkt des sphärischen Weltalls fielen, wo sich unvermeidlich auch die schwere Erde befinden müsse. In seiner Kosmologie befand sich die Erde im Mittelpunkt der Welt, wohin alle Körper streben; darum begann sich das Fallen der Körper allmählich im Bewußtsein der Menschen mit der Erde zu verbinden. So entstand eine zunächst nicht völlig klare Vorstellung von dem Streben der Körper zur Erde.

Wenn man die Erscheinung der Schwere erforschte, so mußte man zugleich das Schwerkraftfeld der Erde untersuchen. Hiermit wurde schon im Altertum begonnen, obwohl die Gelehrten die Aufgabe damals noch nicht in dieser Form sahen.

Die Schwerkraft der Erde äußert sich im Gewicht der Körper und in ihrem Fall. Die Griechen interessierten sich hauptsächlich für die erstgenannte Erscheinungsform der Schwerkraft, da sie die technische Aufgabe zu lösen hatten, große Lasten mit Hilfe von Hebeln, Flaschenzügen, Winden, Schrauben und schiefen Ebenen zu heben. Da die antiken Gelehrten aber die körperliche Arbeit und das Handwerk verachteten, verschmähten sie auch die Experimente und konnten die theoretischen Voraussetzungen dieser Maschinen nicht klären. Aristoteles konnte nur für den Hebel die Regel

formulieren, daß „die Kraft, die in größerer Entfernung vom Drehpunkt angesetzt wird, die Last leichter bewegt, weil sie einen größeren Kreis beschreibt“. Darauf beschränkte sich denn auch Aristoteles in seiner spekulativen Untersuchung der Gleichgewichtsverhältnisse von Körpern unter dem Einfluß der Schwere. Bei dem Versuch, die Ursache dieser Hebelwirkung zu erklären, kam er nur zu der Vermutung, die Kreise, deren Bogen die Enden des Hebels beschreiben, besäßen irgendwelche geheimnisvollen Eigenschaften.

Erst der hervorragende griechische Mathematiker Archimedes (287 bis 212 v. u. Z.) begründete die Statik, die Lehre vom Gleichgewicht der Körper. Archimedes' Arbeiten enthalten alles, was damals über die Wirkung der Schwere oder über die Anziehungskraft der Erde bekannt war. Aber er untersuchte nicht die Gesetze des freien Falls der Körper, d. h. ihrer Bewegung unter der Wirkung der Schwerkraft.

Bis zum Ende des 16. Jahrhunderts wurde an den Universitäten die aristotelische Lehre von der Bewegung anerkannt, die keine mechanische Theorie, sondern eine philosophische Untersuchung der Natur des Raumes, der Zeit und der Bewegung war. In seiner „Physik“ beschäftigte sich Aristoteles mit Betrachtungen darüber, was die Bewegung sei, und nicht mit den Gesetzen, nach denen sie vor sich geht. So hielt er die Bewegung für ein Verschwinden des Körpers an einem Ort und ein Wiedererscheinen an einem anderen. In der Dynamik, d. h. der Lehre von der Bewegung der Körper unter der Einwirkung von Kräften, ging Aristoteles von der spekulativen These aus, daß die Bewegung eines Körpers unbedingt ein beständiges Einwirken von Kräften auf ihn voraussetze; sobald diese Kräfte zu wirken aufhörten, müsse der Körper stillstehen. Offensichtlich kam er zu dieser Annahme auf Grund der oberflächlichen Beobachtung, daß ein Wagen für seine Bewegung die konstante Zugkraft des Pferdes braucht, und berücksichtigte hierbei nicht, daß die konstante Reibung der Achsen, der Luftwiderstand und andere Widerstände überwunden werden müssen. Aristoteles verstand die Ursachen jener Bewegungen nicht, die wegen des Beharrungsvermögens weiterlaufen, wenn die Kraft nicht mehr auf den Körper einwirkt, wofür ein geworfener Stein als Beispiel dienen kann.

Von der Grundthese seiner Dynamik ausgehend, behauptete Aristoteles,

daß sich ein Körper unter der Einwirkung einer konstanten Kraft gleichförmig und nicht – wie es sich tatsächlich verhält – beschleunigt bewegt und daß darum der von ihm zurückgelegte Weg der Zeit proportional ist. Als er seine Dynamik auf den freien Fall der Körper anwandte, unterlief Aristoteles ein anderer Fehler. Er behauptete nämlich, daß die Fallgeschwindigkeit der Körper von ihrem Gewicht abhängt: „Wenn das halbe Gewicht in einer gewissen Zeit einen bestimmten Weg zurücklegt, so wird ein doppelt so großes Gewicht den gleichen Weg in der Hälfte der Zeit durchlaufen.“ Hätte er nur versuchsweise von einer Höhe gleichzeitig einen großen und einen kleinen Stein hinabgeworfen, so hätte er in seiner Lehre vom freien Fall diesen Fehler vermieden. Aber die griechischen Philosophen waren keine Experimentatoren und Beobachter. Aristoteles' Lehrer, der Philosoph Plato, rügte zwei seiner Schüler heftig, weil sie mit Hilfe von Modellen den Beweis einiger geometrischer Lehrsätze erleichtern wollten. Er sagte: „Sie verderben die Geometrie, berauben sie ihrer Würde, verwandeln sie in einen flüchtigen Sklaven, indem sie sie zwingen, von der Untersuchung körperloser, geistiger Dinge zu sinnlichen Gegenständen überzugehen und außer dem Verstand Körper zu Hilfe zu nehmen, die sklavisch durch Handarbeit angefertigt worden sind.“

Übrigens hätte Aristoteles auch ohne Versuche allein auf dem Wege logischer Erwägungen, die er allen anderen Erkenntnismethoden vorzog, feststellen können, daß alle Körper mit der gleichen Geschwindigkeit fallen müssen. Denn Aristoteles kannte doch das Beharrungsvermögen im Ruhezustand, d. h. das Unvermögen eines Körpers, ohne Einwirken einer Kraft in Bewegung zu geraten. Er hätte daraus folgern können, daß ein doppelt so schwerer Körper auch ein doppelt so großes Beharrungsvermögen hat. Darum wird die auf einen solchen Körper einwirkende stärkere Schwerkraft durch ein größeres Beharrungsvermögen kompensiert. Die Fallgeschwindigkeit muß also bei allen Körpern die gleiche sein.

Obwohl die aristotelische Dynamik der Beobachtung widersprach, herrschte sie lange an den Universitäten, da auch die scholastische Wissenschaft des feudalen Europa nicht mit der Praxis verbunden war.

Als man in den dreißiger Jahren des 14. Jahrhunderts Feuerwaffen zu verwenden begann, mußte man nach Möglichkeiten suchen, sie genau zu rich-

ten. Die Gelehrten bemühten sich freilich vergeblich, da sie von der spekulativen Dynamik von Aristoteles ausgingen.

Sie nahmen an, daß die „gewaltsame“ Bewegung der Kugel in gerader Linie vor sich geht, die Kugel dann aber stehen bleibe und unter dem Einfluß ihrer Schwere vertikal zu fallen beginne, d. h., sie begriffen nicht, daß die Schwerkraft die Kanonenkugel „herabzuziehen“ beginnt, sobald diese den Lauf verläßt, und sie von der geraden Linie ablenkt. Daher waren die Tabellen, die für die Kanoniere zusammengestellt wurden, wertlos.

Trotz des Widerspruchs zur Praxis wurde die aristotelische Dynamik an allen Universitäten bis zum Ende des 17. Jahrhunderts gelehrt. Die Praktiker erhoben schüchterne Einwände dagegen, sie versuchten sogar, selbständig die Bewegung der Körper experimentell-mathematisch zu erforschen, aber ihre Bemühungen wurden von den Vertretern der offiziellen Wissenschaft abgelehnt. Sie waren auch zu ungenügend vorbereitet, als daß sie ihre Ideen und Folgerungen durch Versuche und Beobachtungen hätten beweisen können. Die heftige Ablehnung der Mechanik des Aristoteles ließ jedoch bereits erkennen, daß eine Umwälzung in der Wissenschaft bevorstand.

Erst die experimentellen Untersuchungen des freien Falls, die von bedeutenden, größtenteils außerhalb der Universitäten wirkenden Gelehrten durchgeführt wurden, konnten die Grundlagen einer neuzeitlichen und mit der Erfahrung im Einklang stehenden Dynamik schaffen. Einer dieser Gelehrten war Leonardo da Vinci (1452–1519), der große Maler und Denker der italienischen Renaissance.

Wie viele andere Künstler seiner Zeit war Leonardo zugleich Architekt und Ingenieur. Im Dienst des Herzogs von Mailand, Lodovico il Moro, entwässerte er das Tal des Arno, baute Festungen und konstruierte Apparate verschiedener Art. Obwohl er keine systematische Bildung genossen hatte, besaß er ein gründliches Wissen. Die Notizbücher dieses Malers zeigen, daß er nicht nur zur experimentellen Untersuchung der Natur aufrief, sondern auch selbst erfolgreich experimentierte. Leonardo versuchte mittels Balkenwaage, Hebeln und Flaschenzügen die Richtung und die Größe der Resultierenden von zwei gleichwirkenden Kräften zu finden, die an einem Punkt angreifen und miteinander einen bestimmten Winkel bilden. Er stellte

experimentell die Eigenschaften einer schiefen Ebene fest, wie zahlreiche Skizzen in seinen Notizbüchern bezeugen, auf denen ein Flaschenzug mit einem Seil zu sehen ist, an dessen Enden Lasten befestigt sind, die auf schiefen Ebenen liegen.

Bei seiner Arbeit machte er viele richtige Beobachtungen und sprach Ideen aus, die seiner Zeit um hundert Jahre vorausseilten. Aber Leonardo hinterließ keine abgeschlossenen wissenschaftlichen Arbeiten. Als Sohn seines Jahrhunderts wollte er in einem enzyklopädischen Werk „Von den Dingen der Natur“ alle physikalischen Kenntnisse jener Zeit zusammenfassen. Es gelang ihm freilich nicht, dieses Vorhaben durchzuführen, aber seine Manuskripte mit den Beschreibungen der von ihm ausgeführten Versuche wurden in zahlreichen Abschriften in Italien verbreitet. Sie haben wesentlich dazu beigetragen, daß sich die Überzeugung festigte, man müsse zur experimentellen Forschung übergehen. Auch spätere Forscher haben sie benützt, wie Niccolò Tartaglia, Geronimo Cardano, Giovanni Benedetti u. a.

Da die Gelehrten, die noch Anhänger des Aristoteles waren, bei der Lösung wissenschaftlicher und technischer Probleme versagten, sahen sich Ingenieure, Maler und Handwerker veranlaßt, sich in „Akademien“ zusammenzuschließen, die zunächst keine offiziellen wissenschaftlichen Institute waren, sondern freiwillige Vereinigungen begeisterter Freunde der Wissenschaft, die anfangs ohne schriftlich festgelegte Statute arbeiteten. In ihren Sitzungen wurden Fragen der Wissenschaft, Technik und Kunst offen besprochen. Durch ihr Wirken erlangten die Akademien eine Autorität, die sich immer mehr festigte. Die Regierungen der italienischen Staaten hofften auf die Hilfe der Akademien bei der Lösung praktischer Fragen und unterstützten sie aus diesem Grunde.

In einigen Akademien wurden öffentlich allgemeinverständliche Vorlesungen über verschiedene Wissensgebiete gehalten. Wie Francesco de Sanctis sagte, der die Geschichte dieser Institutionen schrieb, „sind die öffentlichen Vorlesungen eine Schöpfung der Demokratie. In ihnen kommt die Wissenschaft aus den Archiven, wo man sie aufbewahrt, zum Volk, dem sie unmittelbar dient und von dem sie bezahlt wird.“

Die florentinische Akademie war die erste von vielen gelehrten Gesell-

schaften, die im 16. Jahrhundert in Italien entstanden. Bald wurden gleiche Gesellschaften in Venedig, Bologna, Neapel und anderen italienischen Städten gegründet.

Den Akademien ist es zu verdanken, daß manche von der Menschheit bereits früher gewonnenen Erkenntnisse erhalten blieben. Wie ein Mitglied der florentinischen Akademie, der Astronom und Mathematiker Ignazio Danti, in dem Vorwort zu der von ihm übersetzten „Optik“, die Euklid zugeschrieben wurde, angibt, wurde diese Wissenschaft zu jener Zeit in den Schulen nicht mehr gelehrt. Das Mathematikstudium wurde an den Universitäten gleichfalls vernachlässigt.

Auch in weiteren Kreisen wurde man sich dessen bewußt, daß die physikalischen und vor allem die mechanischen Anschauungen der Anhänger des Aristoteles praktisch wertlos und theoretisch haltlos waren. In der Literatur erschienen ironische Aufforderungen, man solle den Anweisungen des Aristoteles selbst folgen, wenn man sich Experimenten und Beobachtungen zuwende. Benedetto Varchi, ein Mitglied der florentinischen Akademie, schrieb 1544: „Obwohl es bei den neuzeitlichen Philosophen üblich ist, allem Glauben zu schenken, was bei den guten Autoren und besonders bei Aristoteles geschrieben steht, und hierbei auf Beweise zu verzichten, wäre es aussichtsreicher und interessanter, andere Wege zu beschreiten und in beiden Fällen sich zuweilen zum Versuch herabzulassen. So glaubten und versicherten Aristoteles und alle übrigen Philosophen aufs bestimmteste, daß ein Körper um so schneller fällt, je schwerer er ist, während der Versuch beweist, daß das falsch ist.“

Es entstand damals eine weit verbreitete populärwissenschaftliche Literatur in italienischer Sprache. Zahlreiche Leser interessierten sich für das Problem des freien Falls der Körper, für die Frage des Gewichts der Luft, für die Ursache der Gezeiten und für andere Erscheinungen in der Hydrosphäre und in der Atmosphäre. Die unternehmungslustigsten von ihnen führten sogar einfache Experimente durch. Sie waren natürlich bei weitem nicht alle wirkliche Wissenschaftler. Unter „Versuch“ verstand man oft kein wissenschaftliches Experiment im Sinne unserer heutigen Naturwissenschaft. Das Experimentieren hatte vielfach nicht den Zweck, eine physikalische Erscheinung unter bestimmten Versuchsbedingungen hervorzu-

rufen, sondern diene der Entdeckung von Wunderdingen. Experimente dieser Art waren die Versuche der Alchimisten, die nach Methoden suchten, um Blei in Gold zu verwandeln und das „Lebenselixier“ zu gewinnen, oder die Versuche der mittelalterlichen Mechaniker, lebende Automaten herzustellen.

Diesen Passionen widmete sich auch der italienische Mathematiker Geronimo Cardano (1501–1576), nach dem eine bekannte Aufhängevorrichtung benannt ist. Mittels zweier zueinander senkrechter, drehbarer Achsen ermöglicht sie es, einen Körper so aufzuhängen, daß er seine Lage im Raum – unabhängig von der Stellung der Aufhängevorrichtung – stets beibehält. Gleich anderen Zeitgenossen wandte sich Cardano kühn gegen die Scholastik und gegen die Autorität des Aristoteles und sprach sich für eine aus Erfahrung gewonnene Erkenntnis aus, wie sie für einen erfolgreichen Kampf mit den Elementarkräften der Natur und für ihre Ausnutzung im Interesse des Menschen notwendig ist.

In der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts begannen sich in England besonders intensiv kapitalistische Produktionsformen zu entwickeln. Der Einfluß der Bourgeoisie verstärkte sich; es reiften jene Bedingungen heran, unter denen sich später, in der Mitte des 17. Jahrhunderts, die englische bürgerliche Revolution vollzog. Zu dieser Zeit wirkte in England der hervorragende Philosoph Francis Bacon, der die Entwicklung der experimentellen Naturwissenschaft erheblich beeinflusste.

Karl Marx charakterisierte die Bedeutung Bacons mit den Worten: „Aber der wahre Ahnherr des englischen Materialismus und der Erfahrungswissenschaften der neuesten Zeit überhaupt war Bacon. Die Naturwissenschaft gilt ihm als die wahre Wissenschaft, und die sinnliche Physik als der vornehmste Teil der Naturwissenschaft . . . Nach seiner Lehre sind die Sinne untrüglich und die Quelle aller Kenntnisse. Die Wissenschaft ist Erfahrungswissenschaft und besteht darin, eine rationelle Methode auf das sinnlich Gegebene anzuwenden. Induktion, Analyse, Vergleichung, Beobachtung, Experimentieren sind die Hauptbedingungen einer rationellen Methode.“¹

Bacon war ein leidenschaftlicher Vorkämpfer der neuen Naturwissenschaft.

¹ Marx und Engels, Die heilige Familie. Berlin 1953. S. 257.

„Diejenigen, die sich mit den Wissenschaften beschäftigt haben“, schrieb er, „waren entweder Empiriker oder Dogmatiker. Die Empiriker sammeln nur wie eine Ameise und benützen das Gesammelte. Die Rationalisten schaffen gleich einer Spinne aus sich selbst das Gewebe. Aber die Biene wählt eine mittlere Methode, sie zieht den Stoff aus den Blumen des Gartens und des Feldes, aber benützt und verändert ihn nach eigenem Können.“

An Hand dieses Beispiels formuliert Bacon seine Ansicht, wie die Methode einer wissenschaftlichen Naturerkenntnis sein soll: „Davon unterscheidet sich auch nicht das wahre Anliegen der Philosophie. Denn sie beruht nicht nur oder vor allem auf den Kräften des Geistes und legt das Material, das der Naturgeschichte und den mechanischen Versuchen entnommen wird, nicht unberührt im Bewußtsein ab, sondern verändert es und verarbeitet es im Verstand. Und so muß man alle Hoffnung auf eine engere und unverbrüchliche – was bis jetzt nicht war – Vereinigung der Eigenschaften des Versuches und des Verstandes setzen.“

Bacon wandte sich gegen die spekulativen Konstruktionen, die nicht auf der Erfahrung beruhten, mit den Worten: „Die Feinheit der Natur übertrifft unermesslich die Feinheit unserer Gefühle und unseres Geistes. Die anziehenden Theorien, Spekulationen und Beweise, die vom Menschen erdacht wurden, sind nichts anderes als krankhafte Erscheinungen.“ Er wies auf den Unterschied in der Entwicklung der Scholastik und der Technik hin. Während die Scholastik im Laufe von Jahrhunderten unfruchtbar blieb, konnte die Technik bedeutende Erfolge erzielen. Die Ursache davon sah Bacon in „einer trügerischen Überschätzung der Kräfte und Fähigkeiten des menschlichen Verstandes“.

Die Bedeutung Bacons für die Entwicklung der Naturwissenschaft liegt in seinem Eintreten für die experimentelle Untersuchung, in der materialistischen Richtung seiner Philosophie und der überzeugenden Argumentation zugunsten der These, daß die Wissenschaft nicht „leerem Zeitvertreib“ dient, nicht nur Stoff für Dispute bieten soll, wie es die Scholastik tat, sondern „Nutzen bringen“ und die Lebensbedürfnisse befriedigen soll. Für die experimentelle Erkenntnis der Natur kämpfte auch der französische Philosoph René Descartes (1596–1650), der in der Geschichte der Wissenschaft auch unter dem Namen Cartesius bekannt ist. Descartes, der in einem

Jesuitenkolleg erzogen wurde, trat als Adliger in Heeresdienste und nahm am Dreißigjährigen Krieg teil, widmete sich dann aber völlig philosophischen Forschungen. Da die Situation für eine freie Forschung im katholischen Frankreich nicht günstig war, siedelte Descartes 1624 nach Holland über.

„Von Jugend auf habe ich mich den Wissenschaften zugewendet“, schrieb er in seiner „Abhandlung über die Methode des richtigen Vernunftgebrauchs“. „Man sagte mir, durch sie könne man eine klare und sichere Erkenntnis von allem erlangen, was für das Leben von Wert ist, und so war ich vom sehnlichsten Wunsch beseelt, sie kennenzulernen. Als ich nun den ganzen Studiengang beendet hatte und mich, wie es Sitte war, zu den ‚Gelehrten‘ hätte rechnen dürfen, da war ich ganz anderer Meinung geworden! Zweifel und Irrtümer umgaben mich, und nur das eine schien mir bei all meiner Lernbegierde immer klarer und klarer geworden zu sein, nämlich, daß ich nichts weiß. Und doch besuchte ich eine der hervorragendsten Schulen in ganz Europa, wo es, wenn überhaupt irgendwo in der Welt, gelehrte Männer geben mußte.“

Als Vertreter einer neuen Wissenschaft legte Descartes sehr großen Wert darauf, sie in der Praxis anzuwenden. Er verkehrte sehr viel mit Industriellen und Handwerkern und unterhielt mit ihnen einen regen Briefwechsel. Darüber schrieb er in seiner „Abhandlung“: „Es schien mir nämlich, als sei in den Schlußfolgerungen, die ein jeder in seinen eigenen geschäftlichen Angelegenheiten zugrunde legt . . . viel mehr Wahrheit zu finden, als in den Entwicklungen, die irgendein Gelehrter, müßig in seinem Studierzimmer sitzend, sich über . . . für das praktische Leben bedeutungslose Dinge ausdenkt.“

Die deduktive Methode Descartes' war der induktiven Methode, für die Bacon eintrat, diametral entgegengesetzt. Wenn er aber auch die Deduktion als Methode zur Erklärung der Naturerscheinungen ansah, erkannte Descartes doch die wichtige Bedeutung der Erfahrung an.

Das ungeheuerere Verdienst von Descartes war, daß er die Autorität des Aristoteles stürzte und dazu aufrief, die Natur vom Experiment und der Beobachtung aus zu studieren.

DIE ENTDECKUNG DER GESETZE DES FREIEN FALLS DER KÖRPER

Die praktischen Erfordernisse der Artillerie hatten seit dem 14. Jahrhundert nach der Erklärung der Flugbahn des Geschosses gedrängt. Wenn sich auch die Anhänger des Aristoteles nicht von den „natürlichen“ und „gewaltsamen“ Bewegungen lossagen konnten, suchten doch andere Forscher dieses Problem zu lösen. Niccolò Tartaglia (1499–1559) kam als erster der richtigen Lösung nahe.

Als Sohn eines Postmeisters erhielt Tartaglia keine Schulbildung und mußte sich seine Kenntnisse selbständig erwerben. Er besaß eine so starke mathematische Begabung, daß er schon mit 20 Jahren den Kaufleuten und Handwerkern von Verona Mathematikunterricht erteilte. Er mußte auch verschiedene Berechnungen für Ingenieure, Mechaniker und Artilleristen anstellen. Im Jahre 1531 wandten sich Artilleristen an ihn mit der Frage, unter welchem Winkel zum Horizont man schießen müsse, um der Kugel die größte Reichweite zu geben.

Tartaglia, der niemals Geschütze bedient oder auch nur mit einem Gewehr geschossen hatte, erklärte – nur von theoretischen Erwägungen ausgehend –, daß die Kanone unter einem Winkel von 45° zum Horizont gerichtet sein müsse. Offensichtlich hatte Tartaglia schon damals im Gegensatz zu seinen Zeitgenossen wenigstens verschwommene Vorstellungen von dem Beharrungsvermögen der Bewegung, von der Schwerkraft, die auf die Kugel einwirkt, sobald sie den Lauf verläßt, und vom Charakter der Bewegungen. Im Laufe der nächsten Jahre entwickelte er seine theoretischen Ansichten über die Bewegungen des Geschosses und veröffentlichte sie 1537 in der „Neuen Wissenschaft“. Diese Unterweisung im Richten von Geschützen war sehr wertvoll, da Italien zu dieser Zeit von einer türkischen Invasion bedroht wurde.

„Es erscheint mir unangebracht“, schrieb Tartaglia, „weiter diese Dinge geheim zu halten; und darum habe ich beschlossen, jeden wahren Christen-

menschen mit ihnen mündlich oder schriftlich vertraut zu machen, damit er für den Angriff wie auch für die Verteidigung besser gewappnet sei.“

Bis zu jener Zeit waren nicht nur die gelehrten Anhänger des Aristoteles, sondern auch die Artilleristen selbst überzeugt, daß das Geschoß bei genügender Bewegungsenergie in gerader Linie ins Ziel treffe. Tartaglia erkannte als erster, daß die Flugbahn des Geschosses infolge seines Gewichtes zur Kurve wird, sobald das Geschoß den Lauf verläßt. Darum kann es das bezeichnete Ziel nicht treffen, wenn diese Abweichung von der Geraden nicht berücksichtigt wird.

„Die neue Wissenschaft“ war die erste im Geiste einer rationalen Mechanik verfaßte Abhandlung, obwohl Tartaglia noch nicht wagte, den allgemein herrschenden Vorstellungen allzu scharf zu widersprechen, und das Zugeständnis machte, daß die Geschoßbahn am Anfang und am Ende nur wenig von der Geraden abweiche. Die Artilleristen ließen sich von ihm fast bis zur Mitte des 17. Jahrhunderts leiten.

Einige Schüler Tartaglias entwickelten seine Lehre weiter. So wurde dieser Autodidakt zum Gründer einer ganzen Schule von mathematisch versierten Mechanikern und Experimentatoren. Seine Anhänger verkündeten offen, daß die aristotelische Mechanik mit der Praxis unvereinbar sei.

Ein bedeutender Fortschritt in den Anschauungen über den freien Fall wurde durch ein Werk Giovanni Benedettis (1530–1590), eines Schülers von Tartaglia, erreicht, das gegen Ende seines Lebens erschien. Dieses Werk wurde von den Anhängern des Aristoteles totgeschwiegen, da es Ansichten enthielt, die mit der aristotelischen Mechanik nicht übereinstimmten, und da sein Verfasser ein geschickter Dialektiker war und sich seine Gegner von einer Auseinandersetzung mit ihm keinen Erfolg versprachen. Benedetti behauptete, daß alle Körper mit der gleichen Geschwindigkeit fallen. Er hatte bereits eine gewisse Vorstellung von dem Beharrungsvermögen des sich bewegenden Körpers und verwarf die Meinung der Anhänger des Aristoteles, daß die Bewegung eines geworfenen Steines von den Stößen der Luft aufgehalten werde.

Um aber die rein spekulative Bewegungslehre des Aristoteles durch eine rationale Dynamik zu ersetzen, genügte es nicht, nur auf die Fehlerhaftigkeit einiger seiner Lehrsätze hinzuweisen, vielmehr mußte man eine neue

Theorie der Bewegung der fallenden Körper schaffen. Diese Aufgabe löste erst Galileo Galilei (vgl. Seite 83 ff.).

Galilei wurde in Pisa als Sohn eines verarmten italienischen Adligen geboren, der bald nach Florenz übersiedelte. Sein Vater, Vincenzo Galilei, trieb Musikgeschichte und Mathematik. Galilei, der spätere Begründer der modernen Mechanik, wuchs so in einer Atmosphäre wissenschaftlicher und musischer Interessen auf. Gleichzeitig zeigte Galilei von Kindheit an Neigung und Geschick zur Technik und fertigte mit großem Eifer verschiedene Apparate und Mechanismen an. Obwohl Vincenzo Galilei seinen Sohn für die kaufmännische Laufbahn vorgesehen hatte, änderte er seine Absichten, als er sah, wie sehr der Jüngling zu wissenschaftlichen Leistungen befähigt war. Der junge Galilei besuchte die Universität von Pisa.

Aber die spekulative Richtung des Lehrbetriebs interessierte Galilei nicht. Der Lehrplan und die Unterrichtsmethoden entsprachen dort völlig der scholastischen Tradition. Galilei brachte das ursprünglich begonnene Medizinstudium nicht zum Abschluß und wandte sich im Alter von 20 Jahren dem Studium der exakten Wissenschaften und der Mathematik zu.

Die ersten Kenntnisse in diesen Wissenschaften erhielt er von dem Privatlehrer Ostilio Ricci, der die jungen Florentiner unterrichtete und in der florentinischen Kunstakademie Vorlesungen hielt.

Die erhaltenen Konспекte der Vorlesungen Riccis beweisen, daß gerade der Unterricht dieses wenig bekannten Mathematikers richtungsweisend für die ersten Untersuchungen war, die Galilei schon in seiner Studentenzeit unternahm.

Ricci, ein Anhänger Tartaglias, betrachtete in seinen Vorlesungen nur die praktischen Anwendungen der Mechanik. Gerade diese Vorlesungen und nicht die scholastische Bildung und die aristotelische Mechanik gaben Galilei den Anstoß zu seinen Untersuchungen.

Schon im Alter von 25 Jahren wurde Galilei Professor an der Universität zu Pisa. Er hatte die Studenten in der euklidischen Geometrie und der ptolemäischen Astronomie zu unterweisen. Seine ganze Freizeit widmete Galilei jedoch selbständigen Untersuchungen.

Am Anfang seiner Tätigkeit behandelte Galilei, der Tradition der Ingenieure und Mathematiker der Renaissance folgend, in vielen Arbeiten

theoretische Fragen, die mit dem Festungsbau und der Verwendung von Feuerwaffen in Zusammenhang standen.

Einige Jahre lang beschäftigte er sich mit praktischen technischen Fragen. Er richtete sich eine Werkstatt ein, wo er verschiedene Instrumente und Apparate anfertigte, und unterrichtete junge Leute in der Lehre vom Festungsbau – worüber er zwei Traktate geschrieben hat –, in der Artillerietechnik, der Geländeaufnahme und anderen angewandten Wissenschaften.

Diese Tätigkeit verband sich mit intensiven theoretischen Untersuchungen auf dem Gebiete der Mechanik. Gerade diese Untersuchungen, die von seinen Zeitgenossen nicht genügend gewürdigt wurden, zeugen von der Genialität Galileis. Wie der hervorragende französische Mathematiker und Physiker Lagrange (1736–1813) in seiner „Analytischen Mechanik“ sagte, „erforderte die Entdeckung der Trabanten des Jupiter, der Phasen der Venus, der Sonnenflecken usw. nur ein Teleskop und einen gewissen Fleiß, hingegen bedurfte es eines ungewöhnlichen Genius, um die Gesetze der Natur an Erscheinungen zu entdecken, die immer vor Augen standen, aber deren Erklärung sich den Nachforschungen der Philosophen stets entzogen hatte.“

Galilei war ein hervorragender Vertreter des neuen Gelehrtentyps. Er war nicht nur ein Empiriker, sondern auch ein Experimentator, der seine Versuchsanordnungen ständig variierte. Bei seinen Untersuchungen hielt er sich an die Regel, daß „es viel wichtiger ist, eine ganz einfache Wahrheit zu finden, als auf die umständlichste Weise über die höchsten Dinge zu diskutieren, ohne überhaupt zu irgendeiner Wahrheit zu gelangen“.

Schon zu Beginn seiner wissenschaftlichen Tätigkeit zeigte Galilei großes Interesse für Probleme, die mit der Schwerkraft zusammenhängen. Er unternahm es auch, die Flugbahn einer Kanonenkugel zu bestimmen. Im Gegensatz zu seinen Vorgängern sah Galilei in dieser praktischen Frage das tiefst wissenschaftliche Problem der Bewegung eines sich im Schwerfeld der Erde bewegenden Körpers. Bevor er noch die Form der Flugbahn des Geschosses untersuchte, fand er die Gesetze des freien Falls.

Wir wissen, daß Galilei schon während seines Universitätsstudiums in Pisa den Isochronismus der Pendelschwingungen entdeckte und ihn zum Messen der Zeit anwandte. Obwohl einige Autoren dies in Abrede stellen,

war Galilei schon damals ein bewußter Gegner der aristotelischen Mechanik, denn seit 1589 sprach er sich in seinen Vorlesungen an der Universität von Pisa offen gegen die Lehre des Aristoteles vom Fall aus.

Galilei widerlegte nach dem Vorbild von Benedetti zuerst rein logisch die Ansicht des Aristoteles, nach der die Fallgeschwindigkeit vom Gewicht des Körpers abhängt. Er stellte dabei folgende Frage: Wenn ein leichter Körper langsamer als ein schwerer fallen soll, wie werden dann beide Körper fallen, wenn sie miteinander verbunden sind? Da das Gewicht der miteinander verbundenen Körper zusammen größer ist als das Gewicht jedes einzelnen, so müßten sie schneller fallen als der schwere Körper. Aber zugleich wird der leichte Körper den Fall des schweren hemmen, und darum müßten sie, miteinander verbunden, langsamer fallen als ein schwerer Körper. Obwohl schon dieser Widerspruch die Unrichtigkeit der Hypothese des Aristoteles bewies, genügten doch die rein logischen Beweise nicht, um dessen allgemein anerkannte Ansichten über den Fall der Körper zu widerlegen. Derartige Beweise befriedigten auch Galilei selbst nicht; er hielt es für nötig, sie durch ein Experiment zu bestätigen.

Der freie Fall von Körpern ließ sich gut beobachten, wenn man sie vom schiefen Turm von Pisa hinabwarf. So verfuhr denn auch Galilei. Er warf gleichzeitig Körper von verschiedener Größe hinab und sah, daß sie gleichzeitig auf die Erde fielen, wenn man von dem unbedeutenden Geschwindigkeitsunterschied absieht, der daraus resultiert, daß sich der Luftwiderstand stärker auf den Fall kleiner Körper auswirkt. Diese Versuche des jungen Gelehrten wurden zuerst von den Professoren „übersehen“. Als man sie aber nicht länger ignorieren konnte, bestritten die Scholastiker die Beweiskraft der Versuchsergebnisse mit dem Hinweis auf den unbedeutenden Unterschied in der Fallgeschwindigkeit der kleinen und der großen Körper. Sie behaupteten, daß der Unterschied noch größer gewesen wäre, wenn die Körper von einer Höhe von 1000 Fuß herabgeworfen worden wären. Galileis Untersuchungen erregten bei den übrigen Professoren stärksten Unwillen. Er mußte Pisa verlassen und an die Universität von Padua gehen, wo er sich weiter mit der Dynamik beschäftigte.

Im Unterschied zu Aristoteles ging Galilei von früher bewiesenen unwiderlegbaren Lehrsätzen aus und erhärtete die Richtigkeit der Schlußfolge-

rungen durch Versuche. Von seiner Untersuchungsmethode sagte er in seinem Frühwerk „Von der Bewegung“: „... Wir werden eine Methode anwenden, bei der das zu Beweisende aus dem Bewiesenen gefolgert wird, und ich werde niemals, soweit es möglich sein wird, etwas zugrunde legen, was noch bewiesen werden muß, sondern nur das Wahre. Diese Methode haben mich meine Mathematiker gelehrt, einige Philosophen jedoch wenden sie nicht zur Genüge an, sondern nehmen gewöhnlich beim Unterricht in den Anfängen der Physik das als Grundlage, was in den Büchern von der Seele oder in den Büchern vom Himmel oder sogar in der Metaphysik gesagt wird . . . und leiten ihre Lehre nicht aus dem ab, was gut bekannt ist, sondern kurzerhand aus dem Unbekannten und Unerhörten.“

Da er die beschleunigte Fallbewegung für eine feststehende Tatsache hielt, nahm Galilei an, daß die Beschleunigung gleichmäßig erfolgt, d. h. daß die Geschwindigkeit des fallenden Körpers in gleichen Zeiträumen um den gleichen Betrag zunehme. Unter dieser Voraussetzung entwickelte Galilei die Gesetze des freien Falls, wobei er den Begriff des Beharrungsvermögens der Bewegung einführte, den Aristoteles nicht kannte.

Alle Philosophen des Altertums kannten die „Trägheit“ der Körper oder ihr Beharrungsvermögen im Ruhezustand, d. h. ihre Unfähigkeit, ohne Einwirkung einer Kraft in Bewegung zu geraten. Galilei erkannte jedoch bereits – wenn er es auch bei seinen ersten Untersuchungen zunächst nur vermutete –, daß auch der sich bewegende Körper bestrebt ist, die Geschwindigkeit und die Richtung der Bewegung beizubehalten, und daß diese nur durch die Einwirkung einer Kraft verändert werden können.

Im „Dialog über die zwei Weltsysteme“ findet sich schon die folgende Betrachtung über das Beharrungsvermögen der Bewegung: „Auf einer schiefen Ebene . . . bewegt sich ein schwerer Körper nach unten in beschleunigter Bewegung; um ihn zum Stillstand zu bringen, muß man Kraft anwenden: auf einer ansteigenden Ebene wird die Kraft im Gegenteil dazu gebraucht, um den Körper hinaufzubewegen und auch, um ihn dort festzuhalten . . . Sagen Sie nun, was aus dem gleichen Körper auf einer Ebene wird, die sich weder senkt noch erhebt!“ Auf diese Frage erfolgt die Antwort, daß, „wenn ihre Länge unendlich ist, auch die Bewegung ohne Grenzen – d. h. ewig – sein muß.“

Auf Grund der Annahme, daß die Beschleunigung der fallenden Körper gleichmäßig erfolgt, und von dem Begriffe des Beharrungsvermögens der Bewegung ausgehend, leitete Galilei die Gesetze des freien Falls zuerst theoretisch ab:

Zu Beginn des Falls ist der Körper unbeweglich, d. h., die Geschwindigkeit seiner Bewegung ist gleich Null; nach Ablauf einer Sekunde muß die Geschwindigkeit gleich der Beschleunigung sein; in der Folge wird die Geschwindigkeit unter dem Einfluß der Schwerkraft in jeder Sekunde um die Größe der Beschleunigung anwachsen; darum ist die Geschwindigkeit eines frei fallenden Körpers am Ende einer beliebigen Zeitspanne gleich dem Produkt aus der Beschleunigung und der Zahl der Sekunden, die seit dem Augenblick des Falls verstrichen sind.

Hieraus ergibt sich die in der Mechanik bekannte Formel $v = bt$, wobei v die Geschwindigkeit am Ende der Zeitspanne t ist und b die Beschleunigung, die man nur experimentell ermitteln kann.

Der in einem bestimmten Zeitraum durchlaufene Weg ist leicht zu finden, wenn man den Begriff der Durchschnittsgeschwindigkeit einführt. Da die Geschwindigkeit anfangs gleich Null und am Ende eines gewissen Zeitraumes gleich dem Produkt aus der Beschleunigung und der Zahl der seit Beginn des Falls verstrichenen Sekunden ist, so muß die Durchschnittsgeschwindigkeit gleich der Hälfte dieses Produkts sein. Der zurückgelegte Weg aber ist gleich dem Produkt aus der Durchschnittsgeschwindigkeit und der Zahl der Sekunden, d. h. der Hälfte des Produkts aus der Beschleunigung und dem Quadrat der Zahl der Sekunden; in die Sprache der Mathematik übertragen:

$$\frac{0 + bt}{2} = \frac{bt}{2},$$

$$s = \frac{bt}{2} \cdot t = \frac{b}{2} t^2.$$

Dabei ist unschwer zu folgern, daß der Weg, der in den folgenden Sekunden durchlaufen wird, der natürlichen Reihe der ungeraden Zahlen proportional ist.

Man konnte die Richtigkeit der Fallgesetze nur experimentell prüfen, aber

der freie Fall geht so schnell vor sich, daß unter gewöhnlichen Bedingungen ein derartiger Versuch nur schwer durchzuführen ist. Man mußte den Fall verlangsamen, ohne den Charakter der Bewegung selbst zu ändern. Dazu benutzte Galilei die schiefe Ebene.

Die Eigenschaften der schiefen Ebene waren bereits einigen Gelehrten jener Zeit bekannt. So veröffentlichte der holländische Ingenieur und Physiker Stevin (1548–1620) einen Traktat „Die Elemente der Statik“, auf dessen Titelblatt eine im Gleichgewicht befindliche Kette aus Kugeln auf einer schiefen Ebene dargestellt war.

Es ist offensichtlich, daß Kugeln auf einer langen schiefen Ebene nicht gleiche Kugeln auf einer kurzen herüberziehen können. Anderenfalls würde die ganze Kette in beständige Bewegung geraten, was unmöglich ist. Daraus folgert Stevin, daß die Kraft, die eine Kugel auf der schiefen Ebene hinuntreibt, im gleichen Verhältnis zu ihrem Gewicht steht, wie die Höhe zur Länge der schiefen Ebene.

Wenn Galilei auch Stevins Werk nicht kannte, so wußte er doch von dieser Eigenschaft der schiefen Ebene und bediente sich ihrer auch, um die Gesetze des freien Falls zu studieren, wobei er das langsamere Hinunterrollen der Kugeln auf der schiefen Ebene beobachtete.

Die Bewegung der Kugeln auf der schiefen Ebene konnte man beliebig durch die Verringerung ihrer Neigung verlangsamen. Folglich war es leicht, beim Versuch den Weg zu bestimmen, den die rollende Kugel im Laufe einer bestimmten Zahl von Sekunden zurücklegte. Aber auch auf der schiefen Ebene konnte man die stetig wachsende Geschwindigkeit nicht messen und noch weniger die Beschleunigung, sondern lediglich den Weg, den die Kugel im Laufe einer gewissen Zeit zurückgelegt hatte. Das genügt jedoch, um die Richtigkeit der von Galilei gefolgerten Gesetze des freien Falls zu überprüfen.

Für diese Versuche nahm Galilei ein zwölf Ellen langes Brett, dessen eines Ende um ein bis zwei Ellen erhoben war. Durch Beobachtung der Bewegung bronzenen Kügelchen, die auf diesem Brett über eine glatte Laufrinne rollten, und durch Messen der Zeit mit der Wasseruhr stellte Galilei fest, daß das Hinabrollen der Kügelchen über die schiefe Ebene den Gesetzen des freien Falls der Körper unterliegt, die er theoretisch erschlossen

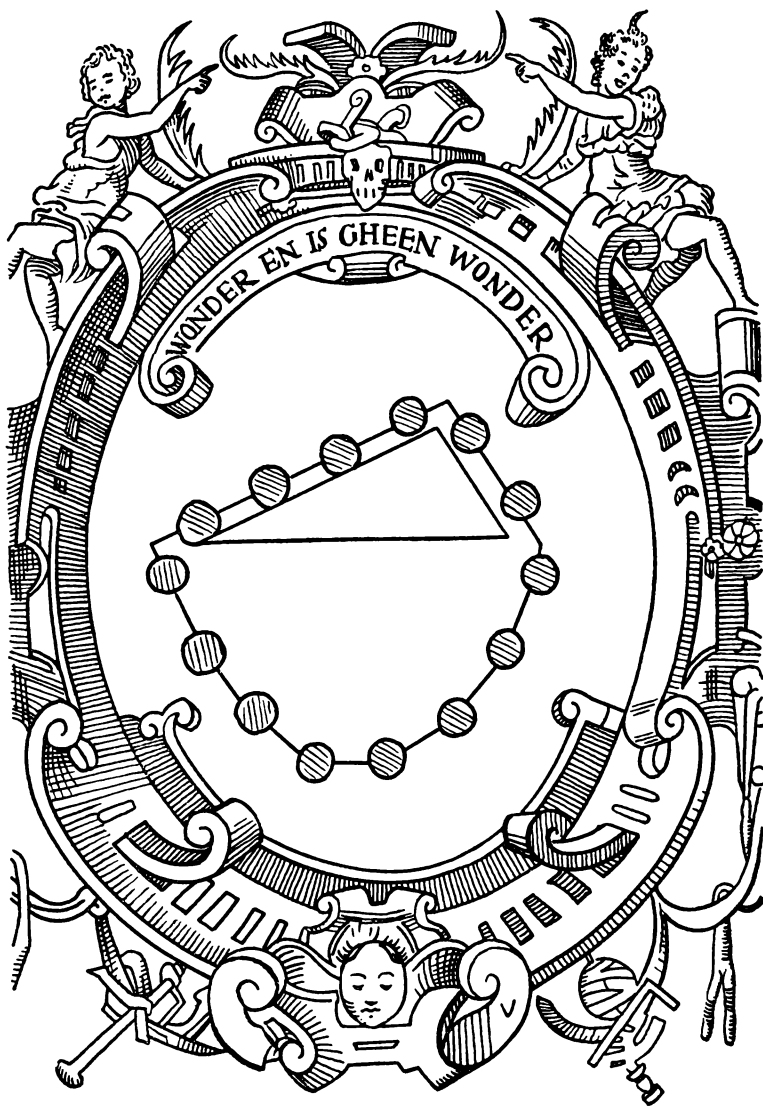


Abb.7 Gleichgewicht der Kugeln auf der schiefen Ebene nach Stevin

hatte. Daraus folgerte Galilei, daß seine Vermutung hinsichtlich der gleichmäßigen Beschleunigung richtig war.

Durch Versuche und logische Schlüsse ermittelte Galilei, daß die Beschleunigung der herabrollenden Kugel zur Beschleunigung beim freien Fall im gleichen Verhältnis steht wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Länge. Folglich konnte man die Beschleunigung des freien Falls berechnen, indem man die Beschleunigung des Falls auf einer schiefen Ebene durch Versuch bestimmte – und das konnte leicht geschehen, wenn man beobachtete, welche Strecke die Kugel beim Herabrollen über eine schiefe Ebene im Laufe einer bestimmten Zahl von Sekunden durchläuft. Wenn diese Entfernung gleich l ist, so kann man leicht aus der Formel $l = \frac{bt^2}{2}$ die Beschleunigung b auf der schiefen Ebene finden. Wenn man das Verhältnis der Länge der schiefen Ebene zu ihrer Höhe kennt, kann man daraus auch die Beschleunigung des freien Falls erschließen.

Diese theoretischen Untersuchungen gaben Galilei die Möglichkeit, auch das Problem der Geschoßflugbahn zu klären.

Die horizontal abgeschossene Kugel muß sich gleichmäßig bewegen (wenn man von der Verlangsamung durch den Luftwiderstand absieht). Sobald sie den Lauf verläßt, beginnt sie zu fallen, und in jeder folgenden Sekunde legt sie im freien Fall Entfernungen zurück, die der natürlichen Reihe der ungeraden Zahlen proportional sind. Bis zum Ablauf der ersten Sekunde wird die Kugel – angenommen – 1000 m durchfliegen und sich gleichzeitig um so viel Meter senken, wie ein fallender Körper in der ersten Sekunde durchläuft, d. h. um 4,9 m. Während der zweiten Sekunde wird die Kugel in horizontaler Richtung weitere 1000 m zurücklegen und sich noch um $4,9 \times 3 = 14,7$ m senken. In der dritten Sekunde wird sich die Kugel bei derselben Bewegung in der Horizontalen um $4,9 \times 5 = 24,5$ m senken usw.

Da das Fallen der Kugel wie auch ihre fortschreitende Bewegung ununterbrochen erfolgen, so muß sie in einer Kurve fliegen („Wurfparabel“) und sich allmählich der Erdoberfläche nähern, bis sie auf sie fällt. Ohne der Ursache der Bewegung und der Schwere nachzugehen, entdeckte Galilei die Fallgesetze der Körper, d. h. die Gesetze ihrer Bewegung im Schwerkraftfeld der Erde. Galilei berichtete in seinem Werk „Lehre von der Bewegung

unter dem Einfluß der Schwere“, das er 1609 in Padua schrieb, von seinen Forschungen über die Wirkung der Schwere, durch die den Körpern Bewegung mitgeteilt wird. Später gab er in seinem Hauptwerk „Gespräche und mathematische Beweise von zwei neuen Wissenschaften“ (1638) eine systematische Darlegung einer Dynamik, deren einzelne Lehrsätze im „Dialog über die zwei Weltsysteme“ enthalten sind. Die „Gespräche“, die schon nach der Verurteilung Galileis durch die Inquisition geschrieben wurden, konnten in Italien nicht erscheinen und wurden in Leiden herausgegeben. In diesem Werk sind Fragen der Mechanik, der Akustik, der Molekularphysik und des Materialwiderstandes angeschnitten. Das Gesetz des Beharrungsvermögens der Bewegung ist in folgender Weise formuliert: „Wenn ein Körper sich auf einer horizontalen Fläche bewegt, ohne irgendeinen Widerstand zu finden, so . . . ist seine Bewegung gleichmäßig und würde unendlich weiterdauern, wenn die Fläche sich im Raum ins Unendliche ausdehnte.“

Dieses Gesetz, das später noch exakter formuliert wurde, ist eines der Grundgesetze der modernen Dynamik und der von Newton geschaffenen rationalen Himmelsmechanik, die die Bewegungen der Weltkörper behandelt.

DIE SCHWERKRAFT UND DIE MASSE DER ERDE

Es gelang Galilei nicht, die Grenzen der „irdischen“ Dynamik zu überschreiten, obwohl er versuchte, die Regeln der Pendelschwingungen auf die Bewegung der Erde mit dem Mond um die Sonne anzuwenden, da er glaubte, daß zur Zeit des Vollmondes dieses „Pendel“ länger werde und die Bewegung der Erde auf ihrer Bahn langsamer sein müsse, als wenn der Mond zur Sonne in Konjunktur steht. Man konnte jedoch die Himmelsmechanik erst aufbauen, nachdem man entdeckt hatte, daß die Schwerkraft zwischen den Himmelskörpern wirkt, und nachdem man auf diese Körper die galileische Dynamik angewandt hatte.

Sogar die größten Geister des 15. und 16. Jahrhunderts hatten nur primitive Vorstellungen von dem „Gleichgewicht“ der Himmelskörper. Leonardo da Vinci teilte in dieser Frage noch die Ansicht des Lucretius Carus, der anderthalb Jahrtausende vor ihm gelebt hatte. „Der Mond ist dicht, und da er dicht ist, ist er schwer; da er schwer ist, so kann er nicht vom Raum getragen werden, den er einnimmt“, schrieb Leonardo. „Darum muß er zum Mittelpunkt des Weltalls hinabsinken und sich mit der Erde vereinigen... Aber das tritt nicht ein: Ein klares Zeugnis dafür, daß der Mond mit seinen Elementen ausgestattet ist, dem Wasser, der Luft und dem Feuer, und sich auf diese Weise in sich und durch sich selbst im Raum hält, ebenso wie unsere Erde mit ihren Elementen in einem anderen Raum.“

Aus diesen Worten kann man ersehen, wie schwer sich die Vorstellung von kosmischen Körpern, die sich frei im Raum bewegten, damals durchsetzte, wie im Geist der Menschen noch die Idee vom absoluten „Unten“ herrschte, dem die schweren kosmischen Körper zustreben.

Damit sich die neuzeitlichen kosmologischen Anschauungen herausbilden konnten, mußte man sich völlig von der Idee des absoluten „Unten“ und „Oben“ lossagen, sich den Begriff des Beharrungsvermögens erarbeiten und die Vorstellung von der Schwere bis zur Formulierung eines für das ganze Weltall gültigen Schwerkraftgesetzes weiter entwickeln.

Die Idee vom absoluten „Oben“ und „Unten“ mußte natürlich verschwinden, als man die Schwere nicht mehr als nur irdische Erscheinung betrachtete und es klar wurde, daß sie allen Körpern im Weltall eigen ist.

Schon Kopernikus sprach den Gedanken aus, daß „die Schwere nichts anderes ist als das natürliche Bestreben, das die göttliche Vorsehung des Schöpfers der Welten den Teilen gegeben hat, damit sie sich in Sphärenform zu einem Ganzen verbinden und vereinigen. Ein solches Bestreben ist wahrscheinlich der Sonne, dem Mond und den anderen wandelnden Himmelslichtern eigen, und dank seiner Wirkung behalten sie ihre offensichtliche Kugelform“.

Hiermit hatte Kopernikus den Begriff der Schwere auch auf kosmische Erscheinungen ausgedehnt und war so der Idee einer im ganzen Weltall wirkenden Schwerkraft um einen großen Schritt näher gekommen.

Kepler ging in dieser Richtung noch weiter, als er annahm, daß sich die Wirkung der irdischen Schwere auch auf den Mond erstreckt. In seiner „Neuen Astronomie“, die 1609 erschien, schrieb er: „Die Schwere ist die gegenseitige Neigung zwischen verwandten Körpern, die bestrebt sind, sich zu verschmelzen, sich zu vereinen; die magnetische Fähigkeit ist eine Eigenschaft derselben Ordnung: Die Erde zieht einen Stein eher an, als daß der Stein zur Erde strebt. Wenn wir sogar den Mittelpunkt der Erde in den Mittelpunkt der Welt legen würden, so würden die schweren Körper nicht von diesem letzten Mittelpunkt angezogen werden, sondern vom Mittelpunkt des runden Körpers, dem sie verwandt sind, d. h. vom Mittelpunkt der Erde. An welchen Ort wir auch die Erde versetzen, werden die schweren Körper infolge der ihnen charakteristischen Eigenart sich stets auf sie hinbewegen.“

Kepler hat nicht nur klar den Gedanken formuliert, daß die Schwere der Einfluß der Erde auf die sie umgebenden Körper ist, sondern hat ihn erweitert als gegenseitige Anziehung zwischen den kosmischen Körpern gefaßt. „Wenn ihr Umlauf nicht von irgendeiner lebendigen Kraft aufrechterhalten wird“, schrieb er, „müßten der Mond und die Erde sich vereinen, wobei der Mond sich um 53 Teile und die Erde um einen einzigen Teil ihres Abstands nähern würde, wenn man die gleiche Dichte für beide Körper annimmt.“

Eine Bestätigung für die wechselseitige Anziehung der Erde und des Mondes sah Kepler vollkommen richtig in den Gezeiten. In der „Neuen Astronomie“ schrieb er, daß man die Wirkung der Anziehungskraft des Mondes auf die Erde deutlich auf den Meeren sehen könne. Die Meere würden sich vollkommen auf den Mond ergießen, wenn die Erde sie nicht zurückhielte. Da die Erde sie aber zurückhält, entsteht an der Stelle, über der der Mond senkrecht steht, auf dem Meereswasser ein Berg, der die Flut bedingt. Die Flut folgt der Bewegung des Mondes um die Erde, bleibt jedoch letzten Endes hinter ihr zurück, da sie sich nicht mit dem Mond an Geschwindigkeit messen kann.

Schließlich verglich Kepler in der „Harmonie der Welt“ die Veränderung der Schwerkraft bei wechselnder Entfernung mit der Stärke des Lichtes und stellte fest, daß auch die Schwere indirekt proportional zum Quadrat der Entfernung abnehmen muß.

Von den Ideen und Gesetzen der Dynamik Galileis ausgehend, hätte Kepler den Mechanismus der Bewegung des Mondes mit seiner fast kreisförmigen Bahn erklären können. Aber die Gesetze der rationalen Dynamik waren ihm nicht bekannt, und von dem Beharrungsvermögen der Bewegung hatte Kepler keine Ahnung. Vom Standpunkt der aristotelischen Mechanik aus erklärte er die Bewegung des Mondes wie auch die der Planeten mit einer gewissen Kraft, die sie stets in Bewegung setzt.

Galilei jedoch, der sich in seinen Schlußfolgerungen über den freien Fall von dem Gesetz des Beharrungsvermögens leiten ließ, lehnte den Gedanken einer Fernwirkung zwischen kosmischen Körpern ab. Er vermied es sorgfältig, die Schwere so zu betrachten wie Kepler, da er darin eine Rückkehr zu den „verborgenen Eigenschaften“ der Aristoteliker sah. Er lehnte es ab, die Gesetze der Dynamik auf die unter dem Einfluß der Schwerkraft erfolgende Bewegung des Mondes anzuwenden und schrieb einem Freunde ironisch: „Sagen doch die Philosophen, daß der Mond und die anderen Planeten nicht fallen, weil sie die Geschwindigkeit ihrer Bewegung davor bewahrt. Oh, was für tiefsinnige Betrachtungen!“

Keplers Erklärungen der Gezeiten aus der Anziehung des Mondes wird von Galilei verworfen. „Anzunehmen, daß hier der Mond wirkt und daß er solche Erscheinungen hervorruft, das alles ist meinem Verstand vollkom-

men zuwider“, läßt er Salviati im „Dialog“ sagen. Aber drei Jahrzehnte später war die Idee der kosmischen Schwerkraft schon im Bewußtsein der Gelehrten gereift. Sie trat auf die eine oder andere Weise in den Arbeiten der Physiker und Mechaniker der sechziger Jahre des 17. Jahrhunderts immer wieder auf.

Das Streben eines sich auf einer kreisförmigen Bahn bewegenden Planeten, sich von der Sonne zu entfernen, ist sein Beharrungswiderstand, der damals die Bezeichnung Zentrifugalkraft erhielt.¹ Der Begriff dieser Kraft wurde von Huygens (1629–1695) entwickelt, der 1673 die Ergebnisse seiner Untersuchungen veröffentlichte. Bei der Betrachtung der kreisförmigen Bewegung eines Körpers fand Huygens, daß er eine Zentripetalbeschleunigung haben muß, die die Beschleunigung aufhebt, die durch die zentrifugale Kraft in der entgegengesetzten Richtung gegeben ist. Diese Beschleunigung ist gleich dem Quadrat der Bahngeschwindigkeit, geteilt durch die Länge des Kreisradius.

In den siebziger Jahren des 17. Jahrhunderts tauchte bei vielen Gelehrten der Gedanke an eine zentrale Kraft auf, die die Planeten in ihren Bahnen hielt. So veröffentlichte der englische Physiker Robert Hooke (1635–1703) im Jahre 1674 eine große Abhandlung unter dem Titel „Versuch, die jährliche Bewegung auf Grund von Beobachtungen zu erklären“. Hierin schrieb er: „Ich werde ein Weltsystem darlegen, das sich von den bis jetzt bekannten Systemen in vielen Einzelheiten unterscheidet, aber in jeder Beziehung mit den allgemeinen mechanischen Gesetzen übereinstimmt. Es knüpft an drei Voraussetzungen an. Erstens, daß alle Himmelskörper nach ihren Mittelpunkten hin eine Anziehungskraft ausüben, wobei sie nicht nur ihre eigenen Teile anziehen, wie wir es auf der Erde beobachteten, sondern auch andere Himmelskörper, die sich in ihrer Wirkungssphäre befinden. Die zweite Voraussetzung besteht darin, daß jeder Körper, der einmal eine einfache geradlinige Bewegung erhalten hat, sich weiterhin geradlinig fort-

¹ In der modernen Mechanik nennt man Zentrifugalkraft die nach dem dritten Gesetz von Newton entstehende Gegenwirkung zur Zentripetalkraft, der nach dem Mittelpunkt hin wirkenden Kraft bei Drehbewegungen. Die Zentrifugalkraft wirkt auf den Körper, der einen um ihn kreisenden Körper zurückhält. Wird z. B. ein Gewicht an einem Faden um die Hand geschwungen, so wirkt die Zentrifugalkraft mittels des Fadens auf die Hand. Bei den Kreisen des Mondes um die Erde hält die Zentrifugalkraft, die als Gegenwirkung der Zentripetalkraft entsteht, den Mond in seiner Bahn.

bewegt, bis er von seiner Bewegung durch eine andere wirkende Kraft abgelenkt und gezwungen wird, einen Kreis, eine Ellipse oder eine andere komplizierte Linie zu beschreiben. Die dritte Voraussetzung besteht darin, daß die anziehenden Kräfte um so stärker wirken, je näher der Körper, auf den sie einwirken, dem Mittelpunkt der Anziehung ist.“

Wenn Hooke Mathematiker gewesen wäre, hätte er auf diesen Hypothesen ein Weltsystem aufbauen und hieraus die Bewegungsgesetze der Planeten ableiten können.

Hookes Voraussetzungen konnte man z. B. auf den Umlauf des Mondes um die Erde anwenden, wenn man seine Lage auf der Bahn als Ergebnis des Gleichgewichtes zwischen seiner Anziehung durch die Erde und der Zentrifugalkraft ansah, d. h. als Ergebnis der Gleichheit der zentripetalen und zentrifugalen Beschleunigung.

Eine solche Methode wandte auch der große englische Physiker und Mathematiker Isaak Newton (1643–1727) an, dem das Verdienst zukommt, das Gesetz von der allgemeinen Gravitation begründet zu haben.

Newton, der Sohn eines Farmers, studierte in Cambridge euklidische Geometrie, Trigonometrie, Astronomie, Mechanik und Theologie. 1669 erhielt er dort nach Beendigung seines Studiums einen Lehrstuhl. Noch als Student verbrachte Newton während einer Pestepidemie 1665 bis 1667 fast zwei Jahre auf seiner Farm und fand dort Zeit, sich mit mancherlei Fragen zu beschäftigen, insbesondere mit der Bewegung des Mondes.

Gerade in diesen Jahren löste der 24jährige Newton das Problem der Bewegung des Mondes durch die Annahme, daß er der Wirkung der Schwerkraft unterliegt. Er schrieb darüber später: „Im selben Jahre (1666) begann ich über die Schwerkraft nachzudenken, die sich bis zur Mondbahn erstreckt, und fand, wie man die Kraft einschätzen muß, mit der eine Kugel, die innerhalb einer Sphäre kreist, auf die Oberfläche dieser Sphäre drückt. Aus der Keplerschen Regel, daß die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten im gleichen Verhältnis zueinander wie die Kuben der großen Halbachsen ihrer Bahnen stehen, folgerte ich, daß die Kräfte, die die Planeten in ihren Bahnen halten, dem Quadrat ihres Abstands von den Mittelpunkten indirekt proportional sein müssen, um die sie sich bewegen. Daher verglich ich die Kraft, die erforderlich ist, um den Mond in seiner Bahn zu

halten, mit der Schwerkraft auf der Erdoberfläche und fand, daß sie einander fast entsprechen.“

Unter der Voraussetzung, daß die Schwerkraft sich im umgekehrten Verhältnis zu den Quadraten der Entfernungen verändert, berechnete Newton, wie groß die Beschleunigung des Mondes gegen die Erde sein müsse; er wußte ja, wieviel weiter der Mond vom Mittelpunkt der Erde entfernt ist als ein Körper, der an der Erdoberfläche fällt. Es erwies sich, daß die auf diese Weise errechnete Beschleunigung fast der gleich ist, die sich unter Zugrundelegung dessen ergibt, daß der Mond die Erde in ungefähr 27 Tagen in einem Abstand von etwa 60 Erdradien umläuft. Newton verglich den Umlauf des Mondes mit der Bewegung einer in horizontaler Richtung in geringer Höhe über der Erdoberfläche abgeschossenen Kugel.

Wenn die Geschwindigkeit des Geschosses so groß wäre, daß die Krümmung seiner Flugbahn nicht größer als die Krümmung der Erdoberfläche wäre, würde das Geschöß ewig um die Erde kreisen, sofern es keinen Luftwiderstand gäbe. In diesem Falle müßte das Geschöß mit einer Geschwindigkeit von mindestens 7,9 km/s, aber nicht mehr als 11,18 km/s, abgeschossen werden.

So war die Anziehung des Mondes durch die Erde bewiesen, d. h. die Existenz eines Gravitationsfeldes um die Erde, das sich bis zum Mond erstreckt und offensichtlich unbegrenzt ist. Und das ist eine Eigenschaft, die nicht nur der Erde eigen ist.

Newton bewies, daß die Schwerkraft das Fallen der Körper auf die Erde wie die Bewegungen der Planeten auf ihren Bahnen um die Sonne bestimmt. Er behauptete, daß alle Körper aufeinander eine Anziehungskraft ausüben, die ihrer Masse proportional ist. Jedes Teilchen eines Körpers wird von jedem Teilchen des anderen angezogen. Darum ist die Anziehungskraft zwischen zwei Körpern ihren Massen direkt proportional und dem Quadrat ihres Abstands umgekehrt proportional.

Über die Natur der Anziehungskraft äußerte sich Newton ebenso wenig wie Galilei. Aber auch in unserer Zeit kann man die Frage, warum eine große Bleikugel ein kleines Kügelchen anzieht und warum der Mond von der Erde angezogen wird, nicht beantworten.

Die Anziehungskraft der Körper ist eine verallgemeinerte Folgerung aus

Beobachtungen und Versuchen, die unbestreitbar ist. Sie ist eines der Prinzipien der Physik, für deren Erklärung Hypothesen entwickelt werden müssen.

„Ich behaupte durchaus nicht“, sagte Newton, „daß die Schwerkraft für die Körper wesentlich sei. Unter der innewohnenden Kraft (die den Körpern eigen ist. F. B.) verstehe ich nur die Kraft des Beharrungsvermögens. Sie ist unveränderlich. Die Schwere verringert sich bei der Entfernung von der Erde.“

Die vorsichtige Formulierung, die Newton dem allgemeinen Gravitationsgesetz gab, geriet bei seinen Anhängern und Nachfolgern in Vergessenheit. Newton und Descartes waren die Begründer der mechanistischen Richtung in der Physik. Descartes verkündete die mechanistische Lösung: „Gebt mir Materie und Bewegung, und ich werde die Welt aufbauen.“ Auch Newton wollte „aus den Prinzipien der Mechanik alle übrigen Naturerscheinungen erschließen“.

Descartes „baute die Welt“ deduktiv auf, wobei er von einigen durch Erfahrung ermittelten Axiomen ausging und sich von intuitiv entwickelten Hypothesen leiten ließ. Newton hingegen entwarf induktiv auf Grund der beobachteten Erscheinungen ein Bild von der Welt und folgerte aus den Beobachtungen die physikalischen Prinzipien; er erklärte dabei, daß er keine Hypothesen bilden wolle. „Die ganze Schwierigkeit der Physik“, schrieb Newton, „besteht darin, in den Bewegungserscheinungen die Naturkräfte zu erkennen und dann mit diesen Kräften die übrigen Erscheinungen zu erklären.“

Die Cartesianer, z. B. Huygens, erkannten keinerlei „Kräfte“ an. Alle Äußerungen von „Kräften“ schrieben sie der Bewegung von Körpern oder von Substanzteilchen zu, die unmittelbar durch Druck oder Stoß wirken. Sie leugneten, daß es eine Leere gebe. Die Newtonianer hielten die Materieteilchen für Mittelpunkte der Anziehungskraft, die aufeinander aus der Entfernung ohne Vermittlung irgendwelcher materieller Teilchen einwirken. Ihnen lag wenig daran, das Wesen der Schwerkraft zu ergründen, und sie begnügten sich damit, ihre Auswirkungen zu beobachten.

Auf diese Weise stellte Newton schon 1665 bis 1667 das Gesetz der Gravitation aller Himmelskörper auf, konnte damals aber die Richtigkeit seiner

Überlegungen nicht beweisen, da er die genaue Größe des Erdradius nicht kannte. Darum teilte er vorsichtigerweise niemand seine Vermutungen mit. Erst nach der Gradmessung von Picard konnte er berechnen, daß die Beschleunigung des Mondes zur Erde in der Tat durch die Schwerkraft hervorgerufen wird. Er zögerte jedoch noch immer, seine Hypothese zu veröffentlichen.

Die politischen Verhältnisse, unter denen Newton lebte, ließen große Vorsicht ratsam erscheinen. In England herrschte Kampf zwischen Adel und Bourgeoisie. Die schwierige Lage hatte Newton Kompromisse und Vorsicht bei der Veröffentlichung seiner Arbeiten gelehrt.

Nur auf Drängen seiner nächsten Freunde, hauptsächlich des Astronomen Edmund Halley (1656–1742), veröffentlichte Newton 1687 „Die mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie“.

Neben dem Begriff der Kraft war für die Entwicklung der Mechanik der von Newton präzipierte Begriff der Masse sehr wichtig. Newton führte den Begriff der „Masse“ eines Körpers ein, die er als „Stoffmenge“ bestimmte; er hielt das Beharrungsvermögen eines Körpers für das Charakteristikum seiner Masse und nicht das Gewicht, das sich bei Ortsveränderung gegenüber dem Mittelpunkt der Erde ändert – bei Messung mittels einer Federwaage, da man beim Wiegen auf einer gewöhnlichen Tafelwaage die Gewichtsveränderungen infolge der gleichzeitigen Gewichtsveränderung der Gewichte nicht bemerken kann. Der Trägheitswiderstand hingegen, den der Körper der auf ihn wirkenden Kraft entgegensetzt, bleibt unverändert. Die Einwirkung der Kraft besteht darin, daß sie dem Körper eine Beschleunigung mitteilt. Je größer die Masse des Körpers ist, um so größer ist sein Beharrungsvermögen und um so kleiner ist die Beschleunigung, die er durch eine auf ihn wirkende Kraft erhält.

Nehmen wir an, daß zwischen zwei leicht beweglichen, kleinen, gleichartigen Wagen eine Schraubenfeder eingespannt ist. Die Wagen sind mit einem Faden zusammengebunden, der auch die Feder zusammenhält. Sie stehen auf Gleisen, an denen sich ein langes Lineal mit Teilstrichen befindet. Wenn wir mit einer scharfen Schere den Faden zerschneiden, lösen wir die Feder aus. Die Feder schnellt auf und stößt die Wagen gleich weit fort. Wenn man jedoch einen der Wagen so belädt, daß er zusammen mit

der Last doppelt soviel wiegt wie der andere, so wird der beladene Wagen in derselben Zeit nur halb so weit rollen wie der leere.

Dies erklärt sich dadurch, daß der Beharrungswiderstand des beladenen Wagens doppelt so groß ist. Und wo wir auch diesen Versuch machen, am Pol oder am Äquator, werden die Wagen ebenso weit davonrollen, wie sich auch ihr Gewicht verändern mag. Selbst wenn wir einen solchen Versuch auf dem Mond durchführten, wo die Schwere der Wagen und der Last sich fast auf ein Sechstel verringern, würden die von der Feder fortgestoßenen Wagen so weit rollen wie auf der Erdoberfläche.

Der Beharrungswiderstand, den die Körper einer gewissen Kraft (z. B. dem Stoß einer Feder) entgegensetzen, dient als Maß für die Masse des Körpers.¹

Die Beschleunigung, die eine gegebene Kraft verschiedenen Körpern mitteilt, ist zu ihrer Masse umgekehrt proportional. Da frei fallende Körper unabhängig von ihrer Masse die gleiche Beschleunigung erhalten, ist der Schluß zwingend, daß die Anziehungskraft der Erde – und folglich der kosmischen Körper untereinander und die Anziehung beliebiger Körper auf ihnen – ihrer Masse direkt proportional ist.

Außerdem ist sie, wie Newton bewiesen hat, dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportional.

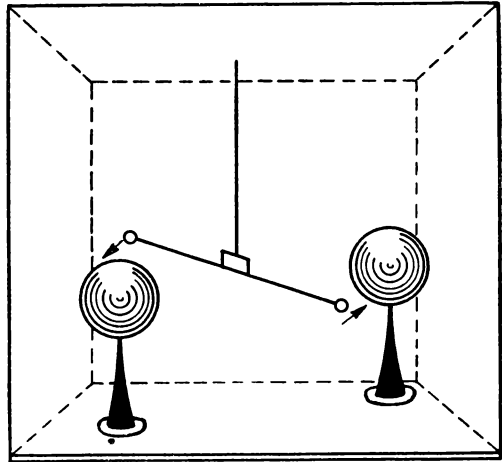
Auf diese Weise kann man die Masse der Erde aus der von ihr ausgehenden Anziehung der auf ihrer Oberfläche befindlichen Körper erschließen. Man kann sie z. B. mit der Masse einer großen Bleikugel vergleichen. Zu diesem Zweck muß man die Anziehung einer kleinen Kugel durch eine große Bleikugel mit ihrer Anziehung durch die Erde vergleichen.

Die gegenseitige Anziehung kleiner Körper ist aber sehr schwach, und Newton war bis zu seinem Tode überzeugt, daß sie nicht mittels der den Gelehrten verfügbaren Meßapparate nachgewiesen werden könne. Im Jahre 1798 gelang es dem englischen Physiker Cavendish (1731–1810) jedoch, die Anziehung einer kleinen Kugel durch eine große Bleikugel mit Hilfe der sogenannten Torsionswaage zu messen.

Die Torsionswaage ist ein leichter dünner Stab, der in der Mitte an einem Metall- oder Quarzfaden aufgehängt ist. An den Enden des Stabes sind an

¹ In der Physik unterscheidet man zuweilen eine „schwere“ und eine „träge“ Masse, wovon wir in diesem Falle absehen.

Abb. 8
Schema einer Torsionswaage



kurzen Fäden kleine Bleikugeln angehängt. Wenn man den Stab in der Horizontalen um einen gewissen Winkel dreht und ihn frei läßt, so führt er infolge der Elastizität des Fadens in der Horizontalen Schwingungen aus.

Durch Beobachtung der Schwingungsdauer der Torsionswaage berechnete Cavendish das Richtmoment des Fadens. Danach näherte er jeder kleinen Kugel eine große Bleikugel so, daß sie sich auf den entgegengesetzten Seiten des Stabes befanden (wie auf Abb. 8 angegeben). Als die großen Kugeln ungefähr 20 cm von den kleinen entfernt waren, setzten sich die kleinen Kugeln unter dem Einfluß ihrer Anziehungskraft in Bewegung und verdrillten den Faden. Nach dem Winkel, um den der Faden verdreht war, konnte er leicht die Anziehungskraft der großen Bleikugel bestimmen, da Cavendish den Torsionswiderstand des Fadens kannte.

Die Anziehung der kleinen Kugel durch die Erde war bekannt – es war ihr Gewicht. Wenn man das Gewicht der Kugel mit der Anziehungskraft der großen Bleikugel verglich und dabei den Abstand der kleinen Kugel vom Mittelpunkt der großen Kugel und vom Mittelpunkt der Erde berücksichtigte, konnte man die Masse des Erdballes berechnen. Da der Umfang der Erde bekannt war, ermittelte man auch ihre Durchschnittsdichte, die den Wert $5,52 \text{ g/cm}^3$ hat.

DIE VERÄNDERUNG DER SCHWERE UND DIE FORM DER ERDE

Zu Galileis Zeiten bestand kein Zweifel darüber, daß die Gravitation auf der ganzen Erdoberfläche die gleiche ist. Aber schon am Anfang der siebziger Jahre des 17. Jahrhunderts mußte man sich vom Gegenteil überzeugen. Es gelang, kleine Veränderungen der Schwerkraft an Pendelschwingungen festzustellen.

Wie schon erwähnt, lenkte Galilei als erster die Aufmerksamkeit auf das Pendel. Schon als Jüngling beobachtete er 1583 die Schwingungen der Kronleuchter in der Kathedrale von Pisa. Als er seinen eigenen Pulsschlag zählte, bemerkte Galilei, daß Pendel von gleicher Länge unabhängig von ihrem Gewicht die gleiche Schwingungsdauer besitzen und daß ihre Schwingungsdauer bei geringer Schwingungsweite nicht vom Winkel des Pendelausschlags abhängt. Die Gesetze der Pendelschwingungen wurden von Galilei und Huygens entdeckt, die die Schwingungen einer kleinen, schweren, an einem dünnen Faden aufgehängten Kugel studierten, die einem einfachen Pendel gleicht, d. h. einem schweren materiellen Punkt an einem praktisch gewichtlosen, nicht dehnbaren Faden.

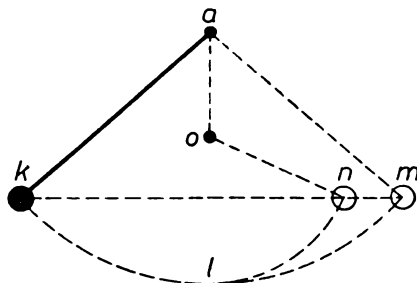
Infolge ihrer Schwere „fällt“ die Masse des aus der Vertikalen ausschlagenden Pendels, wird aber durch den Faden gehalten und bewegt sich auf einem Kreisbogen. Wenn das Pendel den untersten Punkt erreicht hat, setzt es infolge der Trägheit seine Bewegung fort und steigt bis zu der Höhe auf, von der sein Fall begann. Wenn im Aufhängepunkt keine Reibung erfolgt und es keinen Luftwiderstand gäbe, würde die Schwingung dank dem Beharrungsvermögen ewig fort dauern.

Galilei stellte durch einfache Versuche fest, daß die Schwingungsdauer des Pendels der Quadratwurzel aus seiner Länge proportional ist. Wenn man dem Faden des Pendels die neunfache Länge gibt, verdreifacht sich seine Schwingungsdauer. Wenn man umgekehrt den Faden auf ein Viertel seiner Länge verkürzt, verringert sich seine Schwingungsdauer um die Hälfte.

Die Untersuchung der Pendelbewegung wurde von Huygens fortgesetzt. Er kannte den bemerkenswerten Versuch Galileis, der bewiesen hatte, daß ein Körper, der sich nur unter der Wirkung der Schwere nach unten bewegt, eine Geschwindigkeit erhält, die nicht von dem von ihm durchlaufenen Weg abhängt, sondern allein von der Differenz der Höhen des Anfangs- und des Endpunktes dieses Weges.

Galilei hing eine kleine Masse an einem dünnen Faden im Punkt a auf, bewegte sie seitlich bis zum Punkt k und ließ sie los. Die Masse sank auf einem Kreisbogen hinab und gewann im niedrigsten Punkt l eine gewisse

Abb. 9
Pendelversuch Galileis



Geschwindigkeit, die ihr erlaubte, auf diesem Kreisbogen wieder die frühere Höhe im Punkt m zu erreichen.

Nunmehr schlug Galilei im Punkt o einen Nagel ein und hob dann die Masse wieder auf die Ausgangshöhe des vorhergehenden Versuchs, also bis zum Punkt k . Ließ er den Pendelkörper los, so wurde der Faden nach Erreichen des Punktes l um o geknickt, erreichte aber trotzdem in n die Höhe des vorhergehenden Versuches.

Von diesen Versuchen ausgehend, stellte sich Huygens die Aufgabe, die Kurve zu finden, in der das Pendel Schwingungen ausführt, die auch bei größerem Pendelausschlag unabhängig von der Schwingungsweite sind. Es stellte sich heraus, daß diese Eigenschaft der Zykloide zukommt, einer Kurve, die von einem Punkt auf der Peripherie eines rollenden Rades beschrieben wird.

Wenn man die Masse des Pendels zwingt, sich in einer nach unten konvexen Zykloide zu bewegen, so wird seine Schwingungsdauer unabhängig

vom Ausschlag die gleiche sein, d. h., es wird an den Punkt *a* in derselben Zeitspanne kommen, ob es seine Bewegung nun in *d*, *c* oder *b* beginnt. Man kann dies erreichen, wenn sich der Faden des Pendels bei der Bewegung der Masse an entsprechend gebogene Metallstreifen anlegt.

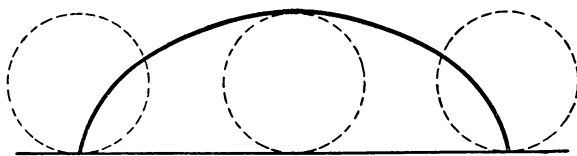


Abb. 10 Entstehung einer Zykloide

Huygens bewies, daß „das Fallen und das Steigen in der Zykloide eine Zeit erfordert, die sich zur Zeit des vertikalen Falls in ihrer Achsrichtung wie der Umfang eines Kreises zu seinem Durchmesser verhält“. Diese Folge-

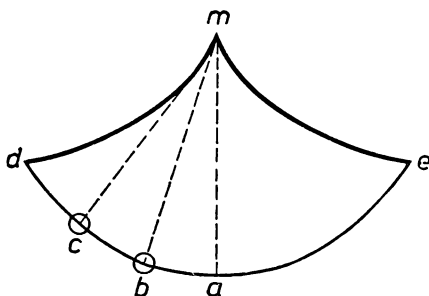


Abb. 11 Zykloidenpendel

rung trifft auch zu, wenn das Pendel mit kleinem Ausschlag einen Kreisbogen beschreibt, der im unteren Teil fast mit der Zykloide zusammenfällt. Daraus schloß Huygens, „daß die Schwingungsdauer des mit kleiner Schwingungsweite auf einem Kreisbogen schwingenden Pendels sich zur Fallzeit eines aus der Höhe der doppelten Pendellänge herabfallenden Körpers so verhält wie der Umfang des Kreises zu seinem Durchmesser“. Die Fallzeit von einer Höhe, die der doppelten Länge des Pendels entspricht, ergibt sich aus der Formel:

$2l = \frac{gt^2}{2}$, wobei *l* die Länge des Pendels, *t* die Fallzeit, *g* die Erdbeschleunigung bedeutet.

Nach der von Huygens bewiesenen These ist $T:t = 2\pi R:2l$, wobei T die Schwingungsdauer des Pendels, t die von uns gefundene Fallzeit des aus der Höhe $2l$ fallenden Körpers ist. Wenn man in diese Gleichung den Wert t einsetzt, ergibt sich:

$$T:2\sqrt{\frac{l}{g}} = \pi \quad \text{und} \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Das ist die Formel von Huygens, mit der man g berechnen kann, wenn man die Schwingungsdauer eines Pendels mißt, dessen Länge bekannt ist.

Das Pendel wurde als Regulator für den Gang eines Uhrwerks benützt. Eine solche Pendeluhr wurde nach Aussagen von Physikgeschichtlern 1657 von Huygens gebaut.¹ Seitdem wird sie bei astronomischen Beobachtungen verwendet.

Das Pendel, das für derartige Uhren verwendet wird, ist ein Metallstab mit einem Gewicht am unteren Ende, der an einer Achse hängt, auf der er sich im Schwingen dreht. Zur Verminderung der Reibung wird das Pendel auf der Schneide eines dreieckigen Prismas aufgehängt, das im oberen Ende des Stabes eingelassen ist. Ein derartiges Gerät wird als physisches Pendel bezeichnet.

Als Länge eines physischen Pendels wird die Länge eines einfachen, des sogenannten „mathematischen“ Pendels gerechnet, das die gleiche Schwingungsdauer besitzt.

Da die Formel von Huygens die Möglichkeit bietet, aus der Schwingungsdauer eines Pendels die Fallbeschleunigung zu berechnen, war das Pendel in der Folgezeit ein geeignetes Instrument, um die Schwereveränderung auf der Erdoberfläche zu erforschen.

Die Überzeugung, daß sich die Schwerkraft und daher auch die Länge des Sekundenpendels, also eines Pendels, dessen Schwingungsdauer genau eine Sekunde beträgt, auf der Erdoberfläche nicht verändern, veranlaßte Huygens zu dem Vorschlag, das Sekundenpendel als Längeneinheit einzuführen. Aber es erwies sich sehr bald, daß die Länge des Sekundenpendels nicht überall gleich ist, und das zwang zu dem Schluß, daß auch die Erd-

¹ Nach anderen Autoren soll der polnische Astronom Hevelius (1611—1687) schon vor Huygens Pendeluhren gebaut und verwendet haben.

beschleunigung, von der die Schwingungsdauer des Pendels abhängt, nicht überall auf der Erde gleich ist.

Die Veränderlichkeit der Schwerkraft wurde von dem im übrigen wenig bekannten Astronomen Richer entdeckt, der 1672 zur Beobachtung der Marsparallaxe nach Cayenne (Guayana) geschickt worden war. Richer nahm eine Pendeluhr mit, die sehr zuverlässig war. Als er in Cayenne ankam, bemerkte er, daß seine Uhr aus irgendeinem Grunde täglich $2\frac{1}{2}$ Minuten nachzugehen begann. Um ihren Gang zu regulieren, mußte Richer das Pendel verkürzen.

Darauf fertigte Richer ein Sekundenpendel an und beobachtete dessen Schwingungen. Diese Beobachtungen setzte er 10 Monate lang fort, überprüfte sie mit einer genauen Uhr und stellte genau die Länge des Sekundenpendels in Cayenne fest.

Als er nach Paris zurückgekehrt war, mußte Richer das Pendel seiner Uhr wieder verlängern, da sie vorzugehen begann. Das Sekundenpendel, das in Cayenne angefertigt worden war, erwies sich um $1\frac{1}{4}$ Pariser Linien kürzer als das Pariser Pendel.

Richer erklärte das langsamere Schwingen seines Pendels in Cayenne dadurch, daß dort unter dem Einfluß der Zentrifugalkraft, die durch die Umdrehung der Erde entsteht, die Schwerkraftspannung nachlasse.

Richers Beobachtung brachte Newton auf den Gedanken, daß die Zentrifugalkräfte, die infolge der Rotation der Erde entstehen, zu einer Abplattung längs ihrer Achse führen müßten.

Newton wies theoretisch nach, daß ein flüssiger Körper, wie es seiner Meinung nach die Erde einst gewesen war, unter dem Einfluß der Anziehung der Teilchen zum allgemeinen Mittelpunkt seiner Masse Kugelform annehmen müsse. Infolge der Rotation wirkten auf die Teilchen der Erde jedoch zentrifugale Kräfte ein, die sie zum Äquator hin verschoben. Darum habe sich die Erde im Äquatorbereich etwas gedehnt und an den Polen zusammengepreßt.

Die Verlagerung der Teilchen der Erde mußte solange dauern, bis ihre Oberfläche überall senkrecht zur gleichzeitig wirkenden Schwer- und Zentrifugalkraft wurde. Die Newtons Meinung nach flüssige Erde mußte die Form eines zusammengedrückten Ellipsoids annehmen, d. h. eines Kör-

pers, der durch die Rotation einer Ellipse um ihre kleine Achse entsteht. Newton veranschaulichte seine Betrachtungen mit einem Gedankenexperiment.

Man stelle sich vor, daß durch die Erde ein knieförmiger Schacht gebohrt sei, dessen Knie sich im Erdmittelpunkt befindet, während seine Stollen am Äquator bzw. am Pol enden. Wenn man in den Schacht Wasser füllt, wird in dem Stollen, der am Äquator endet, das Wasser infolge der Zentrifugalkraft höher stehen als in dem, der am Pol endet. Wenn also die Erde einst flüssig gewesen ist, so mußte sie sich am Äquator ausdehnen und längs der Rotationsachse abplatten.

Unter dieser Voraussetzung betrüge nach der Berechnung Newtons – der annahm, daß die Erde überall die gleiche Dichte habe – die Abplattung $1/230$, d. h., der polare Radius wäre um $1/230$ kürzer als der äquatoriale. In Wirklichkeit ist, wie wir weiter sehen werden, die Abplattung etwas geringer.

Zu dieser Zeit war die Pariser Akademie der Wissenschaften ein „königliches“, aristokratisches Institut. Ihre Ehrenmitglieder waren hochgestellte Persönlichkeiten, die wenig lebendige Beziehungen zur Forschung hatten. Die ordentlichen Mitglieder der Akademie („Pensionäre“) wurden vom König ernannt, und nur die Adjunkten wurden von den Mitgliedern der Akademie selbst gewählt. Die Sitzungen der Akademie fanden unter Ausschluß der Öffentlichkeit statt; Berichte darüber wurden nicht herausgegeben. Als Newton seine Schlußfolgerungen über die Abplattung der Erde mitteilte, erhob sich in Frankreich ein Proteststurm. Die französischen Gelehrten erkannten das Gesetz der allgemeinen Gravitation nicht an. Ihr Wortführer war der damals berühmte Physiker und Mathematiker Jakob Bernoulli (1654–1705). Die Gegner Newtons begannen zu beweisen, daß im Gegenteil die polaren Radien der Erde länger seien.

In der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts wandte sich der Direktor des Pariser Observatoriums J. Cassini (1677–1756) besonders heftig gegen Newtons Behauptungen.

Nach der jeweiligen Länge des Meridiangrades in der Polargegend und in der Äquatorzone kann man beurteilen, ob die Erde abgeplattet oder längs ihrer Achse gedehnt ist.

Wenn die Erde an den Polen abgeplattet ist, muß die Krümmung der Erdoberfläche in Polnähe geringer sein als am Äquator. Bei einer geringeren Krümmung aber muß der Meridiangrad am Pol länger sein als am Äquator. In diesem Falle kann man den Meridian als Ellipse ansehen, deren kleine Achse die Rotationsachse der Erde ist.

Wenn die Erde hingegen längs der Rotationsachse weiter ausgedehnt ist, gleicht der Meridian einer Ellipse, deren große Achse die Rotationsachse der Erde ist. In diesem Fall ist die Krümmung der Erdoberfläche an den Polen größer und der Meridiangrad am Äquator länger als in den Polar-gegenden.

Im Jahre 1691 erschien eine Broschüre des Straßburger Arztes Eisenschmidt, der auf Grund früher durchgeführter Gradmessungen im Gegensatz zu Newton behauptete, die Erde sei längs ihrer Achse weiter ausgedehnt. Er stellte geschickt Daten über die Gradmessungen in verschiedenen Ländern zusammen und versuchte zu beweisen, daß der Meridiangrad um so kürzer gewesen sei, je weiter nach Norden die Vermessung vorgenommen worden war. Tatsächlich erklärte sich dies durch die Ungenauigkeit der alten Vermessungen und durch Eisenschmidts willkürliche Auswahl ihrer Daten.

Eisenschmidt meinte, die Erde sei eiförmig, und suchte diese Ansicht sogar mit Zitaten aus den Werken antiker Gelehrter zu stützen. In der Tat schrieben die Philosophen des Altertums der Erde nur deshalb eine eiförmige Gestalt zu, weil sie im Ei den Anfang alles Lebens auf der Erde sahen. Aber auch im 17. Jahrhundert nahm man solch ein Argument noch ernst. Der Streit zwischen den französischen Gelehrten und Newton über die Gestalt der Erde konnte nur durch genaue Gradmessungen in der Nähe des Äquators wie auch in den nördlichen Breiten entschieden werden.

Hiermit befaßten sich die französischen Gelehrten Jacques Cassini, Maraldi und Lahire. Sie führten eine Triangulation durch, die sich südlich von Paris bis Collioure und im Norden bis Dünkirchen erstreckte. Die Vermessung dauerte bis zum Jahre 1718 und schien die Meinung Cassinis zu bestätigen, daß der Durchmesser der Erde von Pol zu Pol länger sei. Der Grad des Pariser Meridianbogens war im Norden etwas kürzer als im Süden.

Aber Newton und seine Anhänger, zu denen auch Maupertuis (1698–1759), ein Mitglied der Französischen Akademie, gehörte, gaben nicht nach. Endlich, schon einige Jahre nach Newtons Tod, entsandte die Französische Akademie der Wissenschaften zur Lösung der Frage, ob die Erde an den Polen abgeplattet sei, zwei geodätische Expeditionen, und zwar die eine nach Peru unter der Führung des Akademiemitgliedes La Condamine (1701 bis 1774) und die andere nach Lappland unter der Führung von Maupertuis.

Die Ergebnisse dieser Gradmessungen zeigten, daß Newton recht gehabt hatte. Der Meridiangrad in Lappland erwies sich als ungefähr 1 km länger als der in Peru. Zu dieser Zeit wurden auch die Vermessungen des Pariser Meridiangrades überprüft, die Jacques Cassini vorgenommen hatte. Es erwies sich, daß auch diese Vermessung, entgegen der Meinung von Cassini selbst, davon zeugte, daß der Meridiangrad mit zunehmender Entfernung vom Äquator zum Pol länger wird.

Das sprach dafür, daß die Meridiane nicht Kreise, sondern Ellipsen sind. Von diesen Gradvermessungen ausgehend wurde die Abplattung der Erde genauer errechnet und erwies sich gleich ungefähr $1/300$.

Der Erfolg Newtons, der nach Voltaire's Worten „ohne sein Arbeitszimmer zu verlassen“ die Abplattung der Erde entdeckt hatte, regte seine Anhänger an, die theoretischen Untersuchungen über die Gestalt unseres Planeten fortzusetzen, die von der Wirkung der Schwerkraft und der Zentrifugalkraft auf ihre Teilchen bestimmt wird.

Die Veränderung der Schwere infolge der Zentrifugalkraft wird aus der Geschwindigkeit eines Punktes auf der Erdoberfläche bei der Rotation der Erde berechnet. Am Äquator beträgt die Zentrifugalkraft $1/289$ der Schwerkraft. Wenn die Erde sich 17mal so schnell drehte, d. h. wenn sie eine Umdrehung im Laufe von $24/17$ Stunden, also ungefähr in 85 Minuten machen würde, so wäre die um $17^2 = 289$ mal vergrößerte Zentrifugalkraft der Schwere am Äquator gleich. Die Körper hätten dort kein Gewicht mehr.

1740 entwickelte der französische Mathematiker Clairaut (1713–1765) in seiner „Theorie der Gestalt der Erde“ eine Formel zur Berechnung der Beschleunigung der Schwerkraft an einem beliebigen Punkt der Erdoberfläche entsprechend seiner geographischen Breite.

Die Formel von Clairaut zur Bestimmung der Beschleunigung g lautet:

$$g = g_0 + (g_1 - g_0) \sin^2 \varphi,$$

wobei g_0 die Beschleunigung am Äquator, g_1 die Beschleunigung am Pol und φ die geographische Breite ist.

Um diese Formel benützen zu können, muß man die Fallbeschleunigung am Pol und die am Äquator kennen.

Zur Bestimmung dieser zwei Größen braucht man indessen keine Reisen zum Pol und zum Äquator zu unternehmen. Die Schwerkraft kann für diese Punkte gleichfalls mit Hilfe der Formel von Clairaut bestimmt werden, und zwar nach den Werten der Schwerkraft, die durch die Beobachtung der Pendelschwingungen in zwei beliebigen, leichter zugänglichen Punkten der Erdoberfläche festgestellt werden. Wenn man zwei solche Messungen gemacht und ihre Ergebnisse in die Formel von Clairaut eingesetzt hat, erhält man zwei Gleichungen mit zwei Unbekannten. Aus ihnen kann man leicht die Größe der Fallbeschleunigung am Pol und am Äquator berechnen.

So gewann man eine Formel, die zur Berechnung der Schwerkraft oder der Fallbeschleunigung g an irgendeinem Punkt der Erdoberfläche entsprechend seiner geographischen Breite geeignet ist, wobei die Erde als ein abgeplattetes Rotationsellipsoid betrachtet wird:

$$g = 978,05 + 5,17 \sin^2 \varphi.$$

Wenn wir nach dieser Formel die Fallbeschleunigung der Körper am Äquator berechneten, würden wir finden, daß sie um $1/190$ geringer ist als am Pol.

Diese Verringerung der Schwerkraft hat zwei Ursachen: die Zentrifugalkraft und die Abplattung der Erde. Am Äquator vermindert die Zentrifugalkraft die Schwerkraft um $1/289$ und der größere Abstand vom Erdmittelpunkt um $1/550$, insgesamt um $1/190$.

Clairaut hat theoretisch die Abplattung der Erde genauer bestimmt als Newton. Dabei nahm er an, daß die Erde aus Schichten besteht, deren Dichte in sich gleichmäßig ist, aber in der Tiefe zunimmt. Clairaut ermittelte auch die Korrelation zwischen der Fallbeschleunigung am Pol und am

Äquator, der Zentrifugalkraft am Äquator und der Abplattung der Erde, für die sich folgende Formel ergibt:

$$\alpha = \frac{5}{2} \cdot \frac{a}{g_0} - \frac{g_1 - g_0}{g_0},$$

wobei g_1 die Fallbeschleunigung am Pol, g_0 die Fallbeschleunigung am Äquator, a die Zentrifugalbeschleunigung am Äquator und α die Abplattung der Erde ist. Mit dieser Formel kann man die Abplattung der Erde mit ziemlicher Genauigkeit berechnen. Die Beobachtungen der Pendelschwingungen ergaben annähernd den gleichen Wert wie die Gradvermessungen. Die moderne Wissenschaft hat für sie Werte im Bereich von $1/298,6$ bis $1/298,3$ festgestellt.

Nach Feststellung der Abplattung bestand die Aufgabe der geodätischen Untersuchungen im 19. und 20. Jahrhundert darin, die genauen Elemente des Erdellipsoides zu bestimmen, d. h. seiner Halbachsen – des polaren und äquatorialen Radius der Erde – und der Abplattung, die sich in dem Bruch „Differenz aus großer und kleiner Halbachse, geteilt durch die große Halbachse“ ausdrückt.

Zu diesem Zweck wurden in verschiedenen Ländern Meridianbogen bis 10 Grad und mehr gemessen. Einer der längsten Meridianbogen ($25^\circ 20'$) wurde gegen Ende der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts von russischen Gelehrten unter der Leitung von W. J. Struve (1793–1864) gemessen; er erstreckte sich von der Küste der Barentssee im Norden bis nach Staro-Nekrassowka im Süden.

Um die Maße des Erdellipsoides und die Lage seiner Achsen im Erdkörper zu finden, muß man für einige Punkte die Richtung seiner Normalen in bezug auf den Fixsternhimmel bestimmen; außerdem muß man die Lage dieser Punkte zueinander und ihre Entfernung feststellen. Die Normalen-Richtung ergibt sich dann aus den geographischen Koordinaten des betreffenden Punktes, die man mit Hilfe der Geländeaufnahme und der bekannten Koordinaten des Anfangspunktes der Meßreihe erhält.

Es zeigte sich jedoch, daß bei der Bestimmung der geographischen Koordinaten auf astronomischem Wege die Breiten und Längen der gewählten Punkte von denen abweichen, die mit Hilfe einer Geländeaufnahme

ermittelt wurden. Dies erklärt sich dadurch, daß die senkrechte Linie, die man mit Hilfe eines Lotes oder einer Wasserwaage findet, fast niemals mit der Normalen zur Oberfläche des Ellipsoids übereinstimmt. Die astronomische Koordinatenbestimmung benutzt aber die Richtung des physikalischen Lotes. Die geographische Breite des Ortes ist, wie bekannt, gleich dem Winkel zwischen der Richtung zum Weltpol und der Horizontalebene; die Lage der Horizontalebene wird aber durch die Richtung der senkrechten Linie bestimmt. Wenn also die Richtung des physikalischen Lotes nicht mit der Normalen zur Oberfläche des Ellipsoides übereinstimmt, muß die astronomisch ermittelte Breite des Ortes etwas von der Breite, die nach der Geländeaufnahme berechnet wurde, abweichen.

Daraus folgt, daß die Meeresoberfläche, wenn sie sich über die Kontinente ausdehnte, nicht der Oberfläche eines Ellipsoides entsprechen würde, da sie senkrecht zur Richtung des physikalischen Lots läge. Wenn man in zahlreichen Punkten auf dem Festland die Abweichung vom Lot mißt, d. h. den Winkel, den das physikalische Lot mit der Normalen zur Oberfläche des Ellipsoides bildet, kann man feststellen, welche Lage die über das Festland ausgebreitete Meeresoberfläche einnehmen würde. Diese imaginäre Fläche trägt die Bezeichnung „Meeresspiegel“. Sie begrenzt das sogenannte „Geoid“, womit man verabredungsgemäß einen Körper bezeichnet, der die Form der Erde hat.

Die physische Oberfläche des Festlandes liegt im Durchschnitt 800 m über dem Meeresspiegel, d. h., sie überragt ihn um $\frac{1}{8000}$ des Erdradius. Darum kommt die Gestalt der Erde derjenigen sehr nahe, die sie hätte, wenn der Ozean die ganze Erdoberfläche bedecken würde – vorausgesetzt, daß überall auf dem Festland sein Spiegel senkrecht zur beobachteten Lage des Lotes wäre, d. h. zur Form des Geoids.

Die Oberfläche des Geoids weicht etwas vom Ellipsoid ab. An einigen Stellen ist sie etwas höher und an den anderen niedriger als dieses; sie differiert im Durchschnitt nach der einen oder anderen Seite um 50 m.

Die astronomisch-geodätischen oder Gradmessungen – Bestimmung der geographischen Koordinaten der Punkte, der Azimute der Seiten der Triangulationsdreiecke, der Entfernungen zwischen den Punkten und der Krümmung der Erdoberfläche zwischen den Punkten –, die auf den Mee-

resspiegel umgerechnet sind, stellen Vermessungen auf der Oberfläche des Geoids dar, einer komplizierten Fläche, die nicht wie die Oberfläche eines Ellipsoids durch das Rotieren einer einfachen mathematischen Kurve gebildet werden kann.

Gegenwärtig wird in der UdSSR eine umfangreiche geodätische Arbeit geleistet. Ein Drittel der Gradmessungen der ganzen Welt entfällt auf die Sowjetunion. Die geodätischen Punkte bilden Ketten von Dreiecken, deren Seiten 15–40 km lang sind. Diese Dreiecksreihen ihrerseits bilden Vielecke mit Seiten von 200–250 km Länge, sogenannte geodätische Polygone. Zum Messen der Dreieckswinkel werden an ihren Spitzen metallene oder hölzerne Türme errichtet, die trigonometrische Signale heißen und von deren Spitzen die benachbarten Signale sichtbar sind.

Wenn man mit der erforderlichen Genauigkeit die Entfernung zwischen zwei benachbarten Signalen – die Basis – gemessen hat, werden alle anderen Entfernungen berechnet, da man die Winkel der Dreiecke kennt.

Die Breite und die Länge der Hauptpunkte, die voneinander nicht mehr als 100 km entfernt sind, werden mittels astronomischer Beobachtungen bestimmt; ihre Höhe über dem Meeresspiegel wird durch genaues Nivellieren festgestellt. Als Ausgangspunkt zur Bestimmung der Höhe über dem Meeresspiegel dient in der UdSSR der Pegel von Kronstadt, der dem mittleren Wasserstand des Finnischen Meerbusens entspricht und durch langjährige Beobachtungen bekannt ist.

Die durch Vermessung auf der Erdoberfläche ermittelten Koordinaten der geodätischen Punkte, der Reliefdetails und der topographischen Objekte werden nach Berechnung auf die Oberfläche des Erdellipsoids projiziert.

Dank der Bemühungen, eine größtmögliche Genauigkeit zu erzielen, beträgt der relative Fehler bei der Vermessung der Basis jetzt $\frac{1}{1\,000\,000}$ und bei der Vermessung der Winkel eine halbe Winkelsekunde. Die Bearbeitung der Ergebnisse dieser Geländeaufnahmen wird nach einer von Professor F. N. Krassowski entwickelten Methode durchgeführt. Nach ihm ist auch das Erdellipsoid benannt, das nach den Ergebnissen dieser umfangreichen Geländeaufnahme bestimmt wurde.

Die Berechnung der Elemente des Krassowski-Ellipsoides erfolgte nach dem Stand der Geländeaufnahme um die Mitte des Jahres 1938, als das

Triangulationsnetz schon den ganzen europäischen Teil der UdSSR, den Ural, Kasachstan und einen Teil von Westsibirien (südlich 56° nördl. Breite) bis Nowosibirsk, d. h. ungefähr 10 Mill. km², also etwa die Hälfte des Territoriums der UdSSR, bedeckte. Die Vermessungen von W.J. Struve wie auch die früheren wurden dabei berücksichtigt.

Schon auf Grund dieser Daten konnte man die Elemente des Erdellipsoids mit sehr großer Genauigkeit berechnen. Später wurden zu einer abschließenden Auswertung auch die Gradberechnungen berücksichtigt, die in anderen Ländern durchgeführt worden waren. Im Ergebnis aller Berechnungen wurde die Länge der großen Halbachse des Erdellipsoids auf 6378245 m festgelegt, die der kleinen Halbachse auf 6356863 m und die Abplattung auf $\frac{1}{298,3}$. Die Berechnungen erfolgten mit einem Höchstmaß von Genauigkeit.¹

Das Krassowski-Ellipsoid ist bis zur heutigen Zeit die genaueste Annäherung an die Geoidform, die nach Geländeaufnahmen festgestellt wurde.

Die astronomisch-geodätische Methode ist für die Bestimmung der Abweichung der Geoidoberfläche von der des Ellipsoids nur im Bereich der Kontinente anwendbar. Für eine eingehende Erforschung auf den Kontinenten wie auf dem Ozean dienen heute gravimetrische Beobachtungen, d. h. Messungen der Beschleunigung des freien Falls.

Nach der Formel von Clairaut kann man die Beschleunigung der Schwerkraft an einem beliebigen Punkt auf der Oberfläche des Erdellipsoids berechnen; man muß nur die geographische Breite dieses Punktes kennen. Die Bestimmung der Beschleunigung der Schwerkraft, die mit Hilfe von Geräten vorgenommen und auf Meeresspiegel umgerechnet wird, weicht fast immer etwas von der nach der Formel von Clairaut berechneten ab. Diese Erscheinung nennt man die Schwerkraftanomalie. Sie beweist, daß die Oberfläche des Geoids nicht mit der des Ellipsoids übereinstimmt.

Bei der Messung der Beschleunigung benützt man das physische Pendel; die hierbei ermittelten Daten bedürfen zahlreicher Korrekturen, die die Bestimmung des Beschleunigungswerts sehr erschweren.

¹ Von der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik wurde das sogenannte Internationale Erdellipsoid angenommen. Es beruht im wesentlichen auf den Berechnungen von Hayford (1909). Die entsprechenden Maße: große Halbachse 6378388 m, kleine Halbachse 6356912 m, Abplattung $\frac{1}{297}$.

Solche Vermessungen werden mit einem Reversionspendel vorgenommen. Das Reversionspendel ist so eingerichtet, daß es an verschiedenen Seiten vom Schwerpunkt Prismen hat, deren Schneiden zum Aufhängen dienen. Diese Prismen sind verschiebbar. Man verschiebt die Prismen, bis eine Lage gefunden wird, bei der die Schwingungsperiode des Pendels sich beim Vertauschen der Aufhängepunkte nicht verändert. In diesem Fall ist die Schwingungsdauer des Reversionspendels gleich der eines einfachen mathematischen Pendels, dessen Länge dem Abstand der Prismenschneiden des Reversionspendels gleicht. Aus der Schwingungsdauer und dem Schneidenabstand wird die Erdbeschleunigung errechnet. Angesichts der Schwierigkeit der Messungen mit dem Reversionspendel wird gewöhnlich die Differenz zwischen der Beschleunigung im gegebenen Punkt und in einem Punkt, für den die Beschleunigung schon bekannt ist, bestimmt.

In der UdSSR gibt es vier Punkte, für die die Beschleunigung sehr genau bestimmt ist – die Keller der Observatorien in Pulkowo, Kasan, Moskau und Poltawa.

Bevor man mit dem Gerät die relative Beschleunigung bestimmt, wird es in einem dieser Punkte geprüft. Aus der Schwingungsdauer wird berechnet, welchem einfachen, mathematischen Pendel es entspricht, und die Vermessung der Beschleunigung wird an den gewünschten Punkten ohne Veränderung der Pendellänge durchgeführt.

Außer dem Pendel wird jetzt zur Schwerkraftbestimmung das Gravimeter angewandt, das schon von M. W. Lomonossow (1711–1765) vorgeschlagen wurde. Mit diesem Gerät wird die Veränderung der Schwerkraft nach jener Deformation bestimmt, die eine bestimmte Masse hervorruft, die eine Feder zusammendrückt oder auseinanderzieht, einen Faden verdreht oder ein gewisses Gasvolumen verdichtet.

Bei der Messung der Schwerkraftanomalie kann man sowohl die Entfernung zwischen der Oberfläche des Ellipsoids und des Geoids berechnen als auch die Abweichung vom Lot.

Die Bestimmung der Abweichung des Lots infolge der Schwerkraftanomalie beruht auf einer Formel, die von dem englischen Physiker Stokes (1819 bis 1903) entwickelt wurde. Stokes bewies schon 1840:

Läßt sich um einen Planeten, dessen Gesamtmasse und Winkelgeschwin-

digkeit bekannt sind, eine Niveaufläche bestimmen, die alle Unebenheiten des Planeten einschließt, so kann man die Schwerebeschleunigung für diese Fläche auch dann berechnen, wenn die Massenverteilung im Inneren des Planeten unbekannt ist.

Bei der Untersuchung der Gestalt der Erde hat man dagegen durch Messen der Schwerkraftbeschleunigung die auf Meeresspiegel umgerechnete Oberfläche der Erde zu bestimmen. Stokes löste auch diese Aufgabe unter Verwendung einer Formel, nach der man die Entfernung zum Lot zwischen dem Geoid und dem Erdellipsoid berechnen kann, wenn auf der ganzen Erde die Schwerkraftanomalien bekannt sind, d. h. die Abweichung der beobachteten Beschleunigung von der, die auf der Oberfläche des Ellipsoids herrschen muß.

Die Anwendung der Formel von Stokes bei der Erforschung der Gestalt der Erde wurde durch folgende Umstände behindert. Erstens befindet sich ein Teil der Kontinente über der auf Meeresspiegel umgerechneten Oberfläche der Erde, auf die sich alle geodätischen Vermessungen beziehen. Zweitens werden die Vermessungen selbst nicht auf der Oberfläche des Geoids durchgeführt, sondern auf der höher gelegenen physischen Oberfläche der Erde. Drittens muß man für die Anwendung der Formel von Stokes die Schwerkraftanomalie auf der ganzen Erdoberfläche oder zumindest auf einem großen Gebiet rings um den Beobachtungsort kennen.

Die korrespondierenden Mitglieder der Akademie der Wissenschaften der UdSSR A. A. Michailow, M. S. Molodenski u. a. haben Methoden für eine ziemlich genaue Bestimmung der Wirkung der Massen ausgearbeitet, die oberhalb der Oberfläche des Geoids liegen, und ebenso Methoden für die Umrechnung der Schwerkraftmessungen auf das Niveau des Meeresspiegels. Damit ermöglichten sie eine größere Genauigkeit bei der Anwendung der Formel von Stokes.

Die Schwerkraftmessungen erhielten für die Untersuchung der Gestalt der Erde erhöhte Bedeutung, seit der holländische Geodät Vening Meinesz 1928 aus der Formel von Stokes ein Abhängigkeitsverhältnis zwischen der Schwerkraftanomalie und der Lotabweichung gefolgert hatte.

Mit Hilfe der Methoden von F. N. Krassowski, A. A. Michailow, M. S. Molodenski und anderer sowjetischer Geodäten und Geophysiker wurde es end-

gültig möglich, die Formeln von Stokes und Vening Meinesz mit großer Genauigkeit bei der Bestimmung der Oberfläche des Geoids auf der ungeheuren Fläche der UdSSR praktisch anzuwenden.

Um Schwierigkeiten zu vermeiden, die mit der Reduktion der Beobachtungen auf die Oberfläche des Geoids verbunden sind, hatte M. S. Molodenski eine Methode zur Erforschung der Gestalt der Erde ausgearbeitet,

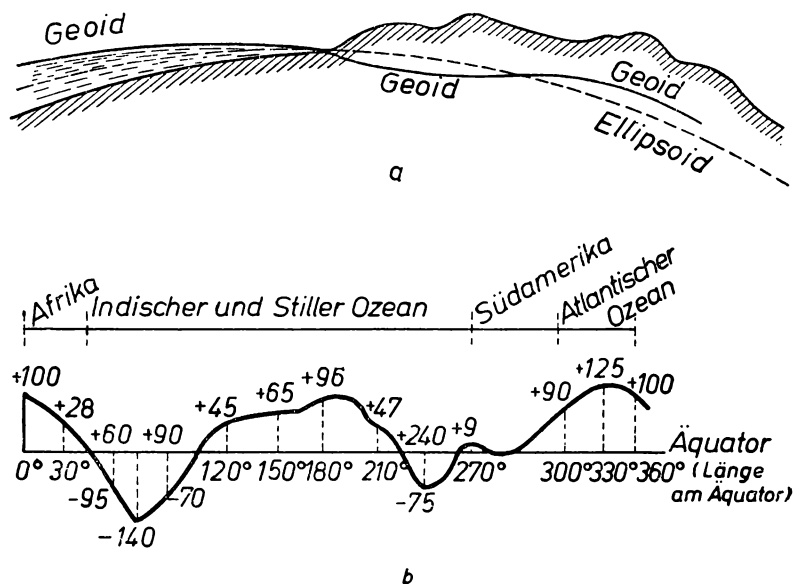


Abb. 12 Lage des Geoids im Verhältnis zum Ellipsoid

bei der sich die Bestimmung der Oberfläche des Geoids erübrigt. Nach dieser Methode kann man aus der Beobachtung der Schwerebeschleunigung an der Erdoberfläche, wenn man die astronomische Breite und Länge des gegebenen Punktes kennt, die Höhe und Neigung der physischen Erdoberfläche gegenüber dem Erdellipsoid bestimmen. Gegenwärtig werden in der UdSSR die astronomisch-geodätischen Vermessungen in jedem Falle mit gravimetrischen Beobachtungen verbunden.

Zur Zeit wird die Schwerebeschleunigung schon an mehr als 16000 Punkten der UdSSR gemessen. Reichlich ebensoviel Messungen fanden in allen anderen Ländern der Welt statt.

Diese Geländeaufnahme ist schon nahezu beendet, und so kann man sehr genau die Oberfläche des Geoids auf dem ganzen Territorium der UdSSR sowie sein Verhältnis zur Oberfläche des Erdellipsoids bestimmen.

Durch diese Forschungsarbeiten wurde die Gestalt der Erde weitgehend geklärt.

I. D. Shongolowitsch hat die Untersuchungen F. A. Sludskis (1841–1897) bestätigt, die den Nachweis erbrachten, daß die Oberfläche des Erdellipsoids im Bereich des Ozeans meistens unter dem Meeresspiegel und auf den Kontinenten fast immer höher liegt als die auf den Meeresspiegel umgerechnete Oberfläche des Geoids.

DIE STRUKTUR DER ERDE NACH SEISMOLOGISCHEN DATEN

Wie die Lichtstrahlen der fernen Sterne mit Hilfe der Spektralanalyse die Zusammensetzung der Sternatmosphäre erkennen ließen, so erschlossen die seismischen Schwingungen, die durch das Erdinnere gehen, die Struktur der Erde, d. h. die Veränderung ihrer physikalischen Eigenschaften in der Tiefe.

Bei einem Erdbebenstoß verbreiten sich im Erdkörper elastische Schwingungen. Sie dringen in große Tiefen und kommen dann in sehr abgeschwächter Form in großer Entfernung vom Epizentrum des Erdbebens an die Erdoberfläche.

Die elastischen Schwingungen sind von zweierlei Art. Die einen breiten sich wie Schallwellen aus. Sie werden auf die Teilchen übertragen, die in der Ausbreitungsrichtung der Wellen schwingen. Bei der Ausbreitung dieser Longitudinal- oder Längswellen erfolgt abwechselnd ein Zusammenziehen (Kontraktion) und ein Dehnen (Dilatation).

Diese Wellen pflanzen sich in einem festen, flüssigen und gasförmigen Medium fort. Bei der zweiten Art, den Transversal- oder Querwellen, erfolgen die Schwingungen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Wellen. Sie können sich nur in einem festen Medium bilden und ausbreiten.

Die Schwingungen kann man bei folgenden Versuchen beobachten: Wenn man mit einem Hammer auf die Stirnseite eines Metallstabes schlägt, der in eine Mauer eingelassen ist, so kommt es in einer gewissen Schicht zu einer Kontraktion der Teilchen, und der Stab wird kürzer. Die Kontraktion teilt sich sofort der nächsten Schicht mit und so weiter, bis sie die Mauer erreicht, die wir für nicht kompressibel halten wollen. Dann wird die Kompression in umgekehrter Richtung bis zum freien Ende des Stabes übertragen. Nach der Kompressionswelle verläuft längs des Stabes eine Dilatationswelle. Wenn sie die Mauer erreicht, beginnt sie sich zum freien Ende des Stabes zurückzubewegen. Die Kompressionswelle wird

immer von einer Dilatationswelle begleitet. Zugleich zeigt sich eine Volumenveränderung. Diese Längsschwingungen hören infolge des Energieaufwandes, den die Überwindung der inneren Reibung erfordert, nach kurzer Zeit auf.

Als Beispiel für die Querwellen können die Schwingungen eines Stahlstabes dienen, dessen Enden in Wände eingelassen sind. Wenn man ihm an einem Ende einen leichten Schlag mit dem Hammer quer zu seiner Längsrichtung gibt, wird der Stab durch den Schlag etwas durchgebogen, diese Deformation überträgt sich von einem Teilchen zu den anderen, und die Durchbiegung verschiebt sich zum anderen Ende. Wenn sie die Wand erreicht hat, verläuft die Schwingungswelle in umgekehrter Richtung. Die Querschwingungen werden nicht von einer Volumenveränderung begleitet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Längsschwingungen wie auch der Querschwingungen hängt von den elastischen Eigenschaften des Mediums ab. Darum müssen wir zuvor die elastischen Eigenschaften der festen Körper kennenlernen.

Ein Stahlkugélchen, das auf eine harte Platte fällt, springt hoch, weil zwischen den Molekülen des festen Körpers Kräfte wirken, die bestrebt sind, sie in einem gewissen Abstand voneinander zu halten. Wenn man die Platte mit einer ganz feinen Wachsschicht bedeckt, hinterläßt das Kugélchen eine kreisförmige Spur, obgleich es eigentlich die ebene Platte nur in einem Punkt berühren kann. Folglich hat sich das Kugélchen im Augenblick des Aufpralls abgeflacht, die Moleküle in seinem unteren Teil haben sich einander genähert, aber rasch wieder voneinander entfernt, und das Kugélchen ist hochgesprungen.

Nehmen wir an, daß auf die Einheit der Oberfläche eines Körpers, der in eine Flüssigkeit getaucht ist, der Druck p wirkt. Er wirkt von allen Seiten gleich stark und senkrecht zur Oberfläche des Körpers.

Wenn sich unter dem Druck p das Volumen des Körpers V bis auf v verringert hat, ist die Veränderung jeder Volumeneinheit gleich $\frac{V-v}{V} = \frac{\Delta V}{V}$.

Erfahrungsgemäß ist diese Größe in gewissen Grenzen dem Druck proportional. Daher kann man schreiben: $p : \frac{\Delta V}{V} = k$ und $k = \frac{V}{\Delta V} \cdot p$.

Die Größe k wird als Kompressionsmodul bezeichnet und in kg/cm^2 ausgedrückt. Sie ist eines der Kennzeichen der elastischen Eigenschaften eines Körpers oder eines materiellen Mediums.

Unter Wirkung der Kräfte, die längs der einander gegenüberliegenden Seiten eines Parallelepipedons angreifen und nach entgegengesetzten Sei-

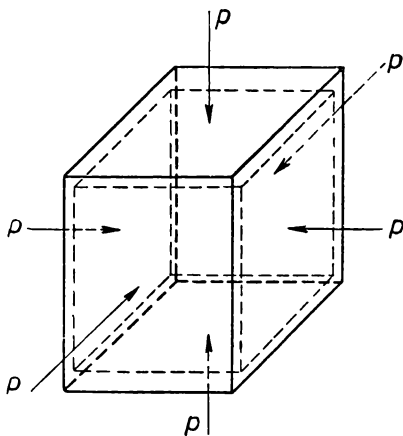


Abb. 13
Allseitige Kompression

ten gerichtet sind, bleibt das Volumen des Parallelepipedons dasselbe, doch ändern sich die Winkel zwischen den Kanten. Diese Veränderung der Form eines Körpers wird Scherung genannt.

Wenn auf eine Flächeneinheit einer Seitenfläche s die Kraft p einwirkt, hängt die Veränderung des Winkels zwischen den Kanten des Parallelepipedons von dieser Kraft ab. Das Verhältnis p zum Winkel α (nicht in Graden, sondern in Teilen des Winkels ausgedrückt, dessen Bogen gleich dem Radius ist) wird durch den Buchstaben $\mu = \frac{p}{\alpha}$ bezeichnet; diese Größe wird Scherungs- oder Torsionsmodul genannt. Dieser Modul kennzeichnet die Härte eines Körpers, da sich flüssige Körper einer Scherung nicht widersetzen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Längswellen v_l hängt von dem Kom-

pressionsmodul k , dem Scherungsmodul μ und der Dichte d ab. Sie wird ausgedrückt durch die Formel:

$$v_l = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{d}}.$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Querwellen v_q hängt von dem Scherungsmodul μ und der Dichte des Mediums d ab. Sie wird durch die Formel

$$v_q = \frac{\mu}{d} \quad \text{ausgedrückt.}$$

Wenn man die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Querwellen und der Längswellen sowie die Dichte des Mediums kennt, kann man leicht den Scherungsmodul und den Kompressionsmodul finden. Mit diesen Formeln kann man auch die Härte der verschieden tiefen Erdschichten durch die Geschwindigkeit der sich in ihnen ausbreitenden elastischen Schwingungen bestimmen, die im Augenblick eines Erdbebenstoßes auftreten, wenn wir die Dichte der verschiedenen Erdschichten voraussetzen können.

Solange die Geräte zur Registrierung von Bodenschwingungen nicht so empfindlich waren, daß sie auf Schwingungsweiten von hundertstel Millimetern ansprachen, blieben diese Schwingungen unbemerkt. Erst mit der Erfindung der Seismographen gelang es, die elastischen Schwingungen, die sich nach einem Erdbeben im Erdkörper verbreiten, zu registrieren und ihre Erforschung in Angriff zu nehmen.

Der einfachste Seismograph ist ein Pendel, dessen große Masse während der Schwingungen des Bodens wegen ihrer Trägheit in Ruhe bleibt, aber für den Beobachter, der den Boden für unbeweglich hält, Schwingungen auszuführen scheint.

Die scheinbaren Abweichungen des Pendels von der Vertikalen sind den tatsächlichen Schwingungen des Bodens in der Größe gleich, aber in der Richtung entgegengesetzt. Darum kann man an ihnen die Richtung und das Ausmaß der Bodenschwingungen feststellen.

Ein gewöhnliches Pendel kann jedoch nicht für die Beobachtung der Bodenschwingungen verwandt werden, da es bei geringer Länge selbst zu schwingen beginnt und seine verhältnismäßig schnellen Eigenschwingungen das Bild der Bodenschwingungen verzerren.

Daher werden zur Beobachtung schwacher Schwingungen, die von entfernten Erdbeben ausgehen, horizontale Pendel mit einer sehr großen Schwingungsdauer verwendet.

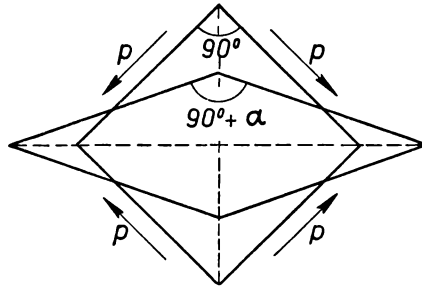


Abb. 14 Scherung

Die Schwingungen eines horizontalen Pendels gleichen der Bewegung einer Tür, die sich an einem schräggestellten Türpfosten nach beiden Seiten drehen kann. Wenn wir die Tür zur Seite schieben, sehen wir, daß sie unter dem Einfluß der Schwere wie ein Pendel zu schwingen beginnt.

Das horizontale Pendel ist ein leichtes, gleichseitiges Metalldreieck, an dessen Spitze die Pendelmasse befestigt ist. Als Drehachse dient eine Seite des gleichseitigen Dreiecks, die in einem sehr kleinen Winkel zur Vertikalen angebracht ist. Wenn man das Pendel mit der Hand zur Seite schiebt, beginnt es in der Horizontalen zu schwingen. Angesichts des geringen Winkels zwischen der Achse und der senkrechten Linie ist die Schwingungsdauer sehr groß. Sie ist gleich der Schwingungsperiode eines vertikalen Pendels von der Länge AO . Wenn die Länge des horizontalen Pendels AC 0,5 m und die Größe des Winkels α $15'$ beträgt, entspricht ein solches Pendel einem vertikalen Pendel von ungefähr 120 m Länge (vgl. Abb. 15).

Unter dem Einfluß der Schwere behält das horizontale Pendel eine bestimmte Lage bei. Wenn man aber die Neigung seiner Rotationsachse verändert, so wird sein Gleichgewicht gestört. Die Abweichungen des Pendels werden mittels eines kleinen an ihm befestigten Spiegels registriert, der das Bild des Fadens einer elektrischen Lampe auf einen ablaufenden Filmstreifen

fen wirft. Bei der geringsten Drehung des Spiegels verschiebt sich merklich der von ihm registrierte Lichtstrahl.

Zur Registrierung der Bodenschwingungen wird auch das sogenannte astatische Pendel verwendet, das sich auf einen Punkt stützt, der unter seinem Schwerpunkt liegt, und von Federn gehalten wird.

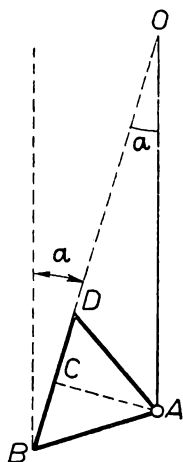


Abb. 15
Konstruktionsschema eines Horizontalpendels

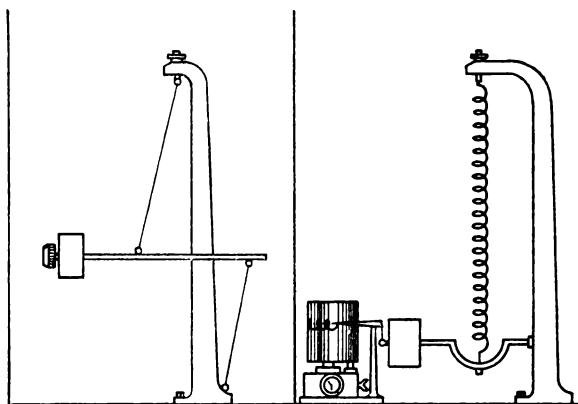
Außer den horizontalen werden auch die vertikalen Bodenschwingungen beobachtet. Zu ihrer Registrierung werden andere Geräte verwendet, die darauf beruhen, daß eine Masse, die an einer Feder hängt, bei stoßartigen Erschütterungen des Bodens wegen ihrer Trägheit in Ruhe bleibt, während das Stativ, an dem die Masse aufgehängt ist, den Bodenschwingungen folgt. Diese Schwingungen werden mittels verschiedener Vorrichtungen auf einem sich bewegenden Band als Seismogramm registriert.

Zum Beispiel werden die kaum merklichen Bewegungen des Pendels in elektrische Spannungen verwandelt. Man kann winzige elektrische Spannungen mittels eines sehr empfindlichen Gerätes, des Galvanometers, feststellen. Die Schwingungen des Zeigers werden mit einem kleinen Spiegel, der sich bei jeder Abweichung des Zeigers dreht und das Licht einer elektrischen Lampe reflektiert, auf einen Film übertragen. Mit Hilfe des Seis-

mogramms kann man den Augenblick des Einsetzens der Wellen und die Schwingungsamplitude des Bodens bestimmen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Längswellen ist größer als die der Querwellen. So kann man die unterschiedliche Zeit feststellen, zu der die einen wie die anderen Wellen auf der Beobachtungsstation eintreffen.

Abb. 16
Konstruktions-
schema von
Seismographen



Zu Beginn dieses Jahrhunderts wurden sehr leistungsfähige Seismographen von dem russischen Physiker B. B. Golizyn (1862–1916) gebaut, einem der hervorragendsten Vertreter der Seismologie, nachdem E. Wiechert in Deutschland 1898 die theoretischen Grundlagen der Seismometrie entwickelt hatte. Von besonders großer Bedeutung waren seine Untersuchungen über die Erdbebenwellen, die durch große Tiefen gehen. Als Leiter des physikalischen Laboratoriums der Akademie der Wissenschaften richtete Golizyn hier eine Werkstatt ein, in der die von ihm erfundenen sehr empfindlichen Geräte angefertigt wurden, die in den physikalischen Observatorien Rußlands und anderer europäischer Länder eingeführt wurden. In der Gegenwart wurden von den sowjetischen Geophysikern noch vollkommener Seismographen gebaut, die auf demselben Prinzip beruhen, so die Apparate von D. P. Kirnos, P. M. Nikiforow, D. A. Charin u. a.

Außer den seismischen Bodenschwingungen werden gegenwärtig die Veränderungen im Schichtenbau der Erdkruste beobachtet.

Das Erdbeben ist ein Stoß, der durch eine Verschiebung in oder unter der Erdkruste im Zuge der heute noch wirkenden gebirgsbildenden Kräfte vor sich geht. Vor der Verschiebung beginnen sich die Schichten zu biegen. Ihre Neigung zur Horizontalen verändert sich. Und diese Erscheinung kann man mittels eines horizontalen Pendels registrieren, wie es W. F. Bontschkowski in Alma-Ata seit dem Jahre 1937 durchführt.

Auf die Schichtstruktur der Erdkruste wirken außer den gebirgsbildenden Prozessen auch Veränderungen der Temperatur und des atmosphärischen Druckes und andere Naturerscheinungen. So schwierig auch diese Beobachtungen waren, so gelang es doch Bontschkowski schon damals, diese Bewegungen in der Erdkruste, die durch gebirgsbildende Vorgänge hervorgerufen werden, von den Erdbebenwellen zu trennen.

Besonders heftige und unregelmäßige Krustenbewegungen wurden 3 bis 10 Tage vor heftigen Erdbeben beobachtet, wenn sein Zentrum nicht weiter als 100 km von der Station entfernt war.

Obwohl man durch diese Beobachtungen bisher noch nicht das Einsetzen und das Zentrum des Erdbebens vorausbestimmen konnte, dürfte diese Methode doch große Perspektiven eröffnen.

In den Erdbebenwarten werden zur Registrierung und Messung der Schwingungen in horizontaler Richtung zwei Seismographen aufgestellt, die die Bodenverschiebungen in zueinander senkrecht verlaufenden Richtungen registrieren. Wenn man diese Registrierungen mit den Aufzeichnungen eines dritten Seismographen kombiniert, der die vertikalen Schwingungen aufnimmt, findet man ein dreidimensionales Bild der Bodenbewegung und kann den Winkel bestimmen, unter dem die Erdbebenwellen an die Oberfläche treten. Nach dem Seismogramm kann man auch die Amplitude und die Periode der Schwingungen bei ihrem Austritt an die Oberfläche bestimmen.

Golizyn erforschte als einer der ersten die seismischen Wellen, die durch das Innere der Erde gelaufen waren. Derartige Forschungen waren schon um die Mitte des vorigen Jahrhunderts in Angriff genommen worden, aber erst nach der Erfindung sehr empfindlicher Geräte ergab sich die Möglich-

keit, äußerst schwache Schwingungen mit einer Amplitude von Hundertsteln von Millimetern zu messen, die von sehr entfernten Erdbeben ausgegangen waren.

Diese Beobachtungen ermöglichten es, die Wege zu bestimmen, auf denen die elastischen Schwingungen große Tiefen durchheilen.

Nehmen wir der Einfachheit halber an, daß der Erdbebenherd und der Zeitpunkt des unterirdischen Stoßes bekannt sind. In diesem Falle zeigt der durch die Seismogramme registrierte Einsatz der ersten Schwingungen, der „Vorläufer“, auf der Beobachtungsstation die Laufzeit der seismischen Wellen vom Ort des Erdbebens bis zur Station an.

So kann man die „scheinbare“ Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen bestimmen, wenn man annimmt, daß die Wellen über die Erdoberfläche gekommen seien.

Tatsächlich aber kommen die seismischen Wellen durch das Erdinnere, und ihre Geschwindigkeit im Erdinnern ist unbekannt. Um die Gesetzmäßigkeiten zu ermitteln, nach denen die Geschwindigkeit sich mit zunehmender Tiefe verändert, wird die Abhängigkeit der scheinbaren Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen von der Entfernung in einer Kurve festgehalten.

Auf einer horizontalen Linie wird im beliebigen Maßstab die Entfernung zwischen den Beobachtungsstationen und dem Zentrum des Erdbebens markiert; am Ende jedes Abschnittes errichtet man eine Senkrechte, deren Höhe gleich der Zeitspanne ist, die die Vorläufer brauchten, um die jeweilige Station zu erreichen. Die Enden der Lote verbindet man durch eine Kurve.

Diese Kurve, die man Hodograph – Laufzeitdiagramm – nennt, zeigt die gesetzmäßige Veränderung der Geschwindigkeit der seismischen Wellen im Erdkörper an.

Hierbei ergibt sich, daß sich mit dem tieferen Eindringen in die Erde die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der seismischen Wellen vergrößert.

Nach den bekannten Gesetzen von der Ausbreitung der Lichtwellen kann man sich auch die Ausbreitungsweise der seismischen Wellen vorstellen.

Wie aus der Optik bekannt ist, verändert der Lichtstrahl beim Übergang von einem durchsichtigen Medium in ein anderes seine Richtung, wenn

seine Fortpflanzungsgeschwindigkeit in diesen Medien verschieden ist, oder – mit anderen Worten – er wird in diesem Falle gebrochen. Die gleiche Brechung erleidet auch der seismische „Strahl“.

Beim Übergang in ein Medium, in dem die Ausbreitungsgeschwindigkeit größer ist, wird der seismische „Strahl“ im Einfallspunkt vom Lot zur Oberfläche dieses Mediums abgelenkt. Wenn er dagegen in ein Medium übergeht, in dem die Ausbreitungsgeschwindigkeit geringer ist, erfolgt die Ablenkung des einfallenden Strahls in Richtung zum Einfallslot.

Stellen wir uns vor, die Erde bestehe aus dünnen Kugelschalen, in denen sich der seismische „Strahl“ um so schneller ausbreitet, je tiefer diese Schicht liegt!

Wenn wir das Gesetz der Brechung bei dem Übergang aus einem Medium mit geringerer Ausbreitungsgeschwindigkeit in ein Medium mit größerer zugrunde legen, sehen wir, daß der seismische „Strahl“ mit zunehmender tieferem Eindringen stets weiter von der Richtung zum Erdmittelpunkt abgelenkt werden muß.

In einer gewissen Tiefe biegt der seismische „Strahl“ um und wendet sich zur Erdoberfläche zurück. Es ist leicht einzusehen, daß er sich auch auf diesem Teil seines Weges beim Übergang von einer Schicht in die andere immer stärker der Erdoberfläche zuwendet.

Darum ist der Weg des seismischen „Strahls“ eine Kurve, die mit ihrer Wölbung dem Erdmittelpunkt zugewandt ist.

Aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit der seismischen Schwingungen in verschiedenen Tiefen kann man gewisse Schlüsse auf die physikalischen Eigenschaften der Erdschichten ziehen.

Auf einer horizontalen Linie werden dazu in beliebigem Maßstab die Tiefen und auf den Vertikalen die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Wellen aufgetragen, danach verbindet man die Enden der Vertikalen zu einer Kurve. Diese Kurve zeigt, wie sich die Geschwindigkeit mit der Tiefe verändert und in welcher Tiefe die „Grenzflächen“ zwischen den Schichten der Erdkugel mit verschiedenen physikalischen Eigenschaften liegen.

Die neuesten Untersuchungen haben ergeben, daß sich in einer Tiefe von ungefähr 15 km die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Längsschwingungen plötzlich von 5,5 auf 6,3 km/s vergrößert. In einer Tiefe von ungefähr 33 km

geht wieder eine jähe Vergrößerung dieser Geschwindigkeit von 6,3 auf 7,9 km/s vor sich. Nach Bearbeitung eines umfangreichen Beobachtungsmaterials konnten die Seismologen eine Kurve entwickeln, die die Veränderungen der physikalischen Eigenschaften in verschiedenen Tiefen angibt.

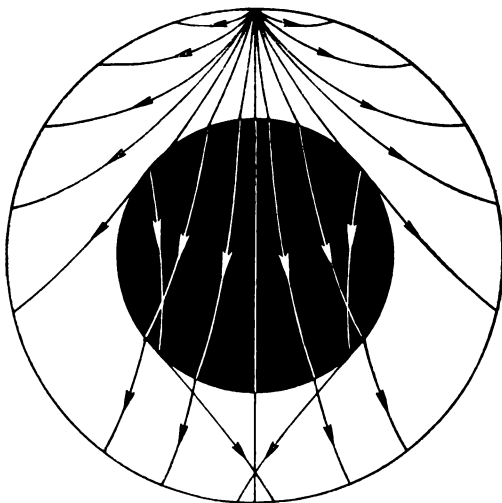


Abb. 17
Ausbreitung der seismischen
Schwingungen im Erdkörper

Wie diese Kurve zeigt, wächst die Ausbreitungsgeschwindigkeit seismischer Wellen bis zu einer Tiefe von 900 bis 1000 km schneller als in größeren Tiefen. In einer Tiefe zwischen 1000 und 2900 km werden keine plötzlichen Veränderungen beobachtet. Erst in einer Tiefe von 2900 km verringert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Längswellen plötzlich.

Das beweist, daß in dieser Tiefe die Oberfläche des Erdkernes liegt, der andere physikalische Eigenschaften als die ihn umgebende Hülle hat. In der Tat gehen die Querwellen, die sich in Flüssigkeiten nicht ausbreiten, offensichtlich nicht durch den Erdkern.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schwingungen nimmt bis zu einer Tiefe von 2900 km ständig zu, da sich die Elastizität der Erdschichten unter dem Einfluß des Druckes mit zunehmender Tiefe vergrößert. Ihre plötz-

liche Verringerung im Erdkern kann mit einer größeren Dichte der Substanz und der Verringerung des Kompressionsmoduls zusammenhängen, d. h. damit, daß sich die Kernsubstanz in ihren physikalischen Eigenschaften dem flüssigen Aggregatzustand nähert, wie es sich aus den Formeln

$$v_q = \sqrt{\frac{\mu}{d}} \text{ und } v_l = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{d}}$$

ergibt.

Bei weiterem Vordringen zum Erdkern steigt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Längswellen wieder; sie beträgt im Erdmittelpunkt, d. h. in einer Tiefe von 6370 km, ungefähr 12 km in der Sekunde.

Durch die im Laufe der letzten Jahre durchgeführten Untersuchungen ist der Nachweis erbracht worden, daß sich innerhalb des Erdkernes, der hinsichtlich der Querschwingungen die Eigenschaften eines flüssigen Körpers zeigt, ein harter Kern befindet, dessen Oberfläche in einer Tiefe von ungefähr 5000 km liegt.

Es ist uns jedoch unbekannt, welche Eigenschaften der „flüssige“ Kern unter einem Druck von Millionen kg/cm² hat. Sogar bei Laboratoriumsversuchen erhalten gewöhnlich weiche, plastische Körper unter großem Druck eine ihnen sonst nicht eigene Härte. Zum Beispiel drückt sich ein Fladen aus rohem Lehm, der in einer starken hydraulischen Presse zwischen Stahlplatten zusammengepreßt wird, ein wenig in den Stahl ein und hinterläßt auf der Oberfläche der Platten eine Vertiefung. Folglich ist der Unterschied zwischen festen und plastischen Körpern, die unter einem hohen Druck stehen, nicht mehr so groß wie unter gewöhnlichen Bedingungen.

PHYSIKALISCHE BEWEISE FÜR DIE ERDROTATION

Bereits Galilei wollte einen physikalischen Beweis für die Erdrotation finden; aber dieses Problem wurde erst zu Beginn des vorigen Jahrhunderts gelöst.

Allerdings hatte Newton auf die Möglichkeit hingewiesen, die Rotation der Erde zu beweisen, wenn man den Fall der Körper untersucht. Wie Newton 1679 der Londoner königlichen Gesellschaft mitteilte, muß ein von der Spitze eines hohen Turmes herabgeworfener Körper nicht genau senkrecht fallen, sondern etwas nach Osten abweichen. Die Abweichung wird dadurch verursacht, daß sich ein Körper, der sich in einer gewissen Höhe befindet, infolge der Erdrotation vom Westen nach Osten mit einer größeren Geschwindigkeit bewegt als das Fundament des Turmes, da er weiter vom Erdzentrum entfernt ist. Während des Falls behält er infolge der Trägheit seine Geschwindigkeit bei und überholt die Erdoberfläche etwas in der West-Ost-Bewegung.

Ein derartiger Versuch wurde erstmalig 1802 im Turm der Michaeliskirche in Hamburg ausgeführt. Eine Metallkugel, die 76,3 m herabfiel, wich beim Fall durchschnittlich 9 mm von der Vertikalen ab.

Bereits dieser Versuch, dessen Ergebnis Newton vorausgesagt hatte, bewies unwiderlegbar die Rotation der Erde. Ein halbes Jahrhundert danach machte der französische Physiker Foucault (1819–1868) indessen eine noch interessantere Beobachtung. Er hängte 1850 im Pariser Observatorium ein langes Pendel auf, das einige Stunden beständig schwingen konnte. Dabei stellte sich heraus, daß die Schwingungsebene des Pendels ihre Richtung im Vergleich zur Erdoberfläche ungefähr um 12° veränderte. Später wiederholte man diesen Versuch im Pariser Pantheon.

Aus Laboratoriumsversuchen ist bekannt, daß das Pendel seine Schwingungsebene nicht ändert, wenn sich das Stativ, an dem es aufgehängt ist, um die Achse dreht, die durch den Aufhängepunkt geht. Daher war es offensichtlich, daß sich die von Foucault beobachtete Veränderung der

Schwingungsebene nur durch die Erdrotation erklären läßt. Die Schwingungsebene des Pendels ist bestrebt, ihre Lage im Raum beizubehalten und verändert daher ihre Richtung zur rotierenden Erdoberfläche.

Die größte Wirkung könnte man an einem der Pole der Erde beobachten, da dort ihre Rotationsachse durch den Aufhängepunkt des Pendels ginge, dessen Schwingungsebene genau seine Lage im Raum beibehalten würde. Wenn seine Schwingungen auf irgendeinen Stern gerichtet sind, würden wir sehen, daß das Pendel im Laufe des Tages ohne Richtungswechsel schwingen und genau der scheinbaren täglichen Bewegung des Sternes folgen würde. Seine Schwingungsebene würde sich im Vergleich zur Erde um

$$\frac{360^\circ}{24} = 15^\circ \text{ in der Stunde von Osten nach Westen wenden.}$$

Am Äquator würde das Pendel die Schwingungsebene gegen die Erdoberfläche nicht wechseln. Aber an allen Punkten zwischen dem Äquator und den Polen dreht sich die Schwingungsrichtung im Vergleich zur Erdoberfläche mit einer Winkelgeschwindigkeit, die von der geographischen Breite des Beobachtungsortes abhängt. Der Drehungswinkel in einer Stunde beträgt $15^\circ \sin \varphi$, wobei φ die geographische Breite bedeutet.

Bereits vor Foucault hatte der französische Physiker Coriolis (1792–1843) auf die Abweichung der Körper hingewiesen, die sich auf der Erdoberfläche bewegen. Jeder Körper, der sich auf der Erdoberfläche bewegt, hat infolge der Erdumdrehung das Bestreben, aus seiner Bewegungsrichtung abzuweichen. Es wirkt auf ihn die sogenannte „Corioliskraft“. Diese Abweichung ist auch der Grund dafür, daß – auf der nördlichen Halbkugel – das rechte Ufer eines Flusses ausgewaschen und das rechte Gleis einer nur in einer Richtung befahrenen Eisenbahnstrecke infolge der auf die rechte Schiene drückenden Räder des fahrenden Zuges schneller abgenützt wird.

Um sich genau vorstellen zu können, wie diese Erscheinung entsteht, muß man untersuchen, welche Kräfte auf einen Körper an der Erdoberfläche einwirken.

Auf jeden materiellen Punkt der Erdoberfläche wirken die Gravitation P , die zum Mittelpunkt der Erde gerichtet ist, und die zentrifugale Trägheitskraft Q senkrecht zur Erdachse. Die Schwerkraft p , die ihre Resultierende ist, weicht etwas vom Erdmittelpunkt ab. Infolgedessen nimmt die Erd-

oberfläche etwa die Form eines Ellipsoids AA_1 an, damit ihre Oberfläche überall senkrecht zur Schwerkraft p ist.

Jetzt zerlegen wir die Kräfte P und Q in zwei Teilkräfte, von denen die eine mit der Richtung p übereinstimmt und die andere senkrecht zu ihr wirkt.

Die Resultierende der Kräfte p_1 und q_1 ist die Schwerkraft p . Die Kräfte p_2 und q_2 gleichen sich aus. Auf diese Weise befindet sich jeder Körper auf der Erdoberfläche unter dem Einfluß der Schwerkraft und zweier horizontal gerichteter Kräfte, von denen die horizontale Komponente der Gravitation – auf der nördlichen Halbkugel – nach Norden und die horizontale Komponente der Zentrifugalkraft nach Süden gerichtet ist.

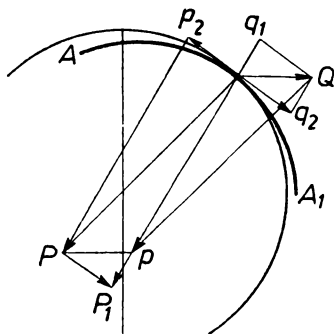


Abb. 18

Gleichgewicht der Masseteilchen
an der Erdoberfläche

Ein auf der Erdoberfläche befindlicher Körper bleibt ihr gegenüber im Zustand der Ruhe, solange sich die auf ihn einwirkenden Kräfte die Waage halten. Aber sobald er sich nach Osten, d. h. in der Richtung der Erdumdrehung, zu bewegen beginnt, vergrößert sich seine Winkelgeschwindigkeit so, als ob sich die Erde schneller drehte. Die Zentrifugalkraft vergrößert sich, und ihre horizontale Komponente, die nach Süden gerichtet ist, wird von der horizontalen Komponente der Gravitation nicht mehr ausgeglichen.

Darum weicht der Körper, der sich nach Osten bewegt, infolge des Überwiegens der horizontalen Komponente der Zentrifugalkraft nach Süden oder nach rechts ab.

Wenn sich der Körper nach Westen bewegt, verringert sich seine Winkel-

geschwindigkeit und damit auch die Zentrifugalkraft und ihre horizontale Komponente. Daher weicht er infolge des Überwiegens der horizontalen Komponente der Gravitationskraft nach Norden ab, d. h. ebenfalls nach rechts.

Auch bei der Bewegung nach Norden oder Süden äußert sich diese „Corioliskraft“. Der Körper, der sich zum Äquator bewegt, z. B. ein Teil des Flußwassers, behält infolge seines Beharrungsvermögens in der Breitenrichtung seine lineare Geschwindigkeit bei, die ihm durch die Rotationsbewegung der Erde mitgeteilt wurde. Aber die lineare Geschwindigkeit der Rotationsbewegung der Erdoberfläche wächst mit der Nähe des Äquators. Darum bleibt der Körper hinter ihr zurück und weicht von seiner Bewegungsrichtung auf der nördlichen Halbkugel nach Westen oder rechts ab. Ein Körper, der sich zum Pol bewegt, behält infolge des Beharrungsvermögens eine relativ große lineare Geschwindigkeit in der Breitenrichtung bei und überholt die Erdoberfläche, wobei er nach Osten, d. h. auf der nördlichen Halbkugel auch nach rechts, abweicht.

Folglich weicht der freie Körper, gleich in welcher Richtung er sich auf der Erdoberfläche bewegt, auf der nördlichen Halbkugel stets nach rechts und auf der südlichen nach links ab. Diese Abweichung und die Drehung der Schwingungsebene des Pendels gegen die Erdoberfläche sind unanfechtbare physikalische Beweise für die Erdrotation.

Die Erforschung der Rotation der Erde hat dank der Entwicklung der Dynamik des rotierenden Körpers große Fortschritte gemacht. Es bedeutete einen gewaltigen Schritt vorwärts, als der große Mathematiker Euler (1707 bis 1783) im Jahre 1758 den Begriff des „Trägheitsmomentes“ einführte. Als Trägheitsmoment eines rotierenden Körpers wird die Summe der Produkte aus der Masse seiner Teilchen und des Quadrats ihrer Entfernung von der Rotationsachse bezeichnet.

Zur Bestimmung des Trägheitsmoments wird der Körper in kleine Elemente zerlegt, deren Trägheitsmoment leicht festzustellen ist. Wenn man die Trägheitsmomente aller dieser Elemente addiert, erhält man das gesuchte Trägheitsmoment des Körpers. Um das Trägheitsmoment einer Scheibe gegenüber der Achse, die senkrecht zu ihr steht und durch ihren Mittelpunkt geht, zu finden, wird diese z. B. in eine große Zahl konzen-

trischer Ringe zerlegt gedacht. Das Trägheitsmoment eines jeden Ringes ist gleich dem Produkt aus seiner Masse und dem Quadrat seiner Entfernung vom Mittelpunkt der Scheibe mr^2 , wobei m die Masse des Ringes, r sein Radius ist. Wenn wir die Trägheitsmomente aller Ringe addieren, finden wir das Trägheitsmoment der Scheibe $\frac{1}{2}MR^2$, wobei M die Masse der Scheibe, R ihr Radius ist.

Auf ähnliche Weise kann man das Trägheitsmoment einer Kugel gegenüber einem ihrer Durchmesser bestimmen. Zu diesem Zweck muß man sich die Kugel durch ein System paralleler Flächen senkrecht zu diesem Durchmesser in eine große Zahl von Scheiben geteilt denken. Das Trägheitsmoment dieser Scheiben gegenüber dem Durchmesser, der ihre Rotationsachse ist, wird nach der Formel $\frac{1}{2}mr^2$ bestimmt, wobei m die Masse der Scheibe, r ihr Radius ist. Wenn wir die Trägheitsmomente aller Scheiben addieren, erhalten wir das Trägheitsmoment der Kugel $I = \frac{2}{5}MR^2$, wobei M die Masse der Kugel, R ihr Radius ist.

Die Rotationsgesetze der Körper wurden erst entdeckt, nachdem der Begriff des Trägheitsmomentes in die Mechanik eingeführt worden war. Es erwies sich, daß diese Größe für die Dynamik der rotierenden Körper dieselbe Bedeutung hat wie die Masse – genauer die Trägheit der Masse – bei der Erforschung der fortschreitenden Bewegung. Beispielsweise ist das Produkt aus dem Trägheitsmoment eines gleichmäßig rotierenden Körpers und seiner Winkelgeschwindigkeit $I\omega$ – wobei I das Trägheitsmoment, ω die Winkelgeschwindigkeit ist – dem Impuls $m\mathbf{v}$ – wobei m die Masse des Körpers, $\mathbf{v}$ die lineare Geschwindigkeit ist – eines sich fortschreitend bewegendes Körpers analog. Die Größe $I\omega$ wird als Drehimpuls eines rotierenden Körpers bezeichnet. Sie bleibt konstant, wenn auf den rotierenden Körper keine äußeren Kräfte einwirken. Daher vergrößert sich die Winkelgeschwindigkeit bei der Verringerung des Trägheitsmomentes, z. B. wenn der rotierende Körper zusammengepreßt wird.

Euler hat bereits 1758 die Gleichung für einen starren Körper entwickelt, der frei um einen unbeweglichen Punkt rotiert, und zwar sowohl für den Fall, daß auf ihn äußere Kräfte einwirken, wie auch für den, daß sie fehlen.

Ein freier Körper kann nur dann stabil um eine Achse rotieren, wenn das Trägheitsmoment des Körpers in bezug auf diese Achse einen Maximal-

wert hat. Wenn der Körper um irgendeine andere Achse rotiert, ändert er ununterbrochen die Rotationsachse, die man in diesem Falle als „momentane Drehachse“ bezeichnet.

Euler hat mathematisch bewiesen, daß, wenn die Erde um eine Achse rotiert, die mit der kürzesten Achse des Erdellipsoids nicht ganz übereinstimmt, ihre Rotationsachse um die kürzeste Achse der Erde innerhalb von 306 Sterntagen einen Kegel beschreiben muß. Da die Schnittpunkte der Rotationsachse mit der Erdoberfläche die Pole sind, müssen diese letzteren um die Punkte wandern, an denen die kürzeste Erdachse die Erdoberfläche durchstößt.

Falls diese Vermutung zutrifft, muß sich die geographische Breite aller Punkte langsam verändern und nach 306 Sterntagen den ursprünglichen Wert wieder erhalten.

Diese angenommene Veränderung der Lage der Rotationsachse im Erdkörper wurde als freie Nutation bezeichnet. Daß sie in Wirklichkeit existiert, konnte man nur durch Beobachtungen nachweisen. Infolge der Geringfügigkeit der tatsächlich existierenden Breitenveränderung konnte man sie indessen lange nicht erkennen. Erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde durch feinste und sorgfältigste Messungen festgestellt, daß sich die geographische Breite der astronomischen Observatorien periodisch etwas verändert. Während sich dabei an einem Punkt die Breite vergrößert, verringert sie sich am symmetrisch gelegenen Punkt auf der anderen Seite des Pols. Diese Bewegungen der Pole sind nicht groß; sie wandern innerhalb eines Kreises von noch nicht 10 m Radius.

Es zeigte sich jedoch, daß die Periode der freien Nutation nicht 306, sondern 428 Tage betrug.

Daß das theoretisch Erschlossene nicht völlig mit der Wirklichkeit übereinstimmte, erklärte sich dadurch, daß Euler die Erde für einen absolut starren Körper hielt, während sie eine gewisse Elastizität besitzt.

Die Entdeckung, daß sich die Breiten ändern, gestattete, wie wir später sehen werden, wichtige Schlüsse auf die Starrheit der Erde.

Außer der freien Nutation unterliegt die Erde unter dem Einfluß der Anziehung des Mondes und der Sonne Schwingungen, die als erzwungene Nutation bezeichnet werden (siehe auch S. 159).

Die Erdrotation wird oft mit der Drehung eines Kreisels verglichen, obwohl die Drehachse eines Kreisels nicht so völlig frei ist wie die der Erde. Wenn wir den Kreisel loslassen, sehen wir, daß er durch die Rotation in vertikaler oder schräger Lage gehalten wird, obwohl sein Schwerpunkt höher als sein Stützpunkt liegt. Diese Standfestigkeit des Kreisels hängt damit zusammen, daß ein Körper, der sich um eine freie Achse dreht, seine Richtung im Raum beizubehalten strebt. Dies ist eine Erscheinungsform der Trägheit.

Wenn auf den Kreisel keine äußeren Kräfte einwirkten, würde auch seine Rotationsachse ihre Richtung im Raum nicht ändern. Aber auf ihn wirkt die Schwerkraft, die ihn umzuwerfen, d. h. seine Rotationsachse zu kippen strebt. Infolge der Zusammenwirkung der rotierenden Bewegung des Kreisels und seiner Anziehung durch die Erde beschreibt seine Achse im Raum einen Kegel, wie man durch den Versuch leicht feststellen kann.

Die Rotationsachse der Erde ist, wie die der anderen Planeten, gleichfalls bestrebt, ihre Richtung im Raum beizubehalten. Die Erde rotiert um die Achse, die zur Ebene ihrer Bahn im Winkel von $66\frac{1}{2}^\circ$ geneigt und auf den Punkt der Himmelssphäre gerichtet ist, den man Weltpol nennt und der sich gegenwärtig in der Nähe des Polarsternes befindet.

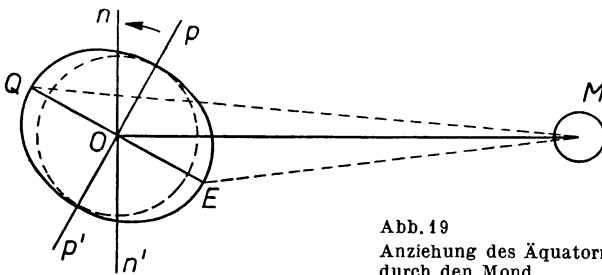


Abb. 19
Anziehung des Äquatorringes der Erde
durch den Mond

Die Erde ist aber keine „mathematische“ Kugel. Man kann sie sich unter Vorbehalt als eine Kugel vorstellen, die am Äquator mit einem dicken Reifen umgeben ist. Die Anziehung der Masseteilchen dieser Kugel durch den Mond kann die Lage der Rotationsachse der Erde im Raum nicht

beeinflussen, da die Resultierende der Anziehungskräfte durch ihren Mittelpunkt geht. Aber die Anziehungskraft des Mondes ist bestrebt, den Äquatorring in die Ebene der Mondbahn zu kippen, da der dem Mond nächstgelegene Teil des Ringes mit größerer Kraft angezogen wird als der von ihm weiter entfernte.

Auf ähnliche Weise wirkt auf den Äquatorring der Erde auch die Sonne, die ihn in die Ebene der Erdbahn zu drehen sucht; die Wirkung der Sonne ist jedoch – trotz ihrer ungeheuren Masse – infolge ihrer ungeheuren Entfernung von der Erde nur ungefähr halb so stark wie die des Mondes.

Wenn sich die Erde dabei nicht um ihre Achse drehte und der Mond nicht um die Erde kreiste, würde das Erdellipsoid infolge der Anziehung des Äquatorringes durch den Mond pendelförmige Schwingungen ausführen, deren Achse der Äquatordurchmesser wäre, der senkrecht auf der Linie steht, die den Mittelpunkt des Mondes und der Erde verbindet.

Infolge des Umlaufs des Mondes um die Erde ändert sich seine Lage gegen die Äquatorebene. Dasselbe geschieht auch mit der Sonne infolge des Umlaufs der Erde.

Deshalb ändert sich auch die Kraft, die die um eine mittlere Lage schwingende Erdachse ablenkt. Wenn sich der Mond oder die Sonne in der Äquatorebene der Erde befinden, ist die Kraft, die die Rotationsachse der Erde ablenkt und infolge der Anziehung durch diese Körper entsteht, gleich Null. Sie erreicht einen Maximalwert, wenn der Mond oder die Sonne in der größten Entfernung vom Himmelsäquator – der Projektion des Erdäquators auf das Himmelsgewölbe – stehen.

Die Anziehung der ringartigen Verdickung der Erde durch den Mond und die Sonne wirkt wie die Schwerkraft auf den sich drehenden Kreisel. Die Achse der Erde beschreibt wie die des Kreisels im Raum eine Kegelfläche, deren Spitze im Erdmittelpunkt liegt, wobei sie eine stete Neigung gegen die Ebene der Erdbahn beibehält. Die Periode dieser Bewegung beträgt annähernd 26 000 Jahre; in ihrem Verlauf beschreibt der Weltpol auf der Himmelssphäre um den Schnittpunkt des Lots zur Ebene der Erdbahn mit der Himmelssphäre einen Kreis.

Diese Erscheinung wird die Präzession oder genauer Präzession der Tag- und Nachtgleiche genannt. Bei der Veränderung der Richtung der Erd-

achse ändert sich auch die Lage der Äquatorebene im Raum im Verhältnis zu den Sternen. Infolgedessen bewegen sich die Schnittpunkte des Himmelsäquators mit der Ebene der Ekliptik oder die Punkte der Tagundnachtgleiche der (scheinbaren) jährlichen Bewegung der Sonne am Himmel entgegen, und jedesmal tritt die Tagundnachtgleiche etwas früher ein, als wenn diese Punkte ihre Lage nicht wechseln würden.

Da die Präzessionskräfte ihre Stärke infolge der unterschiedlichen Stellung des Monds und der Sonne zur Äquatorebene ändern, ist die Erdachse geringen Schwingungen unterworfen, die man erzwungene Nutation nennt.

Die wichtigste der Schwingungen, die mit der erzwungenen Nutation zusammenhängen, hat eine Periode von 18,6 Jahren gleich der Umlaufperiode der Mondknoten, der Schnittpunkte der Mondbahn mit der Ekliptik.

Man benützt die gleichmäßige Erdrotation, um die Zeit zu messen. Die Periode, im Lauf derer die Erde einmal um ihre Achse rotiert und die nach der scheinbaren täglichen Bewegung der Sonne oder der Sterne festgestellt wird, dient als Zeiteinheit, die in kleinere Teile geteilt wird, in Stunden, Minuten und Sekunden.

Die Sonnen- und Wasseruhren des Altertums wie auch die neuzeitlichen Pendel- und Federuhren zeigen die Sonnenzeit an, die an der sichtbaren Bewegung der Sonne am Himmel gemessen wird.

Die Griechen haben zahlreiche verschiedenartige Sonnenuhren erfunden. Bei den einen fiel der Schatten einer kleinen Säule auf eine Wand, bei den anderen auf die Oberfläche einer Kugel, eines Kegels oder eines Zylinders. Dieser Schatten – der Zeiger der Sonnenuhr – drehte sich je nach der Bewegung der Sonne am Himmel und zeigte auf die Teilstriche des Zifferblatts.

Wasseruhren gab es schon im alten Ägypten und in Babylonien. Die Griechen vervollkommneten sie. Das Wasser, das aus dem oberen Gefäß der Wasseruhr tropfte, hob den Wasserspiegel in dem unteren Gefäß, in dem sich ein Schwimmer befand. Auf dem Schwimmer stand gewöhnlich eine Figur mit einem dünnen Rohrstock in der Hand. Dem Wasserstand im unteren Gefäß entsprechend bewegte sich das Ende des Rohrstockes auf einem zylinderförmigen Zifferblatt und zeigte die Zeit an.

Um die Wasseruhr nach der Sonne zu „stellen“, öffnete man den Hahn des

oberen Gefäßes in dem Augenblick, wenn der obere Rand der Sonne gerade den Horizont berührte. Wenn sie dann um die Breite der Scheibe aufgestiegen war und den Horizont mit dem unteren Rand berührte, gab die Menge des ausgelaufenen Wassers einen „Schritt“ der Sonne an. Der Stab in der Hand der kleinen Figur bezeichnete ihn auf dem Zifferblatt. 30 Sonnen„schritte“ ergaben eine Stunde.

Da die tägliche Bewegung der Sonne eine Widerspiegelung der Erdumdrehung ist, wird die Zeit an der Winkelgeschwindigkeit der Erdumdrehung gemessen.

Es gab keinen Grund, die Regelmäßigkeit der Erdumdrehung zu bezweifeln, bis der englische Astronom Halley (1656–1742), der seine Mondbeobachtungen mit denen des arabischen Astronomen Al Battani (850–929) verglich, zu der Folgerung kam, daß sich die Bewegung des Mondes auf seiner Bahn beschleunigt.

Auf der Suche nach einer Erklärung für diese Erscheinung nahm der deutsche Astronom Johann Tobias Mayer (1723–1762) an, daß die Beschleunigung des Mondes nur scheinbar sein kann und mit einer Verlangsamung der Erdrotation zusammenhängt. Der Tag wird etwas länger, und der Mond vollzieht seinen Umlauf in einer geringeren Zeit, daher scheint es, als ob er vorausseile.

Warum sich die Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation ändert, konnte jedoch niemand erklären. Erst 1755 äußerte Immanuel Kant (1724–1804), der sich zu dieser Zeit mit der Struktur und der Entstehung des Sonnensystems befaßte, die Vermutung, daß die Erdrotation durch die Reibung der Flutwelle, die sich entgegen der Erdrotation bewegt, verlangsamt wird. Aber Kant konnte keine mathematische Berechnung vornehmen, die seine Hypothese bestätigt hätte, daher fand sie auch bei den Astronomen keine Beachtung.

Die beobachtete Beschleunigung der Mondbewegung beläuft sich auf 10 Winkelsekunden im Jahrhundert. Einen Teil dieser Beschleunigung erklärte Laplace durch den Nachweis, daß die große Achse der Mondbahn infolge der Anziehung des Mondes durch die Sonne kürzer wird, was eine Beschleunigung der Bewegung des Mondes hervorruft. Aber hieraus war nur eine Abweichung um 5 bis 6'' im Jahrhundert zu erklären. So blieb

eine restliche Abweichung von 4'' bestehen, die durch das Gesetz der allgemeinen Gravitation nicht zu erklären war.

Dieser letzte Teil der Beschleunigung wurde 1865 von dem französischen Astronomen Delaunay (1816–1872) erklärt, der zuerst den möglichen Einfluß der durch die Gezeiten eintretenden Reibung auf die Erdrotation errechnete und hierin den Grund für eine Verlangsamung der Erdrotation sah. Eine Verlängerung des Tages um 0,001 Sekunden in hundert Jahren hätte ausgereicht, um die beobachtete Beschleunigung der Bewegung des Mondes zu erklären.

In den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts wies der englische Astronom George Darwin (1845–1912), der die Gezeiten intensiv erforscht hatte, nach, daß durch die Gezeiten eine Reibung erfolgt, die die Rotation der Erde verlangsamt.

Die Verlangsamung der Rotation der Erde, die durch die Reibung der Gezeiten hervorgerufen wird, verlängert nach den neuesten Daten, die auf den Beobachtungen der letzten 250 Jahre beruhen, den Tag in hundert Jahren um 0,0005 bis 0,0014 Sekunden.

Wie klein diese Größe auch sein mag, muß doch im Laufe der geologischen Perioden, die Hunderte von Millionen Jahre dauern, die Veränderung der Länge des Tages ziemlich bedeutend sein.

Seit der Bildung der ältesten zu Tage tretenden Gesteine, deren Alter auf 2 Milliarden Jahre geschätzt wird, muß sich der Tag ungefähr um 8 Stunden verlängert haben.

Außer der konstanten jahrhundertelangen Verlangsamung wurden auch sprunghafte Veränderungen – Verlangsamungen und Beschleunigungen – der Rotation der Erde festgestellt. Derartige Veränderungen der Winkelgeschwindigkeit der Erde wurden 1667, 1758, 1784, 1864, 1876, 1897 und 1920 beobachtet. In den beiden letztgenannten Jahren betrug die Veränderung 0,004 Sekunden.

Die Veränderung der Winkelgeschwindigkeit der Erde wurde neuerdings durch Beobachtungen mit Hilfe der Quarzuhr nachgewiesen. Bei der Quarzuhr dient als „Pendel“ ein Kristallplättchen, das in ganz bestimmter Richtung aus einem Quarzkristall herausgeschnitten wird. Ein solches Blättchen kann in einem Wechselstromkreis Schwingungen größter Frequenzkonstanz

ausführen, die zur Regulierung einer Uhr verwendet werden können. Die Ungenauigkeit einer Quarzuhr beträgt nicht über 0,0002 bis 0,0003 Sekunden am Tag.

Noch genauer ist die Atomuhr. Bei ihr spielen die Schwingungen von Gasmolekülen, die durch ultrahochfrequenten Strom erregt und unterhalten werden, die Rolle eines Pendels. Ihr Gang wird durch die Schwingungen von Ammoniakmolekülen geregelt.

Die Schwingungen der Gasmoleküle haben eine konstante Frequenz. Sie bieten ein noch zuverlässigeres Zeitmaß als die Rotationsgeschwindigkeit der Erde. Darum kann man nach der Atomuhr auch die Unregelmäßigkeit der Erdrotation feststellen.

Von den sprunghaften Veränderungen der Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation werden die einen periodisch im Jahresablauf beobachtet, die anderen treten nur zeitweise auf. Nach den Beobachtungen rotiert die Erde am schnellsten im August und am langsamsten im März. Der Unterschied in der Länge der Tage mißt dabei nur nach tausendstel Sekunden.

Diese periodischen Veränderungen der Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation erklären sich nach Untersuchungen von N. N. Pariski und anderen Geophysikern durch Veränderungen in der Zirkulationsrichtung der Luftmassen. Infolge der Reibung zwischen der Luft und der Erdoberfläche verlangsamt oder beschleunigt sich die Erdrotation ein wenig, je nach der Richtung, in der sich die Luftmassen bewegen. Dabei bleibt natürlich der Gesamt-Drehimpuls der Erde mit der Wasser- und Lufthülle unverändert.

Die Ursache der nichtperiodischen, sprunghaften Beschleunigungen und Verlangsamungen der Erdrotation kann nach Pariskis Meinung nur die Veränderung ihres Trägheitsmomentes infolge irgendwelcher innerer Prozesse sein. Bei der Verringerung des Trägheitsmomentes der Erde vergrößert sich die Winkelgeschwindigkeit der Rotation und umgekehrt. Aber vorläufig ist es noch unklar, welche Ursachen einer Veränderung des Trägheitsmomentes zugrunde liegen.

Wenn wir nach Pariski annehmen, daß eine Hochebene auf dem 35. Breitengrad mit einer Fläche, die $\frac{1}{100}$ der ganzen Erdoberfläche beträgt und die sich in einer Höhe von 4000 m befindet, im Laufe eines Jahres zerstört und dem Meeresspiegel gleichgemacht würde, so könnte man damit eine

relative Vergrößerung der Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation um $\frac{1}{3 \times 10^8}$ erklären, was den beobachteten sprunghaften Veränderungen ent-

spricht. Aber derartige Katastrophen ereignen sich auf der Erde nicht.

Wenn sich aus irgendeinem Grunde die ganze Erdkugel dehnte oder zusammenzöge, so daß sich ihr Durchschnittsradius um 13 cm verlängerte oder verkürzte, würde sich das Trägheitsmoment der Erde so verändern, daß man die beobachteten Beschleunigungen und Verlangsamungen der Erdrotation auch damit erklären könnte.

Die modernen Geräte reichen nicht aus, um eine derartige Veränderung des Erdradius festzustellen; und andererseits sind uns keine Ursachen bekannt, die diese Ausdehnungen und Zusammenziehungen bewirken könnten.

Wenn sich schließlich irgendeine Kugelschale verdichtete oder ausdehnte, würde sich auch das Trägheitsmoment der Erde verändern. Eine relative Veränderung der Dichte bei einer 1000 m mächtigen Schicht, die in einer Tiefe von 80 km liegt, um 0,05 bis 0,06 würde ebenfalls genügen, um die beobachtete Beschleunigung oder Verlangsamung der Erdrotation zu erklären.

DIE ERSCHEINUNGEN DER GEZEITEN UND DIE HÄRTE DER ERDE

Infolge der Veränderung der Lage der Erdachse und auch unter dem Einfluß gezeitenbildender Kräfte sowie wegen der Verlangsamung der Erdrotation infolge der Reibung durch die Gezeiten muß sich die Gestalt der Erde etwas ändern. Jedoch setzt die Erde der Veränderung ihrer Gestalt beträchtlichen Widerstand entgegen, d. h., sie zeigt die Eigenschaften eines festen Körpers.

Die Gestalt der Erde wird stets durch das Verhältnis zwischen der Zentrifugalkraft und der Gravitationskraft bestimmt, die auf ihre Massenteilchen einwirken. Wenn sich die Lage der Rotationsachse im Erdkörper ändert, verändert sich auch die Stärke der Zentrifugalkräfte, die auf jedes Teilchen einwirken. Daher verändert sich auch die Lage des äquatorialen Ringes der Erde ein wenig.

Die von Euler theoretisch erschlossene beständige Veränderung der Lage der Rotationsachse im Erdkörper wurde in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts durch direkte Beobachtungen der Breitenveränderung bestätigt.

Euler betrachtete die Erde bei seinen Berechnungen als einen absolut starren Körper und erhielt bekanntlich eine Periode der freien Nutation von 306 Sterntagen. In Wirklichkeit beläuft sich die Periode der freien Nutation auf 428 Tage.

Nach der Dauer der Periode der freien Nutation kann man die Härte oder den elastischen Widerstand der Erde gegen Gestaltsveränderungen berechnen.

Die Länge der Periode der freien Nutation zeigt, daß die Erde insgesamt kein absolut starrer Körper ist, sondern den auf sie einwirkenden Kräften etwas nachgibt, wobei sie ihnen etwa denselben Widerstand wie harter Stahl entgegensetzt.

Die Amplitude der erzwungenen Nutation hängt auch von der Härte der Hülle und dem Aggregatzustand des Erdkernes ab. Wenn die Hülle absolut

starr und der Kern vollkommen flüssig wäre und der Veränderung seiner Form keinerlei Widerstand entgegensetzte, so wäre die Amplitude der durch den Mond hervorgerufenen, erzwungenen Nutation, die den größten Teil dieser Erscheinung ausmacht, etwas größer, als sie es in Wirklichkeit ist. Folglich ist die Erdhülle nicht absolut starr, sondern elastisch und die Substanz des Erdkernes keine ideale Flüssigkeit.

Auf die Härte der Erde kann man auch aus der Wirkung der fluterzeugenden Kräfte schließen.

Die Gezeiten sind eine kosmische Erscheinung, und ihr Mechanismus konnte nicht ohne die Kenntnis des Gesetzes der allgemeinen Gravitation verstanden werden. Wie wir sahen, war die Erklärung der Gezeiten durch Galilei, obwohl sie den Gesetzen der Dynamik nicht widersprach, doch unzutreffend. Erst Newton konnte, nachdem er die allgemeine Gravitation entdeckt hatte, die Gezeiten erklären, die durch die Anziehung des Mondes und der Sonne hervorgerufen werden.

Wir wollen zunächst betrachten, wie die Anziehungskraft des Mondes auf die Gewässer des Ozeans wirkt, da infolge seiner Erdnähe der durch ihn hervorgerufene Fluteffekt 2,17mal so stark ist wie der von der Sonne ausgehende.

Bereits Poseidonius wußte, daß das Steigen der Meeresflut mit der Bewegung des Mondes am Himmel zusammenhängt. Er schrieb: „Die Bewegung des Ozeans geht in richtiger Reihenfolge wie die der Himmelskörper vor sich; was man als tägliche, monatliche und jährliche Bewegung sieht, ist durch die Bewegung des Mondes bedingt. Denn wenn der Mond um die Größe eines Tierkreiszeichens höher als der (östliche) Horizont steht, beginnt das Meer zu fließen und erfaßt einen sichtbaren Teil des Festlandes, bis der Mond den Meridian erreicht hat. Wenn er den Meridian durchläuft, wendet sich das Meer allmählich zur Ebbe, bis der Mond die Höhe eines Zeichens über dem westlichen Horizont erreicht hat. Dann bleibt das Meer ohne Bewegung . . . Der Mond bewegt sich so lange unter der Erde, bis er um ein Tierkreiszeichen unter dem Horizont sinkt. Dann beginnt das Meer erneut vorzudringen, bis der Mond den (selben) Meridian unter der Erde erreicht; es weicht dann wieder zurück, bis der Mond, der sich ostwärts bewegt, nur um ein Tierkreiszeichen unter dem Horizont

steht; es bleibt in Ruhe, bis sich der Mond um ein Tierkreiszeichen über dem Horizont erhoben hat; dann beginnt es wieder vorwärts zu fließen.“

Wir bemerken, daß der Mond die Massenteilchen ihrem Abstand entsprechend ungleichmäßig anzieht. Ein Teilchen im Erdzentrum ist durchschnittlich 60 Erdradien vom Mond entfernt, das dem Mond am nächsten gelegene 59 und das entfernteste 61 Erdradien.

Drücken wir die Anziehungskraft des Mondes auf die Erdteilchen in Bruchteilen der Erdschwere aus: Die Anziehung eines Teilchens durch den Mond, das sich in der Entfernung eines Erdradius vom Mittelpunkt des Mondes befindet, muß $\frac{1}{82}$ des Gewichtes dieses Teilchens auf der Erdoberfläche betragen, da die Masse des Mondes nur $\frac{1}{82}$ der Erdmasse ausmacht.

Die Anziehung der Körper verhält sich nun aber umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung. Daher zieht der Mond ein Teilchen im Erdzentrum mit einer Kraft von $\frac{1}{82} \times \frac{1}{60^2}$ an, ein auf der ihm zugewandten Erdseite gelegenes mit einer Kraft von $\frac{1}{82} \times \frac{1}{59^2}$ und ein auf der ihm abgewandten Erdseite liegendes Teilchen mit einer Kraft von $\frac{1}{82} \times \frac{1}{61^2}$ des Gewichtes eines Teilchens auf der Erdoberfläche.

Außer der Anziehung des Mondes wirkt auf jedes Teilchen noch eine andere Kraft, deren Ursprung die Bewegung der Erde um den gemeinsamen Schwerpunkt der Erde und des Mondes ist. Obwohl man gewöhnlich sagt, daß der Mond um die Erde kreise, kreisen in Wirklichkeit die Erde und der Mond um den gemeinsamen Massenmittelpunkt, der sich in einer Entfernung von 0,73 Erdradien vom Erdmittelpunkt befindet.

Um uns vorstellen zu können, welchen Weg jedes Erdteilchen infolge des Kreisens der Erdkugel um diesen gemeinsamen Massenmittelpunkt im Raum beschreibt, wollen wir für einen Augenblick die Erdrotation außer acht lassen.

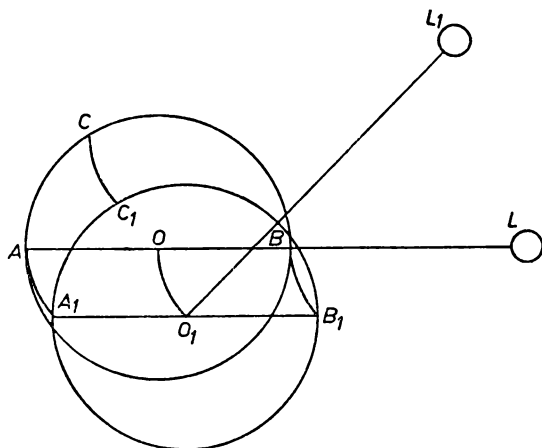
Beim Kreisen um den gemeinsamen Massenmittelpunkt befinden sich die Erde und der Mond immer in einer geraden Linie, die durch den Massenmittelpunkt geht. Wenn der Mondmittelpunkt von dem Punkt L in den Punkt L_1 übergeht, beschreibt der Erdmittelpunkt den Kreisbogen OO_1 .

Gleichzeitig beschreibt der Punkt A den gleichen Bogen AA_1 , der Punkt B den Bogen BB_1 , der Punkt C den Bogen CC_1 usw.

Jedes beliebige Erdteilchen legt den gleichen Bogen wie der Mittelpunkt der Erde zurück. Wenn der Mittelpunkt der Erde einen vollen Kreis beschreibt, so gilt das auch für jedes seiner Teilchen. Infolge dieser kreis-

Abb. 20

Entstehung der Zentrifugalkräfte durch die Bewegung der Erde um das Massenzentrum von Erde und Mond



förmigen Bewegung entsteht eine Zentrifugalkraft, die in der dem Mond entgegengesetzten Richtung auf alle Erdteilchen in gleicher Stärke wirkt.

Die Anziehungskraft des Mondes wirkt auf jedes Erdteilchen. Da sich das System der Erde und des Mondes im Gleichgewicht befindet, gleicht sich die Anziehungskraft des Mondes für ein Teilchen im Erdmittelpunkt mit der dort entstehenden Zentrifugalkraft aus. Das bedeutet, daß die Zentrifugalkraft, die auf jedes Erdteilchen wirkt, so groß ist wie die Anziehungskraft des Mondes auf ein Teilchen im Erdmittelpunkt.

Der Mond zieht das ihm am nächsten liegende Erdteilchen mit einer Kraft

von $\frac{1}{82} \times \frac{1}{59^2}$ der Schwerkraft an, und in entgegengesetzter Richtung wirkt eine Kraft, die $\frac{1}{82} \times \frac{1}{60^2}$ der Schwerkraft ausmacht. Infolgedessen wird

dieses Teilchen vom Mond mit einer Kraft von $\frac{1}{82} \times \frac{1}{59^2} - \frac{1}{82} \times \frac{1}{60^2}$ angezogen, d. h., diese Kraft ist etwa $\frac{1}{9000000}$ der Schwerkraft, sie wird die fluterzeugende Kraft genannt.

Auf das vom Mond am weitesten entfernte Teilchen wirkt eine Kraft in der dem Mond entgegengesetzten Richtung. Ihre Größe beträgt

$\frac{1}{82} \times \frac{1}{60^2} - \frac{1}{82} \times \frac{1}{61^2}$, d. h. ungefähr gleichfalls $\frac{1}{9000000}$ der Schwerkraft.

Auf alle anderen Teilchen der dem Mond zugewandten Erdhalbkugel wirken gleichartige, aber geringere Kräfte, die im allgemeinen auf den Mond gerichtet sind. Auf die Teilchen der anderen Erdhalbkugel wirken diese fluterzeugenden Kräfte im allgemeinen in einer vom Mond wegweisenden Richtung. Unter dem Einfluß dieser Kräfte steigt im Ozean die Flutwelle sowohl auf der dem Mond zugewandten wie auch gleichzeitig auf der ihm entgegengesetzten Seite.

Wenn das Wasser des Ozeans keine innere Reibung hätte, würde der Kamm der Flut sich direkt „unter dem Mond“ heben.

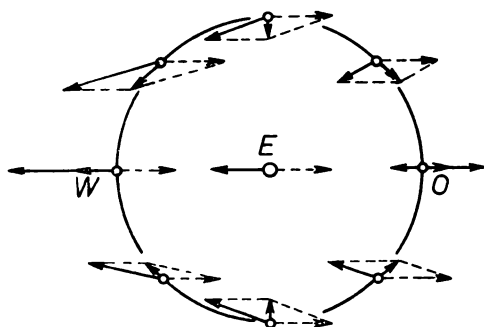


Abb. 21
Verteilung und Richtung
der fluterzeugenden Kräfte

Aber die Hebung des Kammes verzögert sich infolge der inneren Reibung des Wassers, und der Kamm wird durch die Bewegung der Erde in der Drehrichtung verschoben.

Der Mond, der sich in M befindet, zieht die Flutkämme p und p' an. Wenn man sich diese als starre Vorsprünge der Erde vorstellt, ist es völlig einleuchtend, daß die Anziehungskraft des Mondes die Flutwelle p zurückhält, während p' angezogen wird und zur Beschleunigung der Erdrotation beiträgt; p' ist weiter vom Mond entfernt als p ; daher ist die Beschleunigung der Erdrotation geringer als die Hemmung, und im Endergebnis hemmt der Mond die Rotation der Erde.

Obwohl die Flutkämme in Wirklichkeit nicht starr sind, überträgt nämlich die innere Reibung des Wassers einen Teil der hemmenden Anziehung auf den Erdkörper und hemmt damit seine Rotation. Wie schon gesagt, wird der Tag infolge der Reibung der Gezeiten immer länger.

Man kann bereits aus der Höhe der Flut einen Schluß auf die Härte der Erde im ganzen ziehen, d. h. auf den Widerstand, den sie der Gestaltveränderung durch äußere Kräfte entgegensetzt.

Wenn die Erde ein flüssiger Körper wäre und sich den fluterzeugenden Kräften nicht widersetzen würde, könnten wir an ihr keine Gezeiten bemerken, da sich der Meeresgrund und auch die Küsten genau so heben und senken würden wie der Meeresspiegel.

Tatsächlich beobachten wir jedoch Ebbe und Flut. Die Gezeiten sind aber, wie schon der englische Gelehrte W. Thomson (Lord Kelvin, 1824–1907) im Jahre 1863 feststellte, um $\frac{1}{3}$ geringer als sie es auf einer absolut starren Erde sein müßten. Er erklärt dies dadurch, daß die Erdkruste gleichfalls den fluterzeugenden Kräften nachgibt und die Gezeiten in der harten Erdkruste die scheinbare Höhe der Gezeiten im Ozean verringern.

Nach Thomsons Berechnung würden die Gezeiten, wenn die gesamte Erde die Härte des Glases hätte, nur $\frac{2}{5}$ ihrer Höhe auf einer absolut starren Erde erreichen. Wenn die Erde die Härte des Stahls hätte, würde die Flutwelle $\frac{2}{3}$ dieser Höhe erreichen.

Die Flutwelle des Ozeans erreicht in dem Augenblick, wenn sich der Mond und die Sonne in einer geraden Linie befinden, die durch den Erdmittelpunkt geht, d. h. zur Zeit der Konjunktur und der Opposition, mit 0,8 m die größte Höhe. Wie George Darwin nachgewiesen hat, beträgt die Hebung der Erdkruste etwa $\frac{1}{3}$ der Fluthöhe. Folglich ist die größte Höhe dieser „harten“ Flut etwa 0,25 m.

Die Erde wechselt unter dem Einfluß der fluterzeugenden Kräfte elastisch ihre Form, indem sie sich in der Richtung des Mondes etwas streckt. Dabei setzt sie, wie die Berechnung zeigt, der Veränderung ihrer Form den gleichen Widerstand entgegen wie ein Stahlkörper.

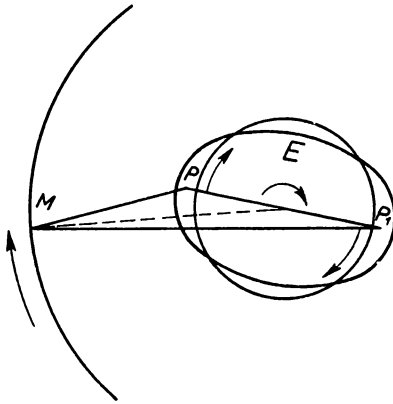


Abb. 22
Hemmung der Erddrotation
durch die Flutwelle

Die Erscheinung der „harten“ Flut kann man auch unmittelbar bemerken, wenn man die Abweichung des Lotes unter dem Einfluß fluterzeugender Kräfte beobachtet. Bereits M. W. Lomonossow (1711–1765) wies darauf hin, daß kosmische Kräfte auf das Lot einwirken.

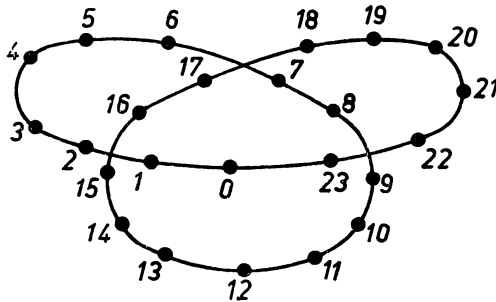
Das Lot auf der dem Monde zugewandten Seite der Erde wird durch den Überschuß der Anziehung durch den Mond abgelenkt; auf der umgekehrten Seite weicht es infolge der überschüssigen Zentrifugalkraft ab. Infolgedessen stimmt die Richtung des Lotes nicht mehr mit der ursprünglichen Richtung der Schwerkraft überein, die durch die Gravitation zum Erdmittelpunkt und die Zentrifugalkraft, die bei der Erddrotation entsteht, bestimmt wird. Außerdem muß sich die Lage des Lotes zur Erdoberfläche infolge ihrer Deformation verändern, da die Erde nicht die Eigenschaften eines absolut starren Körpers besitzt.

In der Folge werden wir, wenn wir von der Abweichung des Lotes sprechen, diese beiden Ursachen für die Veränderung seiner Lage in Betracht ziehen.

Die Richtung des Lotes im Raum hängt natürlich von der relativen Lage der Erde, des Mondes und des Lotes ab. Man kann theoretisch berechnen, wie die fluterzeugenden Kräfte auf die Lage des Lotes bei einer beliebigen geographischen Breite und einer beliebigen Lage der Erde auf der Bahn im Laufe des Tages wirken und welche Kurve das Ende des Lotes täglich auf einer absolut starren Erde beschreiben würde.

Abb. 23

Die Ablenkung eines Lotes unter dem Einfluß fluterzeugender Kräfte bei einer Deklination des Mondes von $+16^\circ$, bezogen auf eine geographische Breite von 30° N.



Die Veränderungen der Lage des Lotendes erwiesen sich als so geringfügig, daß sie mittels eines vertikalen Pendels nicht zu beobachten waren, obwohl George Darwin zu Beginn der achtziger Jahre des vorigen Jahrhunderts einen derartigen Versuch unternahm.

Darwin konstruierte ein ungewöhnlich empfindliches, vertikales Pendel, das im Keller des Laboratoriums von Cambridge untergebracht wurde. Die ganze Anlage war von einem Mantel mit doppelten Wänden umgeben; der Zwischenraum zwischen ihnen war mit Wasser gefüllt, um die Anlage gegen Temperaturschwankungen zu schützen. Durch die Abweichungen des Pendels wurde ein kleiner Spiegel gedreht, der eine kleine Gasflamme widerspiegelte. An der Bewegung dieses Widerscheines konnte man die Abweichung des Pendels kontrollieren. Die Anlage war außerordentlich empfindlich. Wenn ein Beobachter, der einige Meter vom Pendel entfernt war, von einem Fuß auf den anderen trat, änderte das Pendel seine Lage, ganz so wie eine Stecknadel, die in Gallert steckt, sich bei einem leichten Fingerdruck auf dessen Oberfläche etwas neigt. Nur wirkte in diesem Fall die Erde selbst wie Gallert.

Trotz dieser Empfindlichkeit des Pendels gelang es nicht, seine unter der Einwirkung des Mondes erfolgende Abweichung zu entdecken und zu erforschen. Sie wurde durch verschiedene andere Faktoren überlagert. Erst durch die Anwendung eines Horizontalpendels konnte der Einfluß der fluterzeugenden Kräfte auf das Lot geklärt werden. Derartige Beobachtungen nahmen die russischen Astronomen I. J. Kortazzi in Nikolajew und A. J. Orlow in Poltawa, der Deutsche Schweydar in Freiberg u. a. vor.

A. J. Orlow (1880–1954) leistete Hervorragendes auf dem Gebiet der Gravimetrie. Er wurde bereits 1911 auf einer wissenschaftlichen Tagung in Manchester zum Mitglied des internationalen Komitees zur Erforschung der Deformation der Erde gewählt. In den folgenden Jahren bestimmte Orlow die Schwerkraft in den Gebieten am Irtysh, Ob und Bi. 1913 begann er mit Beobachtungen über die Anziehung des Pendels durch den Mond, die er mittels eines Horizontalpendels hauptsächlich in Poltawa durchführte, wo er ein gravimetrisches Observatorium eingerichtet hatte.

Durch die Beobachtungen Orlows und anderer Gelehrten wurde festgestellt, um wieviel die beobachteten Abweichungen des Lotes sich von den errechneten unterscheiden und welchen Widerstand die Erde insgesamt der Veränderung ihrer Gestalt unter der Einwirkung der fluterzeugenden Kräfte entgegensetzt.

Wenn die Erde ein absolut starrer Körper wäre und nicht durch die fluterzeugenden Kräfte einer Deformation unterworfen würde, müßte, wie die Berechnung zeigt, das Ende eines Lotes von 120 km Länge auf der Erdoberfläche 1 cm von der normalen Lage, d. h. von der Richtung der Schwerkraft, abweichen.

Wenn die Erde flüssig wäre, würde sie den fluterzeugenden Kräften keinen Widerstand entgegensetzen und ihre Gestalt frei verändern, indem sie sich in der Richtung Erde–Mond ausdehnte. In diesem Falle würden ihre Teilchen immer so angeordnet sein, daß sich die Erdoberfläche in jedem Punkt senkrecht zum Lot befände; andernfalls könnten die Teilchen der Erdoberfläche nicht im Gleichgewicht bleiben. Darum könnten wir die Abweichungen des Lotes auf der Oberfläche einer flüssigen Erde nicht bemerken.

Faktisch unterscheidet sich die Kurve, die durch Beobachtungen ermittelt

wurde, in der Amplitude der Abweichungen ein wenig von der theoretisch bestimmten. Das erklärt sich dadurch, daß die Erde kein absolut starrer Körper ist. Sie unterliegt selbst bis zu einem gewissen Grade den fluterzeugenden Kräften, und ihre Deformation verdeckt teilweise die Abweichung vom Lot.

Durch den Vergleich der beobachteten Lotabweichungen mit denen, die sich rechnerisch für eine absolut starre Erde ergeben, kann man den Grad des elastischen Widerstandes bestimmen, den die Erde der Veränderung ihrer Gestalt insgesamt entgegensetzt.

Die Beobachtungen über die Veränderung der Lage des Lots ließen elastische Krümmungen der Erdkruste erkennen, die bald unter dem Gewicht der anrollenden Flutwelle, bald beim Freiwerden von dieser Belastung eintraten.

Wenn sich die Flutwelle dem Kontinent nähert, biegt sich die Erde unter dem Gewicht der ungeheuren Wassermasse ein, und die Oberfläche des Festlandes nimmt eine leicht geneigte Lage ein.

Da alle 6 Stunden und 15 Minuten die Flut durch die Ebbe abgelöst wird und umgekehrt, schwingt der breite Küstenstreifen bald nach der einen, bald nach der anderen Seite. Diese Bewegung kann an der Veränderung der Lage des Lotes zur Erdoberfläche erkannt werden, die unter dem Gewicht der Flutwelle deformiert wird.

Das Gesetz, nach dem sie sich deformiert, gleicht dem Gesetz, nach dem sich die Neigung der Oberfläche einer dünnen Gelatinehaut ändert, wenn man auf sie mit dem Finger drückt. Bei diesem Versuch verändert sich die Abweichung der Senkrechten zur Oberfläche der Haut umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung von dem Punkt, an dem der Druck ausgeübt wird.

Die Ergebnisse dieses Versuches kann man auf die Abweichung des Lotes an den Küsten anwenden, die unter dem Druck der anrollenden Flutwelle deformiert werden.

Man muß dabei berücksichtigen, daß die Anziehung des Lotes durch die Masse der Flutwelle seine Abweichung von der normalen Lage noch vergrößert.

Wenn wir annehmen, daß der Widerstand der Erdkruste dem eines Glases

von durchschnittlicher Härte entspricht, kann man annähernd berechnen, wie groß die Einbiegung des Meeresgrundes unter dem Gewicht der Flutwelle ist. Die Berechnung ergibt, daß die Oberfläche der nächstgelegenen Küsten um wenige hundertstel Winkelsekunden geneigt wird.

Mit zunehmender Entfernung von den Küsten ins Innere des Festlandes verringert sich die Neigung rasch. Bei den Beobachtungen der Lotabweichungen unter Einwirkung der fluterzeugenden Kräfte wird auch immer der Einfluß der wechselnden Belastung berücksichtigt, die durch die Wassermasse der Flutwelle erzeugt wird.

Die Wirkung dieser wechselnden Belastung wurde nicht nur theoretisch errechnet, sondern auch durch Horizontalpendel in Nikolajew und in anderen Observatorien festgestellt.

Bei der mathematischen Bearbeitung der elastischen Mond- und Sonnenzeiten und der freien Nutation der Erde ging M. S. Molodenski von folgenden Voraussetzungen aus:

1. Die Erde ist eine elastische, heterogene, zusammenpreßbare Kugel;
2. die Erde ist ein flüssiger Körper;
3. die Erde besitzt eine elastische Hülle, in deren Innerem ein flüssiger Kern eingeschlossen ist;
4. die Erde besitzt eine elastische Hülle und einen homogenen, elastischen, nicht zusammenpreßbaren Kern.

Dabei nahm er an, daß die Erdhülle elastisch und ihren elastischen Eigenschaften und ihrer Dichte nach heterogen ist.

Die Untersuchungen führten Molodenski zu dem Schluß, daß die beobachtete Periode der freien Nutation durch die Existenz eines Erdkernes erklärt werden kann, der in seinen Eigenschaften einem flüssigen Körper ähnelt.

Mit dieser Folgerung stimmen auch die Ergebnisse der Untersuchung der erzwungenen Nutation durch den englischen Gelehrten Jeffreys überein, die wir schon oben erwähnten.

DIE ELASTISCH-ZÄHEN DEFORMATIONEN DER ERDE

Gegenüber verhältnismäßig kurzzeitig wirkenden Kräften verhält sich die Erde wie ein elastischer Körper. Wenn aber die Kräfte lange Zeit wirken, erleidet die Erde nichtelastische Deformationen und leistet einen Widerstand, der aus ihrer Zähigkeit bestimmt werden kann.

Die Zähigkeit der flüssigen Körper wird durch folgenden Versuch charakterisiert:

Versenken wir in ein Gefäß mit Glycerin eine horizontale Glasscheibe, die an einem dünnen Draht aufgehängt ist! Wenn man das obere freie Ende des Drahtes verdrillt, bewegt sich infolge der Drehkraft auch die Glasscheibe; an der Bewegung von auf der Oberfläche des Glycerins schwimmenden Korkstückchen erkennen wir, daß sich die Bewegung der Flüssigkeit mitgeteilt und sich auf der Oberfläche des Glycerins ausgebreitet hat. Dieser Versuch zeigt uns, daß die Schicht der Flüssigkeit, die die Scheibe berührt, durch deren Bewegung mitgerissen wird, diese bewegte Schicht nimmt ihrerseits die nächstfolgende Flüssigkeitsschicht mit usf. Hierbei treten der Bewegungsrichtung entgegengesetzt gerichtete Kräfte auf, die den zwischen festen Körpern wirkenden Reibungskräften ähneln. Als Ursache dieser Kräfte wird die Zähigkeit der Flüssigkeit bezeichnet. Eine Kugel mit dem Radius r , die sich mit einer Geschwindigkeit v in der Flüssigkeit bewegt, begegnet einem Widerstand $6\pi r v \eta$, wobei η der Zähigkeitskoeffizient ist, der durch den Versuch bestimmt wird.

Um zu verstehen, warum die Erde, die die Eigenschaften eines festen, elastischen Körpers besitzt, nichtelastische Deformationen erfahren kann, muß man die Eigenschaften der festen Körper genauer kennen.

Die festen Körper haben eine Kristallstruktur. Das bedeutet, daß sie aus Teilchen zusammengesetzt sind, die regelmäßig im Raum angeordnet sind. Wie die Röntgenuntersuchung nachweist, besteht der kubische Kristall des Steinsalzes aus Chlor- und Natriumatomen, die abwechselnd die Ecken

kleinster Würfel bilden. In dieser Lage werden sie von den Bindungskräften gehalten, die zwischen den Atomen und den Molekülen harter Körper wirken. Sie verhindern, daß diese Teilchen sich weit von einer mittleren Lage entfernen. Bei allen anderen Kristallen sind die Teilchen gleichfalls in verschiedener Weise gesetzmäßig angeordnet.

In den Flüssigkeiten sind die Teilchen dagegen nicht gesetzmäßig angeordnet; sie zeigen nur einen geringen molekularen Zusammenhalt. Es gibt aber auch „feste Flüssigkeiten“, deren Teilchen sich jeder Verschiebung widersetzen, obwohl sie so regellos wie in den gewöhnlichen Flüssigkeiten angeordnet sind. Hierzu gehören z. B. Asphalt, Siegellack und Glas.

Falls ein Druck, der die Grenzen der Elastizität nicht überschreitet, lange auf sie einwirkt, werden sowohl die „festen Flüssigkeiten“ wie auch die Kristallkörper nichtelastisch deformiert oder geraten ins „Fließen“. Wenn man auf einen festen Körper einen Druck einwirken läßt, der unter der Grenze seiner Festigkeit bleibt, aber andauernd ist, entsteht zunächst eine augenblickliche, elastische Deformation, danach beginnt ein langsames Fließen. Dabei geht die ursprünglich elastische Deformation, die beim Aufhören des Druckes verschwindet, allmählich in eine von selbst nicht mehr zurückgehende, bleibende Deformation über.

Wenn Asphalt auf Steinboden fällt, zerbricht er in spitze Splitter. Eine aus Asphalt gearbeitete Stimmgabel gibt bei vorsichtigem Anschlag einen Ton, d. h., sie zeigt Eigenschaften wie ein fester Körper. Wenn man aber Asphaltstücke in einen Trichter legt, fließen sie mit der Zeit wie eine Flüssigkeit zu einer einzigen Masse mit glatter Oberfläche zusammen. Ein kleines Gewicht auf der Oberfläche des Asphalts sinkt im Laufe der Zeit ein, d. h., es geht unter wie in Wasser. Darauf beginnt der Asphalt aus der Trichteröffnung zu fließen, wenn auch viel langsamer als z. B. flüssiges Öl. Unter dem Trichter sammelt sich ein Tropfkegel an wie von einem flüssigen Teig. So verhält sich also der Asphalt unter der Einwirkung seines eigenen Gewichtes wie eine Flüssigkeit.

Der Strahl und der Tropfkegel des Asphalt bleiben jedoch feste Körper und können durch einen leichten Hammerschlag in spitze Splitter zerschlagen werden.

Siegellack und Glas besitzen die Fließfähigkeit in geringerem Maße. Sie

zeigen diese Eigenschaft nur unter Druck oder bei einer gewissen Erwärmung, da sie zäher sind als Asphalt. Eine stark erwärmte, wenn auch noch feste Glasplatte, die an den Enden unterstützt wird, biegt sich bei geringer Belastung durch und bleibt auch nach Entfernung der Last gebogen.

Die Fließfähigkeit des Asphalts, des Siegellacks und des Glases erklärt sich – wie gesagt – dadurch, daß die Moleküle dieser Körper wie die einer Flüssigkeit ungeordnet liegen. Nur die ihnen eigene Zähigkeit verhindert die Verschiebung der Moleküle und die Veränderung der Form dieser Körper.

Ähnlich verhalten sich Kristalle unter einem dauernden allseitigen Druck. Bei einer Kompression von zwei Seiten, die die Elastizitätsgrenze überschreitet, werden bei einem eisernen oder kupfernen Würfel zuerst die Seiten herausgedrückt, er wird einem Fäßchen ähnlich und dann zu einer Scheibe. Unterwirft man einen Steinwürfel einem starken Druck, beginnt er bei einer gewissen Belastung zu zerfallen, die „Seiten fallen heraus“, der Würfel nimmt die Form von zwei Pyramiden an, die einander mit den Spitzen zugekehrt sind, und danach gleiten diese Pyramiden aneinander vorbei. Wenn der Würfel in einem engen Behälter eingeschlossen ist, wird auf dessen Wände in horizontaler Richtung ein Druck ausgeübt, der geringer ist als der vertikal auf den Würfel ausgeübte Druck. Wenn aber der vertikale Druck auf den Würfel verstärkt wird, so steigt der Druck in horizontaler Richtung schnell und gleicht sich schließlich dem vertikalen an. Der Druck verteilt sich also im Würfel genauso wie in einer Flüssigkeit, d. h. nach allen Seiten mit gleicher Stärke; und in diesem Zustand beginnt der Körper zu fließen.

Es gelang, im Laboratorium die Fließfähigkeit zu beobachten, die die festen Körper unter Einwirkung großen Druckes erhalten. Zu diesem Zwecke wurde ein Stück Marmor in einem dickwandigen Stahlbehälter einem allseitigen Druck unterworfen. Um den Druck der Wände des Behälters auf die ganze Oberfläche des Steines zu übertragen, wurden die leeren Zwischenräume in dem Behälter mit Paraffin ausgegossen. Nach dem Öffnen des Stahlbehälters fand man in ihm statt eines eckigen, unregelmäßigen Marmorstückes einen Marmorabguß, der die innere Form des Behälters mit solch einer Genauigkeit wiedergab, als wäre er aus Wachs. Offensicht-

lich hatten sich die Teilchen des harten Marmors verlagert, wie dies in einem flüssigen Körper geschieht.

Körper, die gleichzeitig die Eigenschaften des festen und des flüssigen Aggregatzustandes besitzen, können elastisch-zäh genannt werden.

Im Erdinneren erhalten die Gesteine unter dem ungeheuren Druck gleichfalls Fließfähigkeit. Daher ist die Erde ein elastisch-zäher Körper, der je nach der Dauer der Spannungen elastische oder zähe Deformationen erleidet. So verändert die Erde z. B. unter Einwirkung der Zentrifugalkräfte ihre Form nicht wie ein elastischer Körper, sondern wie eine flüssige Masse. Sie ist dabei jedoch wesentlich zäher als harter Siegelack.

Eine vollständige mathematische Untersuchung über die Formveränderung eines Planeten durch seine Rotationsgeschwindigkeit konnte man bisher nur für eine als flüssig gedachte Masse durchführen. Sie wurde von Clairaut begonnen und von dem Mathematiker Ljapunow (1857–1918) vollendet.

Diese Gelehrten untersuchten die Rotation einer heterogenen flüssigen Masse und wiesen nach, daß man ihre Form bei einer langsamen Rotation annähernd als zusammengedrücktes Ellipsoid ansehen kann.

Aus der Gleichung, die die Form einer rotierenden flüssigen Masse bestimmt, kann man eine Formel für ihre Kompression ableiten, wenn das Verhältnis der Zentrifugalkraft am Äquator zur Schwerkraft und eine weitere Größe, die sogenannte „dynamische Kompression“, die durch astronomische Beobachtungen bestimmt wird, bekannt sind. Wenn man mittels dieser Formel die Abplattung der Erde berechnet, ergibt sich ein Wert von $\frac{1}{297,6}$, d. h., sie stimmt fast mit der Abplattung des Krassowski-Ellipsoids überein, die $\frac{1}{298,3}$ beträgt. Folglich verhält sich die Erde gegenüber den Zentrifugalkräften wie ein flüssiger Körper. Daher ist es vollkommen natürlich, daß in ihr alles Material in Kugelschalen gelagert ist, die voneinander durch Grenzflächen getrennt sind, wie auch die seismologischen Untersuchungen erkennen ließen.

Bei einer Veränderung der Rotationsgeschwindigkeit der Erde muß sich ihre Abplattung verändern, da sich dabei die Größe der Zentrifugalkräfte und daher auch die Richtung der Schwerkraft auf der Erdoberfläche ändern.

Durch die ganz allmähliche Verlangsamung der Erdrotation verringert sich

die Größe der ständigen Zentrifugalkraft. Infolgedessen muß sich der Äquatorradius langsam verkürzen und der Polorradius verlängern.

Da die Verlangsamung der Rotation unter der Einwirkung der konstanten Kraft der Flutreibung entsteht, ist die Formveränderung der Erde die Deformation eines elastisch-zähen Körpers. Die Zähigkeit der Erde ist sehr groß, und die Veränderung ihrer Form infolge der Verlangsamung der Rotation muß äußerst langsam vor sich gehen, aber die Verlangsamung der Rotation wirkt ununterbrochen, und daher verringert sich ihre Abplattung unaufhörlich. Diese Verringerung der Kompression entspricht einer äußerst geringen Verlangsamung der Erdrotation und kann praktisch nur nach Ablauf eines sehr großen Zeitraumes bemerkt werden.

Wenn die Verlängerung der Sterntage infolge der Verlangsamung der Winkelgeschwindigkeit der Erde durch die Flutreibung im Laufe von 1600 Millionen Jahren mit derselben Intensität vor sich ginge wie in der Gegenwart, müßte sich der Tag um $\frac{0,001 \times 1600 \times 10^6}{100}$ = ungefähr 4 Stunden

verlängern, d. h. die Rotationsperiode der Erde betrug vor 1600 Millionen Jahren ungefähr 20 Stunden oder $\frac{5}{6}$ des jetzigen Tages. Die Winkelgeschwindigkeit, die der Umlaufzeit umgekehrt proportional ist, war damals $\frac{6}{5} = 1,2$ mal so groß. Entsprechend der Verringerung der Winkelgeschwindigkeit der Rotation mußte die Abplattung der Erde allmählich geringer werden, d. h., die Polarachse mußte sich verlängern und die Äquatorialachse sich verkürzen.

Die Abplattung wächst proportional zum Quadrat der Winkelgeschwindigkeit; daher betrug sie damals $\frac{1}{298} \times 1,2^2$ oder ungefähr $\frac{1}{210}$. Nach denselben Berechnungen war die Abplattung des Erdellipsoids vor 200 Millionen Jahren $\frac{1}{288}$.

F. N. Krassowski wies auf die Möglichkeit hin, daß die durch die Reibung der Flut eintretende Verlangsamung der Erdrotation auf die Erdoberfläche einwirkt:

„Mit der Veränderung der Geschwindigkeit der Erdrotation ändert sich ihre Form; die Erdrotation verlangsamt sich; daher muß sich ihre polare Ab-

plattung verringern; der Umfang der Erdkugel kann indessen als konstant angenommen werden . . . Im Laufe gewaltiger Zeiträume verlängert sich die Polarachse der Erde; die Äquatorialachse verkürzt sich. Natürlich muß dieser Vorgang von entsprechenden Massenverlagerungen in der Erdkruste und in der Schicht unter der Kruste begleitet sein.“

Schon die Schicht unter der Kruste hat die Eigenschaften eines elastisch-zähen Körpers. Die Erdkruste – diese Benennung stammt noch aus der Zeit, als man das Erdinnere für schmelzflüssig hielt – bildet keine gewölbte Decke, die durch die molekularen Kräfte zwischen ihren Teilchen zusammengehalten wird. Wie I. D. Lukaschewitsch (1863–1928) zeigte, könnte sie trotz der Kohäsion zwischen ihren Teilchen unter der Wirkung der eigenen Schwere nicht intakt bleiben.

Stellen wir uns vor, daß wir aus der oberen Schicht der Erde einen Zylinder herauschneiden, unter dessen Basis ein leerer Raum ist. Der Zylinder wird sich nur durch die Kohäsion an seiner Seitenfläche halten, doch wird das Gewicht ihn nach unten ziehen. Durch eine einfache Berechnung ist leicht zu beweisen, daß sich schon ein Zylinder mit einem Basisradius von 2 km in der Erdkruste nicht durch Kohäsionskräfte halten kann.¹

Man kann die ganze Erdkruste bis zu einer gewissen Tiefe betrachten, als ob sie aus nicht miteinander verbundenen Säulen zusammengesetzt wäre, die sich nur durch den Widerstand der unter ihnen liegenden Kugelschicht im Gleichgewicht halten.

Daher übt die Erdkruste einen ungeheuren Druck auf die unter ihr liegende Schicht aus. Dieser Druck ist leicht zu ermitteln, wenn man annimmt, daß die Erde von einer Gesteinsschicht bedeckt ist, deren spezifisches Gewicht bis zu einer Tiefe von 20 km durchschnittlich $2,75 \text{ p/cm}^3$ beträgt, und daß unter ihr eine Gesteinsschicht mit einem spezifischen Gewicht nicht unter $3,00 \text{ p/cm}^3$ liegt.

Es ist leicht zu verstehen, daß der Druck unter diesen Voraussetzungen in einer Tiefe von 100 km ungefähr $30\,000 \text{ kg/cm}^2$ erreicht. Alle Gesteine der

¹ Die Seitenfläche des Zylinders ist gleich $2\pi rh$, wobei r der Radius seiner Basis und h die Höhe (in cm) ist. Die Kohäsionskraft ist für Basalt z. B. $300\,000 \text{ g/cm}^2$ und für die ganze Seitenfläche $300\,000 \times 2\pi rh$.

Das Gewicht des Zylinders ist $\pi r^2 h d$, wobei d die Dichte – bei Basalt 3,0 – ist. Damit sich der Zylinder halten kann, muß sein Gewicht gleich oder geringer als $300\,000 \times 2\pi rh$ sein. Wenn $300\,000 \times 2\pi rh = 3\pi r^2 h$ ist, ergibt sich für r ein Wert von $200\,000 \text{ cm}$ oder 2 km.

Erde gehen unter einem derartigen Druck in einem amorphen Zustand über und nehmen die Eigenschaften „fester Flüssigkeiten“ an.

Im vergangenen Jahrhundert herrschte unter den Geologen die Meinung, daß das Innere der Erdkugel aus einem flüssigen oder zähen Magma bestünde. Darum lag die Annahme nahe, daß die Kontinentalschollen in einem schweren Basaltmagma schwämmen und ihr Gleichgewicht durch die Gesetze der Hydrostatik zu erklären sei.

Seitdem in unserer Zeit nachgewiesen worden ist, daß die Erde fest ist und keine durchgehende Schicht aus schmelzflüssiger Substanz enthält – durch sie könnten keine seismischen Querschwingungen dringen –, muß man annehmen, daß sich die feste Substanz der unter der Erdkruste liegenden Schicht unter dem Druck der Kontinentalschollen wie ein elastisch-zäher Körper verhält. Dadurch erklärt sich auch die Hebung und Senkung der Kontinentalschollen.

Zahlreiche Spuren junger Bewegungen der Erdkruste sind an den Küsten des Finnischen Meerbusens und an der gesamten Südküste der Ostsee zu beobachten. Spuren einer kürzlichen Senkung der Meeresküste sind im Süden der Krim bemerkbar. Hier wurden im vorigen Jahrhundert 200 m von der Küste entfernt in zehn Meter Tiefe die Ruinen einer griechischen Stadt gefunden.

Die Hebung der skandinavischen Halbinsel wurde durch unmittelbare Beobachtungen festgestellt. Zu Beginn des 18. Jahrhunderts war in der Höhe des Meeresspiegels eine Markierung angebracht worden, die sich 100 Jahre später 1,36 m über dem Meeresspiegel befand.

In Südamerika ist das Hochland von Peru und Bolivien in junger Zeit stark gehoben worden. Auch die Bildung des tiefsten Cañons der Welt, des Colorado-Cañons in Nordamerika, ist auf eine – geologisch betrachtet – kürzlich erfolgte Hebung zurückzuführen.

Langsame Hebungen und Senkungen umfangreicher Gebiete der Erdkruste sind eine unumstrittene Tatsache.

Eine beachtliche Besonderheit dieser Krustenbewegung ist das gleichzeitige Auftreten von Hebungen und Senkungen. So hebt sich z. B. die ganze Nordküste der Ostsee, und das Meer tritt hier zurück, während sich im Süden die Küste senkt und das Meer vordringt.

Wie die Beobachtungen in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts gezeigt haben, gilt ähnliches auch von den Küsten Hollands und Belgiens und der atlantischen Küste Frankreichs.

Die Vorstellung von einem „Schwimmen“ der Kontinentalschollen liegt der Hypothese der Isostasie oder des Gleichgewichtes der Schollen der Erdkruste zugrunde.

Eine der Varianten dieser Hypothese wurde 1855 von dem englischen Astronomen Airy (1801–1892) entwickelt. Er schrieb: „Ich nehme an, daß die Berge und Hochebenen keinen anderen Halt haben als den, der durch das Hineindrücken des unteren Teiles der leichten Erdkruste in eine festere Lava entsteht; die horizontale Ausdehnung dieses Vorsprungs entspricht im wesentlichen der horizontalen Ausdehnung der Hochebene, und die Tiefe des unteren Vorsprungs ist so, daß die dadurch vergrößerte Schwimmfähigkeit ungefähr dem Gewichtsüberschuß durch das Herausragen der Hochebene nach oben entspricht. Ich stelle mir vor, daß der Zustand der Erdkruste, die auf der Lava liegt, genau mit einem Floß verglichen werden kann, das auf dem Wasser schwimmt; wenn wir an dem Floß einen Stamm bemerken, dessen obere Seite wesentlich höher als die der anderen Stämme liegt, können wir davon überzeugt sein, daß seine untere Seite tiefer im Wasser liegt als die der übrigen.“

Nach der Hypothese von Airy, die mit den geologischen Vorstellungen von der Erde übereinstimmt, sinken die Granitkontinentalschollen mit ihrer Basis in dichtere Basaltschichten ein, ähnlich wie Eisberge im Ozean. Ihr Gleichgewicht unterliegt dem Gesetz des Archimedes, so daß das Gewicht des verdrängten Basaltgesteins gleich dem der ganzen Granitscholle ist, einschließlich der Teile, die über die Basaltschicht hinausragen und Kontinente bilden. Wenn eine der Kontinentalschollen langsam versinkt, steigen die anliegenden Blöcke auf. Dabei fließt die feste, aber plastische Substanz der Basaltschicht langsam unter der sinkenden Scholle ab und sammelt sich unter der aufsteigenden Nachbarscholle.

Nach dieser Hypothese bildet die Erdkruste eine geschlossene Basaltschicht, die unter dem Meeresboden nahe an die Erdoberfläche tritt, auf den Kontinenten jedoch durch die Basis der Kontinentalschollen zurückgedrängt ist. Dadurch erklärt sich der in Gebirgsgegenden beobachtete „Massen-

schwund“, der sich in einer gewissen Verringerung der Gravitationskonstante äußert. Auf der Oberfläche des Ozeans ist dagegen, trotz der mächtigen Wasserdecke, deren geringe Dichte die Schwerkraft abschwächen muß, diese letztere etwas größer als auf dem Festland, was sich durch die Nähe der schweren Basaltschichtmassen erklärt.

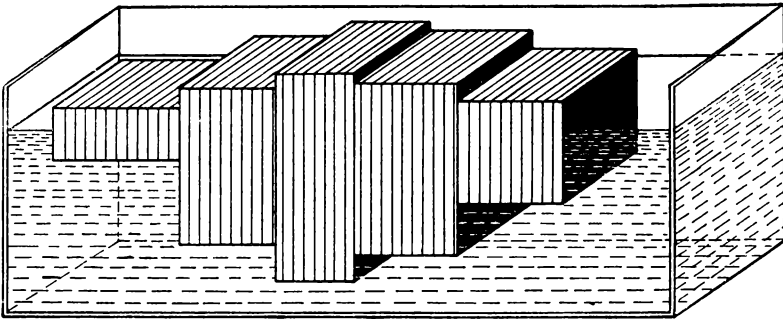


Abb. 24

Isostasie nach Airy

Von dieser Erwägung aus kann man die Stärke der Erdkruste auf den Kontinenten berechnen.

Nehmen wir die durchschnittliche Dichte der unter der Kruste gelegenen Schicht mit $3,0$ und die der Kontinentalschollen mit $2,67 \text{ g/cm}^3$ an! Das Volumen des Magmas, das durch den eingesunkenen Teil der Kontinentalscholle verdrängt ist, ist um so viel kleiner als das Volumen der Scholle, die wir uns der Einfachheit halber als Prisma vorstellen, wie die Dichte des Magmas größer als die der Substanz der Scholle ist. Daraus folgt, daß sich die Höhe der Scholle zur Tiefe ihres eingesunkenen Teils wie $3,0:2,67 \approx 9:8$ verhält, d. h., über der Oberfläche des Magmas ragt nur $\frac{1}{8}$ der Höhe der Kontinentalscholle auf.

Wenn die Dichte der Gesteine auf dem Meeresboden gleich der Dichte der unter der Kruste befindlichen Schicht des Magmas ist und die durchschnittliche Höhe der Kontinente über dem Meeresspiegel ungefähr 4500 m beträgt, so besitzen die Kontinentalschollen eine Mächtigkeit von $4,5 \times 8 = 36 \text{ km}$.

Aus verschiedenen Berechnungen ergibt sich für die Kontinente eine Mächtigkeit von 30 bis 50 km.

Man kann annehmen, daß die Erdkruste aus einzelnen Säulen besteht, die sich fast unabhängig voneinander heben und senken können. Zur Erhaltung ihres Gleichgewichts muß der Druck von unten nach oben, der auf jede von ihnen von der zusammengepreßten plastischen Masse innerhalb der Erde ausgeübt wird, dem Gewicht der Säule gleich sein.

Die Plastizität des Erdinneren ist auf den Druck der höhergelegenen Massen der Erdkruste und das Ansteigen der Temperatur zurückzuführen. Darum muß die Basis der sich senkenden Säulen allmählich in einen plastischen Zustand übergehen und sich mit der übrigen plastischen Masse vereinigen, in der sich der Druck hydrostatisch überträgt. Die anliegenden Säulen müssen sich unter dem Druck der plastischen Masse heben.

Eine andere Variante der Isostasiehypothese entwickelte der englische Geodät Pratt im Jahre 1870. Seiner Meinung nach besteht die Erdkruste aus verschieden hohen Schollen von unterschiedlicher Dichte, die auf der Oberfläche des Magmas schwimmen. Ihre Basen liegen in gleicher Tiefe und daher muß ihre Höhe, damit das Gleichgewicht gewahrt bleibt, umgekehrt proportional zur Dichte sein. Das stimmt nicht mit den geologischen Beobachtungen überein.

Nach dieser Hypothese ist das Relief der Erdoberfläche aus der verschiedenen Dichte der Krustenschollen abzuleiten; die Schollen mit geringerer Dichte haben eine größere Höhe und bilden Erhebungen; die dichteren Schollen sind von geringerer Mächtigkeit, ihre Oberfläche liegt tiefer und sie bilden Niederungen – den Meeresboden.

Säulen von gleichem Querschnitt, irgendwo auf der Erdkruste, auf einem Kontinent oder auf dem Grund des Ozeanes, haben das gleiche Gewicht, und demzufolge ist der Druck auf ihre Basis derselbe. Auf allen Flächen oberhalb ihrer Basis ist der Druck infolge der abweichenden Dichte verschieden. Die Basis, in der sich der Druck der Hochebenen und der Bergmassive durch die größere Dichte der Schollen des Meeresbodens oder der Niederungen ausgleicht, wird Kompensationsfläche genannt.

Die unteren Schichten an der Basis jener Säulen, die sich unter einer zusätzlichen Belastung senken – die z. B. durch die Ablagerung der Meeres-

sedimente auf dem Boden der Becken entsteht –, gehen in plastischen Zustand über, und die Höhe der Säulen, von der isostatischen Kompensationsfläche bis zur Oberfläche gerechnet, bleibt konstant.

Oberhalb dieser Fläche sind die Schollen nach Meinung der Anhänger Pratts im üblichen Sinne fest; sie bleiben intakt, da sie sich nur vertikal verschieben. Der seitliche Druck, der in den Säulen durch die Kompression entsteht, wird durch die Härte der nächstliegenden Säulen ausgeglichen, und daher erfolgt keine Verschiebung der Gesteine in der Horizontalen.

Unterhalb der Kompensationsfläche gleicht sich der seitliche Druck in den Säulen mit dem vertikalen aus, die Gesteine sind plastisch, der Druck überträgt sich hydrostatisch, und die Substanz hat eine gleichmäßige Dichte. Hier gehen die Verschiebungen ungehindert in horizontaler Richtung vor sich.

Nehmen wir an, daß sich ein Tafelberg, dessen Grundfläche einige Dutzend km^2 und dessen Höhe 5000 m beträgt, einzeln inmitten einer Ebene erhebt! Die Säule der Erdkruste unter der Grundfläche des Berges gleicht auf der Kompensationsfläche den Druck der Säule unter der Ebene aus. Angenommen, daß die Kompensationsfläche in einer Tiefe von 100 km liegt, werden wir das Verhältnis der Dichte der Säule unter der Ebene zur Dichte des Berges mit $\frac{100 + 5}{100} = 1,05$ ermitteln, d. h., die Dichte der Gesteine in

der Ebene liegt um 5 Prozent über der Dichte des Gesteins des Berges.

Ebenso leicht läßt sich umgekehrt auch die Kompensationsfläche bestimmen, wenn man von der jeweiligen Dichte der Gesteine ausgeht. Auf diese Weise wurde berechnet, daß die Kompensationsfläche in einer Tiefe von 50 bis 100 km liegt.

Daß sich die Schollen der Erdkruste in einem dynamischen Gleichgewicht befinden, ist nicht zu leugnen, sondern wird durch die Gesetze der Mechanik bedingt. Zweifellos wird im allgemeinen Entwicklungsprozeß der Erdkruste das zerstörte Gleichgewicht ihrer Schollen langsam wiederhergestellt. Aber die dabei entstehenden Bewegungen der Erdkruste sind nicht ihre wichtigsten Bewegungen, sondern nur ein Teil der allgemeinen Bewegung der Erdkruste, deren Ursache noch nicht genügend erforscht ist.

Im vorigen Jahrhundert wurde allgemein die Hypothese anerkannt, daß sich die Erde infolge Abkühlung zusammenzieht – die Kontraktionshypo-

these. Nach dieser Hypothese soll sich die harte Erdkruste der sich verkleinernden Fläche der unter ihr liegenden Schicht anpassen, indem sie ihrer Senkung beständig folgt, sich nie über ihr aufwölbt, sondern sich in Falten legt.

In der Neuzeit wird die Kontraktionshypothese von vielen Geologen und Geophysikern abgelehnt. Andere geben jedoch zu, daß die Zusammenziehung der Erde wahrscheinlich einer ihrer wichtigsten Entwicklungsfaktoren ist, zumal sie auch infolge der Verdichtung der Erdschubstanz unter der Einwirkung eines ungeheuren Drucks erfolgt. So schreibt z. B. der sowjetische Geophysiker W. F. Bontschkowski: „Viele Tektoniker lehnen die Kontraktionstheorie auch deshalb ab, weil sie nicht die ganze Kompliziertheit der tektonischen Prozesse und der Gebirgsbildung auf der Erdoberfläche erklärte. Wenn man allen ausgesprochenen Zweifeln gerecht wird, so läßt sich doch schwerlich in Abrede stellen, daß die Kontraktionshypothese eine große Rolle spielen kann. Man muß besonders betonen, daß bei der Kontraktion der Erde thermische Vorgänge auftreten, die allmählich die Abkühlung hemmen, vielleicht sogar völlig aufheben und damit die Voraussetzungen für eine neuerliche Abkühlung im folgenden Zyklus schaffen. Außerdem sind uns die Wärmeabgabe beim radioaktiven Zerfall und ihre Veränderungen nicht genau bekannt, so daß es noch verfrüht ist, die Kontraktionshypothese völlig abzulehnen.“

Wichtig für die Entwicklung der Erde sind ferner die Massenverlagerungen in der unter der Kruste gelegenen Schicht durch Druckunterschiede. Derartige Verschiebungen sind nicht nur unter einem Druck möglich, der die Festigkeit der Gesteine übersteigt, sondern auch bei Spannungen, die unterhalb dieser Grenze liegen.

Da die Erdkruste unter dem Meeresboden schneller erkaltet als auf den Kontinenten und da die kontinentalen Gesteine eine stärkere Radioaktivität aufweisen, ist es möglich, daß ein Wärmegleichgewicht fehlt. Daher kann in der elastisch-zähen Schicht unterhalb der Kruste bis hin zur Oberfläche des Kerns eine Strömung auftreten.

Derartige Strömungen sind theoretisch möglich, obwohl ihre Existenz sehr schwer nachzuweisen ist, da ihre Geschwindigkeit infolge der äußerst hohen Zähigkeit des Materials sehr gering ist.

DIE TEMPERATUR DER ERDE

Die Temperatur des Erdinneren ist eine der am wenigsten erforschten Eigenschaften der Erde.

Die äußere Temperatur der Erdkruste und der Atmosphäre hängt fast ausschließlich von der Erwärmung durch die Sonne ab. In der Tropenzone empfängt jeder cm^2 an der Grenze der Atmosphäre in der Minute etwa 2 Kalorien Sonnenwärme; ein Teil dieser Wärme wird in den Weltraum reflektiert.

Die Wärme, die die Gesteine in die Atmosphäre ausstrahlen, wird von den in ihr enthaltenen Wasserdämpfen und dem Kohlendioxyd absorbiert; der Sauerstoff und der Stickstoff der Luft lassen dagegen die von der Erdoberfläche ausgehende Wärmestrahlung durch.

Die Sonnenwärme dringt nicht tief in die Erdkruste ein. Die Temperatur der Gesteine bleibt in einer Tiefe von 25 bis 30 m im ganzen Jahresablauf konstant.

Genaue Daten über die Erdtemperatur liegen nur für Tiefen von weniger als 5000 bis 6000 m vor, da die Bohrlöcher noch keine größere Tiefe erreicht haben.

Auf Grund der Messungen in den Bohrlöchern wurde festgestellt, daß die Temperatur mit der Tiefe durchschnittlich je 33 m um 1°C steigt. Diesen Wert nennt man die geothermische Tiefenstufe. In der einer unmittelbaren Untersuchung zugänglichen Zone der Erdkruste wirken viele Umstände auf die Größe der geothermischen Tiefenstufe ein, so die Wärmeleitfähigkeit der Gesteine, das Oberflächenrelief, die geologische Struktur usw.

Der Geologe M. F. Beljakow sammelte Daten über das Abhängigkeitsverhältnis, das zwischen der Temperatur der Sedimentgesteine der Russischen Tafel und der Entfernung von ihrem kristallinen Fundament besteht. Er stellte fest, daß die Flächen von gleicher Temperatur, von einer gewissen Tiefe angefangen, den Hebungen und Senkungen des kristallinen Fundaments der Russischen Tafel folgen.

Wie sich die Erdtemperatur in Tiefen von 10 bis 20 km und mehr verändert, ist unbekannt.

Da die Vulkane die Lava mit einer Temperatur von etwa 1000°C und mehr ausstoßen, haben die Gesteine in den vulkanischen Herden zweifellos mindestens eine Temperatur von 1000 bis 1300°C . Andererseits kann die Erde im Inneren nicht 8000°C Wärme erreichen, da bei dieser Temperatur das Eisen unter jedem möglichen Druck verdampfen würde.

Nach Meinung der Geophysiker erreicht das Erdinnere aller Wahrscheinlichkeit nach in einer Tiefe von 20 km schon eine Temperatur von 600°C , in 100 km Tiefe bis 1400°C und in einer Tiefe von 1000 km und mehr bis 2000°C .

Die Gesteine der Erdkruste befinden sich in einem kristallinen Zustand; von einer gewissen Tiefe an geht die Erdschubstanz jedoch unter der Einwirkung des Druckes und der erhöhten Temperatur aus dem kristallinen in den amorphen Zustand über.

Trotz dieser hohen Temperatur im Erdinneren schmelzen die Gesteine nicht, da der ungeheure Druck eine Vergrößerung ihres Volumens verhindert.

Der Ursprung der Wärme im Erdinneren wurde im vorigen Jahrhundert dadurch erklärt, daß diese im ursprünglichen, schmelzflüssigen Zustand erhalten geblieben sei. Die meisten Gelehrten vermuteten im 19. Jahrhundert, daß sich das Sonnensystem aus einem heißen Nebelfleck gebildet habe, der sich bis zur Bahn des von der Sonne entferntesten Planeten erstreckte. Diese Hypothese wurde von dem französischen Mathematiker Laplace (1749–1827) entwickelt.

Laplace vermutete, daß der Nebelfleck, der das Sonnensystem bildete, wie ein fester Körper rotierte, d. h., daß sich alle Teilchen mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit bewegt hätten. Der Nebelfleck habe in den Raum Energie ausgestrahlt und sich dabei zusammengezogen. Nach einem Grundsatz der Mechanik erhöht ein rotierender Körper, dessen Umfang abnimmt, seine Rotationsgeschwindigkeit. Mit der Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit hätte sich der Nebelfleck längs der Achse zusammenziehen und in der auf ihr senkrecht stehenden Fläche ausdehnen müssen.

Entsprechend der Steigerung der Rotationsgeschwindigkeit und der Ver-

größerung des äquatorialen Durchmessers des Nebelflecks wuchs auch nach Laplaces Theorie die Zentrifugalkraft, die auf ihre Teilchen einwirkte. In einem bestimmten Augenblick erreichte sie am Äquator eine größere Stärke als die zum Mittelpunkt der Masse des Nebelfleckes wirkende Schwerkraft. Dann mußte sich nach Laplaces Meinung an seinem Äquator ein Ring abtrennen, der zerriß und sich zu einer kugelförmigen Masse, einem Planeten, zusammenzog.

Später lehnte die Wissenschaft die Hypothese von Laplace jedoch ab. Wie die auf den Gesetzen der Mechanik beruhenden Berechnungen zeigen, müßte, wenn die Planeten sich durch Absonderung von diesem Nebelfleck gebildet hätten, der übriggebliebene Teil des Nebelflecks, nachdem er auf den Umfang der Sonne zusammengeschrumpft war, sich in wenigen Stunden und nicht in 25 Tagen um seine Achse drehen, da fast der ganze Drehimpuls des Sonnensystems der Sonne zukommen müßte. Tatsächlich hat die Sonne einen sehr unbedeutenden Anteil am Drehimpuls des ganzen Sonnensystems, obwohl ihre Masse mehr als das 700fache der Gesamtmasse aller Planeten beträgt.

Wenn die Sonne viel schneller rotierte oder die Planeten wesentlich weniger von ihr entfernt wären, könnte die Hypothese von Laplace die Verteilung des Bewegungsquantums im Sonnensystem erklären.

Endlich wurden gegen die Hypothese von Laplace auch vom physikalischen Standpunkt aus Einwände vorgebracht. Wenn man die Substanz aller Planeten und der Sonne aufs neue im ganzen Raum des Sonnensystems zerstreuen würde, wäre sie um Hunderte von Millionen mal dünner als die Luft der Erdatmosphäre. Ein solcher Nebelfleck könnte nicht wie ein fester Körper rotieren, sondern die von ihm abgetrennten Teilchen würden sich im Raum verstreuen und könnten keine Ringe bilden.

Nach Ablehnung der Hypothese von Laplace standen die Gelehrten vor der Aufgabe, die Erwärmung des Erdinneren anders zu erklären.

Die Wärmequelle der Erde ist, wie die Geophysiker nachweisen, der Zerfall radioaktiver Stoffe, die in der Erdkruste enthalten sind.

Wie Untersuchungen gezeigt haben, enthalten die Gesteine stets eine relativ kleine Menge radioaktiver Substanzen – Uran und Thorium –, die ausreicht, um den thermischen Zustand der Erde zu erklären. Außerdem ist

auch das Kalium, das in großer Menge in den Gesteinen enthalten ist, schwach radioaktiv, so daß die von ihm abgegebene radioaktive Wärme ebenfalls zu berücksichtigen ist.

Nach den Berechnungen des Akademiemitgliedes W. G. Chlopin, die auf dem Gehalt der Meteorite und der Tiefengesteine der Erde an radioaktiven Elementen beruhen, werden von der Erde insgesamt $43,3 \times 10^{16}$ Kalorien je Stunde erzeugt, eine Menge, die weit größer ist als die von der Erde in den Weltenraum ausgestrahlte Wärme. Daher hätte die Erde bei der Wärmeleitfähigkeit, die die Gesteine der Erdkruste besitzen, im Laufe ihrer geologischen Entwicklung schmelzen müssen, zumal in ferner Vergangenheit das abgesonderte Wärmequantum bedeutend größer war. Nach Chlopins Schätzung wurden vor 2 Milliarden Jahren durch radioaktiven Zerfall in der Erde $81,6 \times 10^{16}$ Kalorien je Stunde erzeugt und vor 3 Milliarden Jahren $223,2 \times 10^{16}$, da sich beim Zerfall radioaktiver Substanzen ihre Masse in geometrischer Progression verringert.

Da keine offensichtliche Erwärmung der Erde zu beobachten ist, folgern die Geophysiker, daß die radioaktiven Substanzen unregelmäßig verteilt sind und zwar zum Erdinneren hin an Menge rasch abnehmen.

Außerdem wird nach Meinung Chlopins und anderer Gelehrter ein bedeutender Teil der Energie, die beim Zerfall der radioaktiven Substanzen frei wird, für innere Prozesse, chemische Reaktionen und Massenverschiebungen innerhalb der Erde verbraucht.

Die hohe Temperatur im Erdinneren erklärt sich also ausschließlich durch die Wärmeabsonderung beim radioaktiven Zerfall des Urans, Thoriums und Kaliums, die in den Gesteinen der Erde enthalten sind.

Die radioaktiven Substanzen sind hauptsächlich in der Erdkruste enthalten, wohin sie durch saure Gesteine gefördert wurden, die aus der Tiefe emporgedrungen sind.

Der radioaktive Zerfall könnte den Ursprung der sogenannten magmatischen, aus Mineralschmelzfluß gebildeten Gesteine erklären, aus denen die Erdkruste besteht.

Dieser Zerfall geht unabhängig von Temperatur und Druckveränderungen mit stets gleichbleibender Geschwindigkeit vor sich. Darauf beruht die geologische Zeitmessung. Zwar kann diese „Uhr“ nicht ewig gehen, da sich die

radioaktiven Substanzen allmählich vollkommen in Blei und Helium verwandeln, jedoch verringert sich erst in 4500 Millionen Jahren die Menge des Urans um die Hälfte.

Wenn ein Gestein ein uranhaltiges Mineral aufweist, kann man erkennen, wieviel Zeit seit seiner Bildung vergangen ist. Zu diesem Zweck wird untersucht, wieviel Uran und Blei solches Mineral enthält. 100 Gramm Uran bilden im Laufe von 76 Millionen Jahren ein Gramm Blei. Das heißt, daß man durch Feststellung des im Mineral enthaltenen Urans und des aus ihm gebildeten Bleis das Alter des betreffenden Gesteins bestimmen kann.

Auf diese Weise wurde festgestellt, daß sich einige Gesteine in Karelien vor 1600 bis 1800 Millionen Jahren gebildet haben. Diese Gesteine gehören zu den ältesten, die der Forschung zugänglich sind. Unter ihnen liegt jedoch weit älterer Granit.

Es wurde die Vermutung geäußert, daß alles Blei in der Erdkruste durch den Zerfall der Uran- und Thoriumatome entstanden ist. Das ist natürlich unexakt, denn das Blei ist gleich allen übrigen Elementen durch noch unerforschte Prozesse entstanden. In diesem Fall hätte sich die Erdkruste vor ungefähr 3500 Millionen Jahren gebildet.

Auf Grund verschiedener Erwägungen wird das Alter der Erde als kosmischer Körper auf einige Milliarden Jahre veranschlagt. In dieser Zeit konnte sich durchaus trotz der großen Zähigkeit der Erde der Prozeß ihrer Entwicklung als elastisch-zäher Körper vollziehen.

DIE DICHTEN UND DER DRUCK IM ERDINNEREN

Die durchschnittliche Dichte der Erde beträgt $5,52 \text{ g/cm}^3$, doch ist sie nicht in der ganzen Erdmasse gleich groß.

Die Erdkruste besteht aus Gesteinen, deren Durchschnittsdichte nicht über $2,75 \text{ g/cm}^3$ liegt. Daher muß die Dichte in den Tiefen der Erde über der Durchschnittsdichte liegen. Von der Dichteverteilung in der Erde hängen auch die Druckveränderungen in zunehmender Tiefe ab.

Wenn man den Druck innerhalb der Erde berechnet, setzt man voraus, daß sie ein elastisch-zäher Körper ist, in dem der Druck hydrostatisch, d. h. wie in einer Flüssigkeit nach allen Seiten mit gleicher Stärke übertragen wird. Daher wird der Druck auf eine Flächeneinheit im Erdinneren durch das Gewicht der darüberliegenden, bis zur Erdoberfläche reichenden Säule bestimmt.

Wenn man annimmt, daß sich die Dichte der Erdschubstanz mit zunehmender Tiefe nicht verändert, muß sich das Gewicht einer Volumeneinheit mit zunehmender Annäherung an den Erdmittelpunkt proportional zur Veränderung des Abstands von ihm verringern; das widerspricht dem Gesetz der allgemeinen Gravitation nicht, sondern ergibt sich direkt aus ihm.

Tatsächlich ist ein Körper in der Mitte des Erdradius dem Erdmittelpunkt doppelt so nahe wie auf der Oberfläche, daher müßte sich sein Gewicht vervierfachen. Aber die Masse, die auf ihn einwirkt, beträgt nur ein Achtel der Masse, die auf den Körper einwirkt, der sich auf der Erdoberfläche befindet. Daher verringert sich das Gewicht des Körpers um die Hälfte. Wenn man diese Betrachtung verallgemeinert, ergibt sich tatsächlich, daß sich das Gewicht des Körpers proportional zur Entfernung vom Erdmittelpunkt verändert.

Wenn die Erddichte in allen Tiefen dieselbe wäre, könnte man errechnen, daß der Druck in der Mitte des Erdradius $1,117$ Millionen kg/cm^2 , im Erdmittelpunkt aber $1,75$ Millionen kg/cm^2 beträgt. Zweifelloos vergrößert sich die Dichte der Erde aber mit zunehmender Tiefe sowohl infolge des An-

wachsens des Druckes als auch wahrscheinlich wegen der Veränderung der Struktur der Erde. Daher beläuft sich der Druck im Erdmittelpunkt wahrscheinlich auf etwa 3 Millionen kg/cm².

Clairaut setzte bei der Entwicklung seiner Gesetze über die Schwereveränderung auf der Erdoberfläche und über die Abplattung der Erde voraus, daß die Erdkugel aus konzentrischen, in sich gleichen Schichten besteht.

Bei der Untersuchung des Durchgangs der seismischen Wellen durch die Erdtiefen kann man ihre Ausbreitungsgeschwindigkeiten messen. Wenn die Erddichte in verschiedenen Tiefen bekannt wäre, wäre es auch leicht, die Festigkeits- und Kompressionsmodule in verschiedenen Tiefen zu berechnen.

Die Verteilung der Dichte innerhalb der Erde ist jedoch noch unbekannt. Daher kann man über sie nur mehr oder minder wahrscheinliche Vermutungen anstellen, die allerdings drei Voraussetzungen erfüllen müssen.

Erstens muß die Durchschnittsdichte der Erde dem Erfahrungswert von 5,52 g/cm³ entsprechen.

Zweitens muß das aus der Massenverteilung zu errechnende Trägheitsmoment ihrem tatsächlichen Trägheitsmoment gleich sein.

Drittens muß die Durchschnittsdichte der Erdkruste mit der durch Beobachtungen bekannten Durchschnittsdichte der zusammenhängenden Basaltdecke der Erde übereinstimmen, d. h. ungefähr 3,0 g/cm³ betragen.

Die erste Hypothese über die Veränderung der Dichte mit zunehmender Tiefe wurde von Legendre aufgestellt. Nach dieser Hypothese wächst unter dem ständig steigenden Druck die Dichte im Erdinneren ununterbrochen mit zunehmender Annäherung an den Mittelpunkt.

Nach Laplace, der diese Hypothese übernahm, widerstrebt die Materie einer weiteren Verdichtung um so mehr, je dichter sie selbst bereits ist. Auf Grund dieser Voraussetzung wurden verschiedene Formeln entwickelt, mit denen die Dichte zu dem Abstand vom Erdmittelpunkt in Beziehung gesetzt wird, z. B. die Formel von Rosch:

$$d = d_c \left[1 - a \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right],$$

wobei d die gesuchte Dichte ist, d_c die Dichte im Erdmittelpunkt, r der

Abstand der Fläche, auf die der Druck ausgeübt wird, vom Erdmittelpunkt, R der Erdradius und a der Koeffizient 0,764.

Wenn man diese Formel anwendet, kann man den Druck im Erdmittelpunkt mit 2,9 Millionen kg/cm^2 berechnen, vorausgesetzt, daß $d_c = 11$ ist. Lodotschnikow, Ramsay u. a. erklären die Dichtezunahme der Materie mit zunehmender Tiefe allein durch das Anwachsen des Druckes. Die meisten Geophysiker sind jedoch überzeugt, daß innerhalb der Erde eine Differenzierung der Materie nach ihrer Dichte vor sich gegangen ist, was auch durch geologische Beobachtungen bestätigt wird. Dabei vermehrt sich mit zunehmender Tiefe der Anteil der schweren Elemente.

Die Maße des Erdkerns stehen offensichtlich in engem Zusammenhang mit der Menge dieser schweren Substanz im Erdinneren oder mit jenem Grenzwert des Druckes, bei dem sich der Zustand der Substanz und ihre Dichte ändern. Da die Durchschnittsdichte der Erdkugel gleich $5,52 \text{ g/cm}^3$ ist und die der Gesteine, aus denen sich die Erdkruste zusammensetzt, insgesamt nur $2,8 \text{ g/cm}^3$ beträgt, muß das Erdinnere eine überdurchschnittliche Dichte haben. Genauere Berechnungen ergeben, daß die Dichte der Gesteine an der Grenze des Erdkernes in einer Tiefe von 2900 km ungefähr 5 g/cm^3 beträgt und etwas tiefer sprunghaft auf 10 bis 11 g/cm^3 steigt. Dieser Umstand zeugt auch von der plötzlichen Veränderung der Struktur und möglicherweise auch des Aggregatzustands der Gesteine beim Übergang von der Zwischenschicht zum Erdkern.

Die kosmische Verbreitung des Eisens und des Nickels, die in vielen Meteoriten enthalten sind, berechtigt zu der Annahme, daß der Erdkern eben aus Eisen und Nickel besteht.

Der deutsche Geophysiker Wiechert nahm auf Grund von Untersuchungen über den Ursprung der seismischen Wellen an, daß die Erde einen sehr dichten Kern besitzt, der von einer Steinhülle mit einer Dichte von 3,0 bis $3,4 \text{ g/cm}^3$ umgeben ist.

Dabei wurde die Dichte des Kerns unter Zugrundelegung der Durchschnittsdichte der Erde auf $8,2 \text{ g/cm}^3$ festgelegt, was nahezu der Dichte des Eisens entspricht, wenn sie infolge des ungeheuren Druckes ein wenig zugenommen hat. So entstand die Vorstellung, daß die Erde einen eisernen Kern habe.

Später stellten die Geophysiker mit seismologischen Methoden fest, daß

in verschiedenen Tiefen Grenzflächen und folglich in entsprechender Anzahl auch Kugelschalen von verschiedener Dichte vorhanden sind.

Der deutsche Geophysiker Klußmann nahm an, daß die Erde aus zwei Schalen und einem zentralen Kern besteht. Die Dichte der ersten Schale, die sich bis zu einer Tiefe von 1200 km erstreckt, setzte er mit $3,4 \text{ g/cm}^3$ an, die der zweiten bis zu einer Tiefe von 2450 km mit $5,5 \text{ g/cm}^3$ und die Dichte des Eisenkerns der Erde mit $7,8\text{--}8,9 \text{ g/cm}^3$.

Ein anderer deutscher Geophysiker, Gutenberg, dem sehr viel seismologisches Material zur Verfügung stand, rechnete mit einer größeren Zahl von Schalen verschiedener Dichte. Er nahm an, daß die Dichte von etwa 60 km Tiefe an gleichmäßig zunimmt und in einer Tiefe von 1200 km Werte zwischen $3,5$ und $4,75 \text{ g/cm}^3$ erreicht. Weiter bleibt dann die Dichte fast konstant und erreicht in einer Tiefe von 2900 km nur einen Wert von $5,0 \text{ g/cm}^3$, steigt aber in noch größerer Tiefe jäh auf 11 g/cm^3 an und behält diesen Wert bis zum Erdmittelpunkt.

Durch Kombination der geophysischen und geologischen Beobachtungen mit den geochemischen Auffassungen gelangten die Gelehrten zu den modernen Anschauungen über die Struktur der Erde.

Die einfache Beobachtung lehrt, daß die Erdkruste an der Oberfläche größtenteils aus sauren, d. h. an Kieselsäure sehr reichen Graniten besteht. Dieselben Gesteine bilden wahrscheinlich auch den Meeresboden im Atlantischen und in einem Teil des Stillen Ozeans.

Diese unterbrochene Granithülle ist offenbar nur ungefähr 15 km stark, da in dieser Tiefe eine Zunahme der Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Schwingungen von 5,5 auf 6,3 km je Sekunde beobachtet wird.

Einige geologische Beobachtungen berechtigen zu der Annahme, daß unter den Graniten eine kompakte Hülle aus Basalten liegt, die eisenreicher als die Granite sind. Die Mächtigkeit dieser Hülle ist nach den seismologischen Beobachtungen auf 15 bis 18 km zu veranschlagen.

In einer Tiefe von 30 bis 33 km, in der sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der seismischen Wellen erneut jäh von 6,3 auf 7,9 km je Sekunde vergrößert, liegt offensichtlich die Grenzfläche der folgenden Schicht.

Nach der Meinung von Fersman und anderen Geochemikern und Geologen besteht die Erde unter der Basalthülle bis zu einer Tiefe von 1200 km aus

ultrabasischen eisen- und magnesiumreichen Olivingesteinen. Olivin ist ein olivgrünes oder braunes Mineral, das eine kiesel-saure Verbindung von Eisen und Magnesium darstellt. Auf Grund der neuesten Untersuchungen von J. F. Sawarenski kann man annehmen, daß sich die Olivinhülle nur bis zu einer Tiefe von 900 bis 1000 km erstreckt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Längsschwingungen wächst hier bei zunehmender Tiefe bis 11,5 km je Sekunde.

Vorläufig fehlen Anhaltspunkte, um ein endgültiges Urteil über die Struktur der Erde unterhalb der Olivinhülle abzugeben. Im allgemeinen geht man von der Verbreitung des Eisens in der Natur aus sowie davon, daß es unbewiesen ist, ob die zwei- bis dreifache Verdichtung der Erds-substanz allein durch den Druck innerhalb der Erdkugel erklärt werden kann. Daher wird meist vermutet, daß die Erde unterhalb der Olivinhülle gleich den Meteoriten aus Olivin und Eisen besteht. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Längsschwingungen erreicht hier 13,6 km in der Sekunde.

Schließlich liegt innerhalb dieser Hülle wohl ein Eisenkern mit einer Beimischung von Nickel, Kohlenstoff und einigen anderen Elementen, aus denen die Eisenmeteoriten bestehen. An seiner Grenze sinkt, wie wir sahen, die Geschwindigkeit der seismischen Längswellen plötzlich auf 8 km in der Sekunde, steigt aber wieder mit zunehmender Tiefe an.

Eine derartige Verteilung der Substanzdichte innerhalb der Erde erklärt die hohe Durchschnittsdichte der Erdkugel, deren äußere Hülle, die Erdkruste, aus relativ leichten Gesteinen besteht.

Die Erde, deren Oberfläche uns wie eine grenzenlose Ebene erscheint, ist in Wirklichkeit ein kugelförmiger Körper. Sie rotiert und bewegt sich gleichzeitig im Raum um die Sonne; sie trägt auf ihrer Oberfläche Meere und Ozeane, Wälder und Berge, Städte und Dörfer. Die Erde ist nur einer der Planeten der Sonne, die von ihr in ihrer Bewegung um den Mittelpunkt unseres Sternensystems, der Galaxis, mitgerissen werden.

Die Menschheit brauchte mehr als 4000 Jahre, um zu richtigen Vorstellungen von der Erde als Himmelskörper zu gelangen. Dies wurde erst durch die Überwindung der erstarrten Scholastik des Mittelalters möglich, die der Erforschung der Natur keine Bedeutung zugemessen hatte. Die

Herausbildung richtiger Vorstellungen von der Erde war der erste Schritt zur Erkenntnis der Tiefen des Weltalls. Die die Welt angeblich begrenzenden kristallinen Sphären wurden „zertrümmert“. Vor dem geistigen Blick der Menschen eröffnete sich die grenzenlose Weite des Weltraums mit Myriaden von Sternen und Sternsystemen.

Durch die weiteren Untersuchungen der Erde wurde bewiesen, daß sie sich in einer ständigen Wechselbeziehung zu anderen Himmelskörpern, in erster Linie zur Sonne und zum Mond befindet. Infolge deren Anziehungskraft treten auf der Erdoberfläche nicht nur die Gezeiten ein, sondern auch die feste Erde selbst wechselt ununterbrochen ihre Form; die Lage ihrer Rotationsachse im Erdkörper ändert sich ebenso wie ihre Richtung im Raum. Das Verhalten der Erde unter dem Einfluß äußerer Kräfte zeigte, daß sie ein fester Körper ist und keine im Inneren schmelzflüssige Kugel, wie die Gelehrten im vorigen Jahrhundert vermutet hatten.

Die Schwingungen, die von den Erdbeben ausgelöst werden, lehrten uns ihre elastischen Eigenschaften in verschiedenen Tiefen erkennen. Durch die Erforschung ihrer Ausbreitung gewannen wir eine genauere Vorstellung von der inneren Erdstruktur. Es erwies sich, daß innerhalb ihres harten Körpers ein Kern eingeschlossen ist, der nahezu die Eigenschaften einer Flüssigkeit besitzt.

Die Geophysik, die die physikalischen Eigenschaften der Erde erforscht, ist einer der wichtigsten Zweige der modernen Naturwissenschaft. Ihre Schlüsse auf die Struktur der Erde sind von entscheidender Bedeutung, um den Ursprung unseres Planeten und des ganzen Sonnensystems zu erklären. Die schichtweise Verteilung des Materials in der Erde, von der die seismologischen Untersuchungen zeugen, ist zusammen mit den Angaben über die chemische Zusammensetzung der Schichten der Schlüssel zur Klärung des Entwicklungsprozesses der Erde.

ERKLÄRUNG DER FACHAUSDRÜCKE

Äther (hier im klassischen Sinne): Luftraum, Himmelsluft

Aggregatzustände: Erscheinungsformen der Materie — fest, flüssig, gasförmig

Akustik: Zweig der Physik, der sich mit den Schallerscheinungen befaßt

amorph: gestaltlos, regellos, nicht kristallin angeordnet

Amplitude: Schwingungsweite (von Wellen)

anthropozentrisch: den Menschen in den Mittelpunkt stellend

Antipoden: Gegenfüßler, auf dem entgegengesetzten Punkt der Erde lebende Menschen

Astrolabium: Gerät zur Messung von Sternhöhen und zur mechanischen Lösung von Aufgaben der sphärischen Trigonometrie

Atmosphäre: Lufthülle der Erde

Axiom: grundlegender Leitsatz, der keines Beweises bedarf

Beharrungsvermögen = *Trägheit*: Eigenschaft eines Körpers, in Ruhe oder in gerader, gleichförmiger Bewegung zu bleiben, solange keine Kraftänderung einwirkt

Beschleunigung: Änderung der Geschwindigkeit nach Betrag oder Richtung, die ein Körper in der Zeiteinheit erfährt. Die negative Beschleunigung (Geschwindigkeitsabnahme) wird auch als Verzögerung bezeichnet

Dynamik: Teilgebiet der Mechanik, das sich mit der Bewegung von Körpern unter dem Einfluß von Kräften befaßt

Ekliptik: Ebene der Erdbahn

Epizentrum: senkrecht über dem Erdbebenherd liegender Punkt der Erdoberfläche

Epizyklen: gekrümmte Planetenbahnen im Weltbild des Ptolemäus

exzentrisch: vom Mittelpunkt abweichend

Frequenz: Häufigkeit, Schwingungszahl

Frühlingspunkt (Widderpunkt): Schnittpunkt des Himmelsäquators mit der Ekliptik bei aufsteigender Sonnenbahn

Galvanometer: Instrument zur Messung der Stromstärke auf Grund ihrer magnetischen Wirkung

Geodäsie: Vermessungskunde

geozentrisch: die Erde in den Mittelpunkt stellend, auf die Erde bezogen

Geschwindigkeit: in der Zeiteinheit zurückgelegter Weg

Gravitation: Massenanziehung, Schwerkraft

Häresie: Ketzerei

heliozentrisch: die Sonne in den Mittelpunkt stellend

Himmelsmechanik: Lehre von den Bewegungen der Himmelskörper; Teilgebiet der Astronomie

Hodograph: Apparat zur Aufzeichnung einer beliebigen, krummlinigen Bewegung und zum Ablesen der Geschwindigkeit und der Beschleunigung der Bewegung

Hydrosphäre: Wasserhülle der Erde, Gesamtheit der Ozeane

Hydrostatik: Lehre vom Gleichgewicht von Flüssigkeiten

hydrostatisch: auf dem Druck einer ruhenden Flüssigkeit beruhend

Hypotenuse: dem rechten Winkel eines rechtwinkligen Dreiecks gegenüberliegende Seite

Inquisition: Glaubensgericht der katholischen Kirche im Mittelalter

Isochronismus: Zustand, in dem das Pendel in gleicher Zeit gleich viele Schwingungen ausführt

Isostasie: Massengleichgewicht innerhalb der Erdkruste

Kanoniker: Mitglied eines Domkapitels

Kathete: dem rechten Winkel eines rechtwinkligen Dreiecks anliegende Seite

Kohäsion: Kraft, die gleichartige Moleküle zusammenhält

kompressibel: zusammenpreßbar

Kompression: Zusammendrückung, Verdichtung

Konjunktion: Stellung zweier Himmelskörper in — von der Erde aus gesehen — gleicher Richtung. Bei den inneren Planeten Venus und Mars unterscheidet man die untere Konjunktion (Stellung Erde-Planet-Sonne) und die obere Konjunktion (Erde-Sonne-Planet)

Kosmogonie: Lehre von der Entstehung und Entwicklung des Weltalls

Kosmologie: Lehre von der Welt, ihrer Entstehung und ihrem Aufbau

Kubus (Mz. *Kuben*): Würfel, auch dritte Potenz

Lithosphäre: Gesteinshülle der Erde

Magma: Gesteinsschmelze des Erdinneren

mathematisches Pendel: besteht aus einem „Massepunkt“, der an einem gewichtslosen, nicht dehnbaren Faden frei beweglich ist

Mechanik: Lehre vom Gleichgewicht und von der Bewegung der Körper

Meridian: Großkreis auf der Erdoberfläche, der durch beide Pole läuft. Auch Projektion dieses Großkreises auf den Himmel

Molekül: kleinster Teil einer chemischen Verbindung; Atomverband eines gasförmigen Elementes

mystisch: geheimnisvoll, dunkel

mythisch: sagenhaft, erdichtet

Nestorianer: Anhänger des Patriarchen Nestorius († um 450) von Konstantinopel, der in der christlichen Lehre vom damals herrschenden Dogma abwich

nomadisch: umherziehend, als Wanderhirten lebend

Normale: Gerade, die auf der durch einen Punkt einer Kurve oder Fläche gezogenen Tangente senkrecht steht

Opposition: Stellung eines Gestirns zur Erde, in der es der Sonne gegenüber steht; „Gegenschein“

Optik: Lehre vom Licht

Parallaxe: Winkel zwischen zwei Sehstrahlen, die von zwei verschiedenen Standorten zu dem gleichen Punkt zielen

Parallelepipedon (= Spat): von drei Paaren paralleler Ebenen begrenzter Körper

Planet: Wandelstern

Präzession: Fortschreiten des Frühlingspunktes auf der Ekliptik

Quadratur: Stellung eines Planeten, bei der er im rechten Winkel zur Richtung Erde-Sonne steht

Schwerebeschleunigung: die durch die Schwerkraft den Körpern verliehene Beschleunigung

seismisch: zum Erdbeben gehörig

Seismogramm: Erdbebenaufzeichnung

Seismologie: Erdbebenkunde

Seismometrie: Erdbebenmessung

Sphäre: Kugel, Kugelschale

Teleskop: Fernrohr

Tierkreiszeichen: zwölf Sternbilder, die auf der Ekliptik liegen und von der Sonne auf ihrer Jahresbahn scheinbar durchlaufen werden

Trägheit: Widerstand einer Masse gegen eine Änderung ihres (Bewegungs-) Zustandes

Trägheitsmoment: Widerstand rotierender Körper gegen eine Änderung der Rotationsgeschwindigkeit

Volumen: Rauminhalt

Winkelgeschwindigkeit: bei der Kreisbewegung nicht auf den Weg, sondern auf den Winkel bezogene Geschwindigkeit. Jeder Punkt auf der Erdoberfläche bewegt sich durch die Erdrotation mit einer Winkelgeschwindigkeit von $360^\circ/\text{Tag}$

Zentrifugalkraft (Fliehkraft): Kraft, mit der sich ein kreisförmig bewegter Körper vom Drehzentrum zu entfernen sucht. Ihr ist die nach dem Drehzentrum gerichtete *Zentripetalkraft* entgegengesetzt