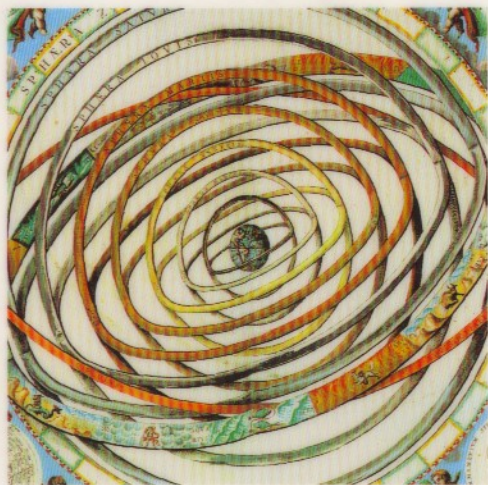


Alexandre Koyré Leonardo, Galilei, Pascal

Die Anfänge der
neuzeitlichen
Naturwissenschaft



Fischer



Alexandre Koyré ist einer der Gründungsväter der modernen Wissenschaftsgeschichte. Seine Studien zur Herausbildung der mathematischen und experimentell verfahrenen Naturwissenschaft in der frühen Neuzeit gehören zum Kanon der klassischen Texte auf diesem Gebiet. Das gilt insbesondere für seine epochemachenden Studien zu Galilei, welche den Schwerpunkt dieses Bandes bilden. Unter ihnen findet sich auch jener Text, in dem Koyré sich um den Nachweis bemüht, daß Galilei die berühmten Experimente mit der schiefen Ebene in der von ihm beschriebenen Weise wohl nie ausgeführt hat: Galilei wußte eben, aufgrund seiner neuen mathematischen Konzeptualisierung der Phänomene, wie sie auszusehen hatten. So wie Pascal, dessen Experimente Koyré sich ebenfalls vornimmt, konnte er den experimentellen Nachweis hinzuerfinden, weil er sich theoretisch seiner Sache sicher sein durfte - und genau darin ortet Koyré den wesentlichen Schritt zur neuen Physik.

Alexandre Koyré wurde 1892 in Rußland geboren und starb 1964 in Frankreich. Er war Professor an der Ecole Pratique des Hautes Etudes (Sorbonne) und Mitglied des Institute for Advanced Study in Princeton. Wichtige Veröffentlichungen u.a.: >La Philosophie de Jacob Boehme<, >Etudes sur les origines de la metaphysique allemande<, >Etudes galileennes<, >Introduction a la lecture de Platon< >From the Closed Worlds to the Infinite Universe< (dt. >Von der geschlossenen Welt zum unendlichen Universum<), >Etudes d'histoire de la pensee scientifique<, >Newtonian Studies<.

Alexandre Koyré

Leonardo, Galilei, Pascal

**Die Anfänge
der neuzeitlichen Naturwissenschaft**

Mit einem Vorwort von
Rolf Dragstra



Fischer
Taschenbuch
Verlag

"Die Entwicklungsstufen der wissenschaftlichen Kosmologie«,
»Leonardo nach 500 Jahren«, »Ein Meßversuch« und "Pascal als
Wissenschaftler« wurden von Rolf Dragstra,
»Der Beitrag der Renaissance zur wissenschaftlichen Entwicklung-,
»Galilei und die wissenschaftliche Revolution des 17. Jahrhunderts«
»Galilei und Platon«, "Das Experiment von Pisa«, »Kunst und
Wissenschaft im Denken Galileis« von Horst Günther übersetzt.

Veröffentlicht im Fischer Taschenbuch Verlag GmbH,
Frankfurt am Main, März 1998

Lizenzausgabe mit freundlicher Genehmigung
des Klaus Wagenbach Verlags, Berlin

Die Rechte der Originaltexte liegen bei

© 1994 by Hélène Koyré

© 1968 by Chapman & Hall, London

© 1966 by Presses Universitaires de France, Paris

© 1973 by Editions Gallimard, Paris

Für die deutsche Übersetzung:

© 1988/1994 by Klaus Wagenbach Verlag, Berlin

Gesamtherstellung: Clausen & Bosse, Leck

Printed in Germany 1998

ISBN 3-596-13776-4



Alexandre Koyré
(Während eines Vortrags in Berlin, Zeichnung

Inhalt

Vorwort

Rolf Dragstra

9

Die Entwicklungsstufen der wissenschaftlichen Kosmologie

16

Leonardo da Vinci nach 500 Jahren

31

Der Beitrag der Renaissance zur wissenschaftlichen Entwicklung

57

Galilei und die wissenschaftliche Revolution des 17. Jahrhunderts

70

Galilei und Platon

88

Das Experiment von Pisa

Fall-Studie einer Legende

123

Kunst und Wissenschaft im Denken Galileis

Eine Antwort auf Panofsky

135

Ein Meßversuch

151

Pascal als Wissenschaftler

195

Quellen

228

Bibliographie

230

Vorwort

Rolf Dragstra

Die Historiographie und Analyse der Geschichte der Mathematik und der Naturwissenschaften ist keineswegs eine Disziplin jüngerer oder gar jüngsten Datums; ihren Anfang nahm sie im 18. Jahrhundert: Als einer der Initiatoren ist Joseph Priestley zu nennen, der englische Philosoph, Theologe und Naturforscher, der 1771 als Anhänger der Phlogistontheorie den Sauerstoff entdeckte. Zu Beginn unseres Jahrhunderts waren es vor allem die umfangreichen Arbeiten Pierre Duhems und Paul Tannerys, auch Aldo Mielis, Lynn Thorndykes, George Sarton und vieler anderer, die die Kenntnisse von den Anfängen der neuzeitlichen Wissenschaft beträchtlich vermehrten. Vor etwa fünfzig Jahren jedoch trat in der Methodologie der Untersuchungen eine einschneidende Änderung ein: Die wissenschaftliche Entwicklung wurde nicht mehr vornehmlich vom jeweils gegenwärtigen Standpunkt des Betrachters aus beurteilt, sondern man versuchte, die wissenschaftlichen Ideen im Kontext ihrer eigenen Geschichte und der realen historischen Umgebung zu analysieren, in welcher sie erarbeitet worden waren. Man ging also von der Wissenschaftsgeschichte zur Geschichte des wissenschaftlichen Denkens selbst über. Das erforderte aber einen Rekurs auf die großen, gleichermaßen philosophischen wie wissenschaftlichen Texte selbst, in denen die begriffliche Arbeit in *statu nascendi* erkennbar war. Solche Vergegenwärtigung setzte wiederum eine genaue Kenntnis und Interpretation der Sprache und Begrifflichkeit voraus, in welcher Kopernikus, Kepler, Galilei, Descartes und Newton, um nur einige zu nennen, ihre Entdeckungen darstellten.

Diese Methode der konzeptuellen Analyse wurde von Alexandre

Koyré nicht nur mitbegründet - sie fand ihre erste schlagende Anwendung in jenem denkwürdigen Aufsatz über die »Pisaner Experimente« Galileis (1937) -, sondern sie wurde von Koyré auch nachdrücklich ausgeformt, mit dem Ziel, nicht nur die Forschung, sondern auch die didaktische Vermittlung ihrer Resultate voranzutreiben. Daraus erklärt sich der enorme Einfluß, den dieser große Lehrer und Vortragende nicht nur auf seine Zeitgenossen ausübte. In der Entwicklung der neueren, vor allem auch der amerikanischen Wissenschaftsgeschichte ist der Einfluß Koyrés gar nicht hoch genug einzuschätzen; auch seine Kritiker - T. S. Kuhn etwa - sind davon nicht auszunehmen.

Alexandre Koyré wird am 29. August 1892 im zaristischen Rußland, in Taganrog am Asowschen Meer geboren. Sein Vater ist ein erfolgreicher Kaufmann und Importeur, der in den Ölfeldern Bakus investiert. In Rostow am Don, später im kaukasischen Tiflis erhält er seine schulische Ausbildung, die humanistisch geprägt ist: Das Altgriechische, klassische sowie mittelalterliches Latein sind ihm schon aus dieser Zeit vertraut. Noch sechzehnjährig hat er im Jahre 1908 Gelegenheit, in Göttingen ein Studium der Mathematik und Philosophie zu beginnen. Zwei der einflußreichsten wissenschaftlichen Denker jener Zeit werden seine Lehrer: David Hilbert, der in seiner mathematischen Grundlagenforschung die folgenschwere Theorie des *Formalismus* begründet, welche - durchaus an ein Hauptpostulat Galileis anknüpfend - die gesamte Axiomatik der euklidischen Geometrie dem *Gesetz der Zahl* zu unterwerfen sucht. Hilbert war es auch, dessen Theorie des *Funktionenraums* auf einer Definition und Analyse des *abzählbar Unendlichen* beruhte und 1915 ihre analytisch-geometrische Anwendung als Tensorrechnung in der allgemeinen Relativitätstheorie finden sollte. In der Philosophie wird sein Mentor Edmund Husserl, der wiederum durch seinen Lehrer Karl Weierstraß mit der höheren Mathematik seiner Zeit bekannt ist und den jungen Studenten u. a. in die *Hegeische Philosophie* einführt.

Im weiteren Verlauf seiner geistigen Entwicklung wird sich Koyré immer wieder mit der philosophischen und logischen Diskussion der

Begriffe des Raumes und der Unendlichkeit sowie der Bewegung als Prozeß beschäftigen, ja diese Dispute durch die gesamte mittelalterliche Scholastik hindurch verfolgen und schließlich die erste »formalistische« Großtat der neuzeitlichen Wissenschaft in Galileis These entdecken, daß »die Bewegung dem Gesetz der Zahl unterworfen sei« und daß alle wahre Erkenntnis der Naturvorgänge erst durch die Anwendung der mathematischen Formelsprache und der euklidischen Geometrie ermöglicht werde.

Zunächst jedoch wendet sich der junge Russe theologischen Studien zu; 1911 zieht es ihn nach Paris, und an der *Sorbonne*, wo er Vorlesungen von Henri Bergson, Victor Delbos, Andre Lalande und Leon Brunschvicg besucht, beginnt er noch vor dem Krieg unter der Anleitung Francois Picavets mit seiner Dissertation über Anselm von Canterbury. Noch als russischer Staatsbürger tritt er 1914 in die französische Armee ein und kämpft in seiner neuen Wahlheimat an der Front. Nach zwei Jahren wechselt er in den Dienst eines russischen Regiments über, folgt dann einem Ruf in die alte Heimat, wo er in einem Regiment Freiwilliger an der Südwestfront kämpft, bis diese nach der Oktoberrevolution zusammenbricht. Im nachfolgenden Bürgerkrieg gerät er als Mitglied menschewistischer Widerstandsgruppen zwischen die rot-weißen Fronten, und gleich nach Ende des Krieges entschließt er sich, den politischen Aktivitäten zu entsagen, um sich in Paris wieder seinem Studium zu widmen. Dort heiratet er Doris Reybermann, die einer Emigrantenfamilie aus Odessa entstammt - und findet in seinem studentischen Vorkriegsdomizil sein Dissertationsmanuskript wieder, das den Krieg unversehrt überstanden hat.

Noch vor dem Abschluß dieser Arbeit erwirbt er 1922 mit einer Studie zur Gottesidee des Descartes und dessen Beweisen der göttlichen Existenz sein Diplom an der Ecole Pratique des Hautes Etudes und erhält damit zugleich die Lehrberechtigung als Dozent an dieser Hochschule, der er zeitlebens eng verbunden bleibt. Danach schließt er 1923 seine Arbeit über die Gottesidee Anselms an der Sorbonne ab und erlangt die Doktorwürde, um sich schließlich 1929 ebendort mit

einer Arbeit über die Philosophie Jakob Böhmes zu habilitieren. Die Beschäftigung mit der mittelalterlichen deutschen Mystik setzt er fort; sie führt Anfang der dreißiger Jahre zu Pionierarbeiten über Schwenkfeld, Sebastian Franck, Paracelsus und Valentin Weigel.

Über Philon von Alexandria hatten Vollkommenheit und Unendlichkeit als positive Attribute des Göttlichen in die ontologische Diskussion der mittelalterlichen Theologie Eingang gefunden. Diese Auseinandersetzung, bei deren Analyse ihm sicherlich die logische Schulung durchs Mathematikstudium von Nutzen ist, verfolgt Koyré über Anselm bis zu Descartes, in dessen Begriffen der *infinite*, *perfection* und *continuité* er wiederum den Einfluß des mathematischen Denkens auf die theologische Reflexion dingfest macht. Erst später jedoch, als er sich mit dem *Discours de la méthode* auseinandersetzte, sollte Koyré den Einfluß des cartesischen Denkens auf die Geschichte der Naturwissenschaft erkennen (*Entretiens sur Descartes*, New York 1944).

Durch das Studium der mystischen Philosophie Jakob Böhmes gewinnt Koyré Einblick in die Geschichte der Astronomie. Und nachdem er 1929 durch einen bedeutenden Essay über die Entwicklung der Intelligenz im Rußland des frühen 19. Jahrhunderts einen Beitrag zur Geschichte des russischen Dilemmas zwischen europäischer Tradition und nationaler Identität geliefert und zu Beginn der dreißiger Jahre - des Deutschen mächtig- durch mehrere Beiträge zur Sprache und Begrifflichkeit der Hegeischen Philosophie die Hegelrenaissance unter den französischen Intellektuellen entscheidend beeinflusst hat, vollendet dieser unermüdliche, vielseitige und vielsprachige Denker im Jahre 1934 die kommentierte Erstübersetzung der Einleitung des kopernikanischen Hauptwerks ins Französische: *Des Revolution des orbes Celestes*. Koyré bleibt zwar bis ans Lebensende der fünften, religionswissenschaftlichen Sektion der *École Pratique* verbunden, wendet sich aber ab Mitte der dreißiger Jahre von den theologischen Studien solchen der Wissenschaftsgeschichte zu. Dies geschieht vor allem unter dem Einfluß Emile Meyersons, in dessen Haus er mit führenden Vertretern der Wissenschaftsgeschichte, über deren Theorien

diskutiert; doch die akademische Struktur der Pariser Hochschulen verhindert seit seines Lebens eine Institutionalisierung dieser Disziplin.

Während eines Lehrauftrags an der Universität von Kairo vollendet Koyré schon 1939 seine *Etudes galiléennes*, die im April 1940, kurz vor der deutschen Besetzung, in Paris erscheinen. Darin begründet er seine neue historisch-kritische Begriffsanalyse. Diese ist nur im Zusammenhang mit seiner umfassenden analytischen Kenntnis der scholastischen und mystischen Tradition des europäischen Mittelalters zu verstehen. Koyré besinnt sich auf die jene Tradition durchgängig bestimmende Philosophie der griechischen Antike, insbesondere auf die Auseinandersetzung zwischen Platon und Aristoteles, in deren Spannungsfeld der physikalische Begriff der Bewegung im Lauf des Mittelalters eine vielfache Umwertung, Reinterpretation erfährt, bis die Bewegung schließlich nicht mehr als *Prozeß* im Sinne des Aristoteles verstanden wird (die Hegeische Dialektik sollte wieder darauf zurückkommen), sondern im Sinne des Galilei als *Zustand* definiert und somit quantifizierbar wird.

Koyré weist nach, daß Galilei in der Nachfolge Platons, genauer: des großen Platonikers Archimedes steht; ja er selbst bekennt sich zu dieser idealistischen Tradition, die der Mathematik in der Begründung, gar Ermöglichung einer Wissenschaft von der Natur ein unverzichtbares Primat einräumt. Scharf wendet sich Koyré gegen jede Form des Positivismus. Die bloße »Erfahrung« ist ihm - wie dem Pisaner - der wissenschaftlichen Entwicklung eher hinderlich, die Bedeutung der theoretischen und philosophischen Reflexion hingegen eine *Tatsache* im wahrsten Sinn des Wortes. Gleichwohl erkennt Koyré die Berechtigung des aristotelischen Zweifels an: Es bleibt grundsätzlich fraglich, ob die Mathematik wirklich geeignet ist, die natürlichen Phänomene zu beschreiben, da sie doch von aller Qualität derselben abstrahieren muß. Hier zeigt sich Koyrés wahres Format. Nach seinen begrifflichen und historiographischen Analysen der Pioniere der neuzeitlichen Wissenschaft verteilt er nicht Noten, sondern versucht, den Betreffenden innerhalb der Problematik ihres eigenen

Denkens auf die Spur zu kommen: »Und er hatte recht!« ist eine häufige Schlußfolgerung, mit der er die anderswo Irrenden rehabilitiert. Das wird vor allem in der Analyse des Verhältnisses Kepler - Galilei deutlich, die an Differenziertheit kaum zu wünschen übrig läßt (vgl. *Kunst und Wissenschaft im Denken Galileis*; in diesem Band S. 135 ff.). Diesem Argumentationsstil liegt die *dialektike Kenne* des platonischen Dialogs zugrunde, die das Verstehen des Gegenstandes im praktischen Nachvollzug als vornehmstes Beweismittel betrachtet: sachliche Überzeugung statt der Kunst des Überredens.

Ein Ruf de Gaulles führt Koyré im Jahre 1941 von Kairo in die Vereinigten Staaten, wo er die Sache Frankreichs durch die Mitbegründung der *Ecole Libre des Hautes Etudes* zu unterstützen sucht; die amerikanische Regierung deckt zu diesem Zeitpunkt politisch noch das Vichy-Regime Petains. Koyré hält öffentliche Vorlesungen über die platonische Philosophie und stellt seine *Etudes gaileennes* zur wissenschaftlichen Diskussion, die in der Folge weite Kreise zieht und erhebliche Konsequenzen hat. Auch nach dem Krieg führen ihn Kongresse häufig ins Ausland; immer wieder wird er zu Gastvorlesungen und Lehraufträgen in die USA eingeladen: *Harvard, Yale, John Hopkins, Buffab, Brandeis, Wisconsin*. 1955 wird er nach *Princeton* an das *Institute for Advanced Study* eingeladen und im folgenden Jahr dessen Mitglied. In den USA fördern Ernst Panofsky und Robert Oppenheimer seine Arbeit; in Frankreich macht sich Lucien Febvre zum Fürsprecher der Wissenschaftsgeschichte und ihres führenden Kopfes. Koyrés Studien wenden sich jedoch nicht nur Kepler, Galilei, Descartes und Newton, sondern auch denjenigen zu, die gleichsam in der zweiten Reihe stehen: Hooke, Barrow, Cavalieri, Riccioli, Gasendi, Borelli, um nur einige zu nennen. Gemeinsam mit I. B. Cohen analysiert er die studentischen Manuskripte des jungen Newton und weist darin den cartesischen Einfluß nach; beide bereiten eine kritische Ausgabe der *Principia Mathematica* vor. Die Vorarbeiten dazu erscheinen als *Newtonian Studies* (hrsg. von I. B. Cohen, Chicago 1965) erst ein Jahr nach dem Tode Koyrés.



Nikolaus Kopernikus (1473-1543)
Bildnis der Holbeinschule im Observatoire in Paris

Die Entwicklungsstufen der wissenschaftlichen Kosmologie

Wenn ich den Titel meines Beitrags ganz wörtlich genommen hätte: die wissenschaftlichen Kosmologien, d. h. diejenigen, welche die Trennung und damit die Entmenschlichung des Kosmos bis auf die Spitze treiben, so hätte ich wirklich nicht viel zu sagen und gleich mit der Moderne, wahrscheinlich mit Laplace, beginnen müssen. Ich hätte bestenfalls als Vorgeschichte die Konzeptionen der ersten Epochen der griechischen Astronomie in die Erinnerung rufen können, die von Aristarch von Samos, von Apolonios und von Hipparch, denn die kosmologischen Konzeptionen, sogar die, welche wir als wissenschaftlich ansehen, sind nur ganz selten — eigentlich nie — unabhängig von Vorstellungen, die nicht wissenschaftlich, sondern philosophischer, magischer und religiöser Natur sind.

Sogar bei einem Ptolemaios, einem Kopernikus, einem Kepler und sogar bei einem Newton war die Theorie des Kosmos nicht unabhängig von diesen anderen Vorstellungen.

Ich verstehe deshalb »wissenschaftliche Kosmologien« in einem weiteren Sinn, der die Lehren der genannten Denker zu umfassen vermag.

Die wissenschaftlichen kosmologischen Theorien verweisen uns notwendig auf Griechenland, denn es spricht alles dafür, daß dort zum erstenmal in der Geschichte der Gegensatz des Menschen zum Kosmos auftrat, der zur Entmenschlichung des Kosmos führte. Zweifelloso war dieser Gegensatz niemals vollständig; in den großen griechischen Metaphysikern, wie denen von Platon und Aristoteles beispielsweise, haben wir es, bis hin zum Begriff des Kosmos selbst, eher mit Vorstellungen von Vollkommenheit, Ordnung und Harmonie zu

tun, die ihn durchdringen, oder mit dem platonischen Begriff der Herrschaft der Proportion sowohl im Kosmos wie in der Gesellschaft und beim einzelnen Menschen, also mit ganzheitlichen Vorstellungen.

Auf jeden Fall war es dort, daß das Studium der kosmischen Phänomene als solcher und um ihrer selbst willen entstanden zu sein scheint.

Man mag natürlich fragen, ob wir nicht weiter in der Zeit zurückschreiten und den Ursprung der Astronomie und der wissenschaftlichen Kosmologie nicht in Griechenland, sondern in Babylonien verorten sollten. Es gibt, wie mir scheint, zwei Gründe, die dagegen sprechen. Zum einen haben sich die Babylonier niemals von der Astrobiologie gelöst, während das in Griechenland gelungen ist (übrigens scheint die Astrobiologie in Griechenland keineswegs ein ursprüngliches Phänomen zu sein, sondern eine eher späte Erscheinung, viel später jedenfalls als der Ursprung der Astronomie). Der andere Grund ist weniger historisch. Er betrifft die Art, wie wir unsere Vorstellung von Wissenschaft und wissenschaftlicher Arbeit bestimmen. Wenn wir uns eine gewisse ultrapositivistische und ultrapragmatische Vorstellung davon machten, so müßten wir zweifellos sagen, daß der Anfang bei den Babyloniern liegt. Sie haben in der Tat die Himmelserscheinungen beobachtet, die Stellung der Sterne fixiert und die Kataloge davon erstellt, indem sie Tag für Tag die betreffenden Planetenstellungen notierten. Wenn Sie das während einiger Jahrhunderte sorgfältig tun, haben Sie am Ende die Kataloge, die Ihnen die Periodizität der Planetenbewegungen enthüllen und Sie in die Lage versetzen, für jeden Tag des Jahres die Stellung der Sterne und der Planeten vorherzusehen, die Sie bei Betrachtung des Himmels wiederfinden werden. Das ist für die Babylonier höchst bedeutend, denn von diesem Vorhersehen der Planetenstellungen hängt, auf dem Wege der Astrologie, ein Vorhersehen der Ereignisse auf der Erde ab. Wenn also Vorhersehen und Voraussage Wissenschaft sind, so ist nichts wissenschaftlicher als die babylonische Astronomie. Wenn man aber in der wissenschaftlichen Arbeit vor allem

eine theoretische Arbeit sieht, und wenn man - wie ich es tue - glaubt, daß es keine Wissenschaft ohne Theorie gibt, wird man die babylonische Wissenschaft verwerfen und sagen, daß die wissenschaftliche Kosmologie ihre Anfänge in Griechenland nahm, weil es die Griechen sind, die zum erstenmal die intellektuelle Forderung theoretischen Wissens begriffen und formuliert haben: die Erscheinungen zu retten, d. h., eine Theorie zu formulieren, die die beobachtbare Tatsache erklärt. Das aber haben die Babylonier nie getan.

Ich lege Nachdruck auf das Wort »beobachtbar«, denn die erste Bedeutung der berühmten Formel, $\sigma\omega\zeta\epsilon\iota\nu\ \tau\alpha\ \phi\alpha\iota\nu\omicron\mu\epsilon\nu\alpha$, (sozein ta phainomena) ist es ja, die Erscheinungen zu erklären, sie zu retten, d.h., die zugrundeliegende Wirklichkeit offenzulegen, unter der offensichtlichen Unordnung der unmittelbaren Tatsache eine wirkliche, geordnete und begreifbare Einheit zu enthüllen. Es handelt sich nicht lediglich darum, wie uns eine sehr geläufige positivistische Fehlinterpretation belehren will, sie mittels eines Kalküls zu verbinden, um zu einer Voraussage zu gelangen; es handelt sich wahrhaftig darum, eine tiefere Wirklichkeit zu entdecken, die die Erklärung dafür liefert.

Das ist eine Sache von einiger Bedeutung, die uns auch die wesentliche, von den Historikern oft vernachlässigte Verbindung der astronomischen Theorien mit den physikalischen zu verstehen erlaubt. Denn es ist eine Tatsache, daß die großen Entdeckungen - oder die großen Revolutionen in den astronomischen Theorien - stets verbunden waren mit den Entdeckungen oder den Veränderungen in den physikalischen Theorien.

Ich kann Ihnen hier keine auch nur knappe Skizze dieser äußerst aufregenden und lehrreichen Geschichte geben. Ich möchte lediglich einige Etappen der Mathematisierung der Wirklichkeit hervorheben, worin die eigentliche Arbeit des Astronomen besteht.

Es wurde bereits gesagt, daß sie mit der Entscheidung beginnt, unter dem ungeordneten Anschein eine begreifbare Ordnung zu entdecken; auch finden wir bei Piaton eine sehr klare Formel der Forderungen und Voraussetzungen theoretischer Astronomie: die Bewe-

gungen der Planeten auf regelmäßige und kreisförmige Bewegungen zurückzuführen. Ein Programm, das beinahe von seinem Schüler Eudoxos durchgeführt und von Kalippos vervollkommen wurde. In der Tat setzen sie an die Stelle der unregelmäßigen Bewegung irrender Gestirne die wohlgeordneten Bewegungen von Sphären, die einen gemeinsamen Mittelpunkt haben, d. h., ineinandergeschachtelt sind.

Man hat viel gespottet - heute tut man es weniger - über diese griechische Besessenheit von allem Kreisförmigen, über dieses Verlangen, alle Himmelsbewegungen auf Kreisbewegungen zurückzuführen. Was mich betrifft, so finde ich das weder lächerlich noch dumm. Die Kreisbewegung ist ein eigentümlicher und höchst bemerkenswerter Fall von Bewegung, die einzige, die sich in einer endlichen Welt ewig ohne Änderung fortsetzt, und genau das suchten die Griechen: etwas, das sich ewig fortsetzen oder reproduzieren könnte. Das griechische Streben nach Ewigkeit ist außerordentlich charakteristisch für ihr wissenschaftliches Denken. Die griechischen Theoretiker sprechen nie vom Ursprung der Dinge, oder wenn sie davon reden, dann bewußt mythisch. Was die Idee betrifft, daß die Kreisbewegung eine *natürliche* Bewegung ist, so scheint sie sich paradoxerweise in unseren Tagen zu bestätigen: die Sonne kreist, die Gestirne kreisen, die Elektronen kreisen, die Atome kreisen, alles kreist. Wie sollte man leugnen, daß es sich dabei um etwas ganz und gar »Natürliches« handelt?

Kommen wir nun zu denen zurück, die versucht haben, die Himmelsbewegungen als Ergebnis einer Einschachtelung der ineinander kreisenden Kugelschalen darzustellen. Das ist ihnen ziemlich gut gelungen, bis auf eine Erscheinung, die sich nicht recht erklären ließ - es ist äußerst wichtig zu sehen, wie sehr die Griechen auf die Notwendigkeit achteten, eine Erscheinung wirklich zu erklären -, nämlich die Schwankungen in der Helligkeit der Planeten, die bald stark leuchteten und bald wenig, eine Tatsache, die nur erklärbar wurde, wenn man wechselnde Entfernungen von der Erde zugestand.

Diese Tatsache war es, die zur Erfindung einer neuen erklärenden

Theorie nötigte, der sogenannten Theorie der Epizyklen und exzentrischen Bahnen, die vor allem von der Schule von Alexandria ausgearbeitet wurde, von Apollonios, Hipparch und Ptolemaios.

Zwischen den beiden Theorien findet sich ein außergewöhnliches Zwischenspiel. Ein Genie ersten Ranges, Aristarch von Samos, postuliert als erklärende Hypothese die doppelte Bewegung der Erde um die Sonne und um sich selbst. Es ist einigermaßen merkwürdig, daß er folgenlos blieb. Wie es scheint, hatte er einen einzigen Schüler. Plutarch berichtet: »Aristarch hat diese Theorie als Hypothese vorgeschlagen, und Seleukos hat sie als Wahrheit behauptet.« Der Text ist wichtig, weil er das Verlangen und das Unterscheidungskriterium bestätigt, welches die Griechen zwischen einer einfachen rechnerischen Hypothese und einer physikalisch wahren Hypothese machten: die Aufdeckung der Wahrheit.

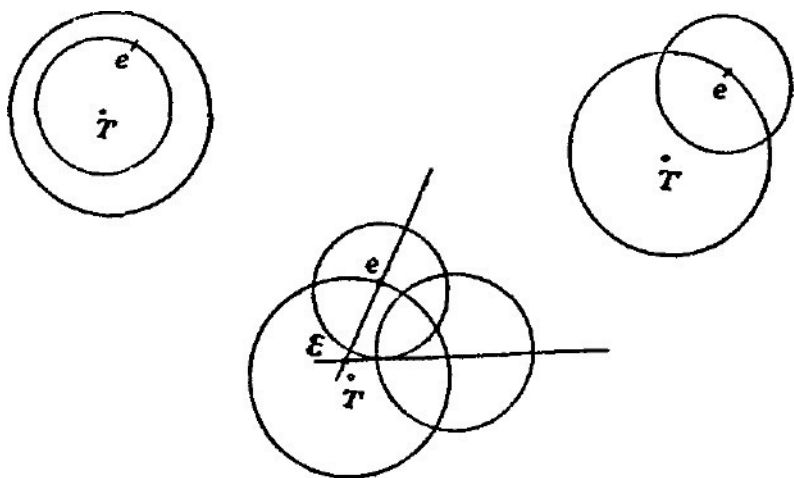
Aristarch hatte keinen Erfolg, und man weiß nicht, warum. Es ist manchmal gesagt worden, die Vorstellung von der Bewegung der Erde widerspräche allzusehr den religiösen Vorstellungen der Griechen. Ich denke, daß es eher andere Gründe waren, die für Aristarchs Mißerfolg verantwortlich waren, dieselben zweifellos, die seit Aristoteles und Ptolemaios und bis hin zu Kopernikus sich jeder nicht geozentrischen Hypothese entgegenstellen: Es sind die unüberwindlichen *physikalischen* Einwände gegen die Bewegung der Erde. Wie ich bereits sagte, gibt es eine notwendige Verbindung zwischen dem Stand der Physik und dem Stand der Astronomie. Nun schien für die antike Physik die Kreisbewegung im Raum sich unbestreitbaren Tatsachen entgegenzustellen und der alltäglichen Erfahrung zu widersprechen. Kurz, es erschien als physikalische Unmöglichkeit. Noch etwas anderes widersetzte sich der Anerkennung von Aristarchs Theorie, nämlich die maßlose Größe seines Universums. Denn wenn die Griechen auch zugestanden, daß das Universum im Verhältnis zur Erde ziemlich groß war — es war sogar sehr groß! —, so erschienen ihnen doch die durch Aristarchs Hypothese postulierten Dimensionen ganz unvorstellbar. Das jedenfalls ist meine Vermutung, denn noch mitten im siebzehnten Jahrhundert erschienen vielen guten

Köpfen solche Ausmaße unmöglich. Man sagte auch - durchaus vernünftig —, wenn sich die Erde um die Sonne drehen würde, so sähe man das bei der Beobachtung der Fixsterne; wenn man keine Parallaxe feststellen könne, so drehe sich die Erde nicht. Zuzugestehen, daß das Himmelsgewölbe so groß sei, daß die Parallaxen der Fixsterne nicht zu beobachten seien, schien dem gesunden Menschenverstand und dem wissenschaftlichen Geist zu widersprechen.

Die Astronomie der sogenannten Epizyklen verdankt dem großen Mathematiker Apollonios ihren Ursprung und wurde von Hipparch und Ptolemaios entwickelt. Bis zu Kopernikus und sogar noch lange danach hat sie die Welt beherrscht. Sie bildet eine der größten Leistungen des menschlichen Denkens.

Man hat manchmal schlecht über Ptolemaios gesprochen und versucht, ihn im Verhältnis zu seinen Vorgängern herabzusetzen. Ich glaube, daß es dazu keinen Grund gibt. Ptolemaios hat getan, was er konnte; wenn er die astronomischen Vorstellungen seiner Zeit nicht erfunden hat, so hat er sie doch entwickelt. Er hat die Elemente des Systems auf bewundernswürdige Weise berechnet. Und wenn er Aristarchs Lehre abgelehnt hat, so tat er es aus wissenschaftlichen Gründen.

Werfen wir einen Blick auf die in Frage stehende Theorie. Man hatte sehr wohl begriffen, daß die Entfernung der Planeten von der Erde nicht immer gleich war; folglich mußten sich die Planeten in ihrem Lauf der Erde nähern und sich wieder entfernen. Weiterhin mußte man die Unregelmäßigkeiten ihrer Bewegungen erklären - sie schienen bald vorwärts zu laufen, bald anzuhalten, bald rückwärts zu laufen —, und so entstand die Vorstellung, sie nicht auf einem Kreis, sondern auf zwei oder drei Kreisen laufen zu lassen, indem man auf dem ersten Kreis einen kleineren Kreis anbrachte oder den großen Kreis selbst auf einen kleineren Kreis setzte. Den tragenden Kreis nennt man den Deferenten, den getragenen Kreis den Epizyklus. Man kann gleicherweise, um den Mechanismus zu vereinfachen, den tragenden Kreis und den getragenen Epizyklus ersetzen durch einen einzigen, aber im Verhältnis zur Erde exzentrischen Kreis, d. h., wenn



die Erde sich an einem Punkt T befindet, so dreht sich der große Kreis nicht um die Erde, sondern um einen Punkt, der außerhalb ihres Zentrums liegt. Die beiden Weisen, die Himmelsbewegungen darzustellen, sind völlig äquivalent und lassen sich miteinander kombinieren. Nichts hindert zum Beispiel daran, einen Epizyklus auf einen exzentrischen Kreis zu setzen.

Wenn man die Kreise aufeinandersetzt und sie mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten laufen läßt, kann man jede beliebige geschlossene Kurve umschreiben. Und wenn man sie in ausreichender Menge aufeinandersetzt, kann man alles beliebige zeichnen, sogar eine Gerade oder eine Ellipsenbewegung. Man muß offensichtlich manchmal eine beträchtliche Menge von Kreisen akkumulieren, was die Berechnungen erschwert, aber theoretisch stets erlaubt ist.

Die Theorie der Epizyklen ist eine Konzeption von außergewöhnlicher Tiefe und mathematischer Kraft, und es bedurfte der ganzen Genialität der griechischen Mathematiker, um sie formulieren zu können.

Es gab in dieser Theorie nur einen einzigen Punkt oder eine ein-

zige Tatsache, die schwer zu akzeptieren war: Um die Zahl der Kreise nicht unbegrenzt zu erhöhen, mußte Ptolemaios auf das Prinzip der gleichförmigen Kreisbewegung verzichten oder, genauer, er hat ein Mittel gefunden, mit dem er offensichtlich die Anerkennung des Prinzips mit der Unmöglichkeit, ihm tatsächlich zu folgen, versöhnen konnte. Er sagte sich, daß man sich aus der Affäre ziehen könne, wenn man die Bewegung als gleichförmig nicht im Verhältnis zum Kreismittelpunkt selbst annehme - die Kreise drehen sich nicht gleichförmig im Verhältnis zu ihren eigenen Zentren -, sondern im Verhältnis zu einem bestimmten Punkt, der exzentrisch innerhalb des Kreises liegt und den man Aquant nennt.

Das war eine sehr ernste Sache, denn indem man das Prinzip gleichförmiger Kreisbewegung aufgab, gab man die physikalische Erklärung der Erscheinungen auf. Genau seit Ptolemaios finden wir einen Bruch zwischen der mathematischen Astronomie und der physikalischen Astronomie.

Während die Philosophen und die Kosmologen weiterhin die Himmelskörper durch gleichförmige Bewegungen körperlicher Kugelschalen bewegen ließen und vom physikalischen Standpunkt aus auf der Bedeutung dieser Konzeption beharrten, entgegneten die mathematischen Astronomen, daß das physikalische Problem sie nichts angehe und es ihr Ziel sei, die Planetenstellung zu bestimmen, ohne sich um den Mechanismus zu kümmern, der die Planeten an den rechnerisch festgelegten Platz transportiere.

Ich denke, daß Ptolemaios sich zu diesem Bruch zwischen physikalischer und mathematischer Astronomie entschlossen hat, weil er an die Astrologie glaubte und weil es, vom astrologischen Gesichtspunkt aus ebenso wie vom praktischen, tatsächlich unnötig war, zu wissen, wie die Planeten physikalisch und wirklich an einen bestimmten gegebenen Ort gelangen. Wichtig ist es, ihre Stellungen berechnen zu können, um daraus die astrologischen Folgerungen zu ziehen.

Ich kann mich über dieses Problem hier nicht verbreiten, obwohl es bedeutend ist und der Unterschied zwischen den beiden Astronomien sehr lange fortgedauert hat; tatsächlich bis zu Kopernikus und

zu Kepler. Die arabischen Astronomen des Mittelalters haben, sehr vernünftig, die Einheit wiederherzustellen versucht, indem sie die rein mathematischen Kreise des Ptolemaios durch Sphären oder körperliche Kugelschalen ersetzten. In der christlichen Welt folgte man ihnen. Ich nenne den großen Astronomen Peurbach, dem es gelang, ein Modell der Planetenbewegungen zu konstruieren (ohne jedoch diese Planetenbewegungen auf gleichförmige Umdrehungen zurückführen zu können), und der mit einer vergleichsweise sehr geringen Zahl materieller Sphären alle ihre Bewegungen erklären konnte.

Die große Revolution, die die Erde aus dem Zentrum des Universums verlagerte und sie in den Raum schleuderte, ist noch jung, und trotzdem ist es sehr schwer, die Motive zu verstehen, die das Denken des Kopernikus leiteten. Es ist gewiß, daß es einerseits ein physikalisches Motiv gab. Die Unmöglichkeit einer physikalischen, mechanischen Erklärung der Ptolemäischen Astronomie, dieser famose Aquant, der eine nichtgleichförmige Bewegung in den Himmel einführte, erschien ihm einfach unzulässig. So sagt auch sein Schüler Rheticus, der große Vorzug der neuen Astronomie bestehe darin, daß sie uns von den Aquanten befreit, d. h., daß sie uns endlich ein zusammenhängendes Bild der kosmischen Wirklichkeit bietet und nicht zwei Bilder, zum einen das der Philosophen und zum andern das der mathematischen Astronomen, die zu allem Überfluß untereinander noch nicht einmal übereinstimmten.

Darüber hinaus vereinfachte dieses neue Bild die allgemeine Struktur des Universums, denn es erklärte - und Sie sehen, daß es sich stets um die gleiche Tendenz handelt: die Suche nach der begreifbaren Kohärenz der Wirklichkeit, um die Unordnung der reinen Erscheinung zu erklären - die offensichtlichen Unregelmäßigkeiten der Planetenbewegungen, indem es sie geradezu auf reine unwirkliche »Erscheinungen« zurückführte. In der Tat erwiesen sich diese offensichtlichen Unregelmäßigkeiten (Anhalten, Rückwärtslaufen usw.) in den meisten Fällen als lediglich sekundäre Wirkungen, nämlich als Projektionen der Bewegungen der Erde in den Himmel.

Einen dritten Vorzug dieser Theorie bildete die systematische Ver-

bindung, die sie zwischen den Himmelserscheinungen errichtete, indem der Augenschein, d. h. die Beobachtungsdaten der verschiedenen Planeten, zumindest teilweise durch einen einzigen Faktor erklärt wurden, nämlich die Bewegung der Erde. Man konnte daher leichter daraus die wahren und die wirklichen Bewegungen ableiten.

Wie ist Kopernikus zu seiner Konzeption gelangt? Das ist sehr schwer zu sagen, denn das, was er uns selbst darüber sagt, führt nicht zu seiner Astronomie. So berichtet er, daß er Zeugnisse über die antiken Autoren gefunden habe, welche die Dinge anders zu erklären versuchten, als Ptolemaios es tat, die insbesondere vorgeschlagen hatten, die Sonne zum Mittelpunkt der Bewegungen der unteren Planeten (Venus und Merkur) zu machen, und daß er sich sagte, man könne versuchen, das gleiche für die anderen zu tun.

Aber das hätte ihn zu einer Astronomie vom Typus derjenigen geführt, die Tycho Brahe nach ihm entwickelt hat. Es ist übrigens merkwürdig, daß niemand früher, vor Kopernikus, versucht hat, was sich logischerweise zwischen Ptolemaios und Kopernikus hätte ereignen müssen. Das zeigt uns, daß die Geschichte des wissenschaftlichen Denkens nicht völlig logisch ist. Auch muß man, um dessen Entwicklung zu begreifen, außerlogischen Faktoren Rechnung tragen. So war einer der Gründe - wahrscheinlich der tiefste - der großen astronomischen Reform des Kopernikus überhaupt nicht wissenschaftlich.

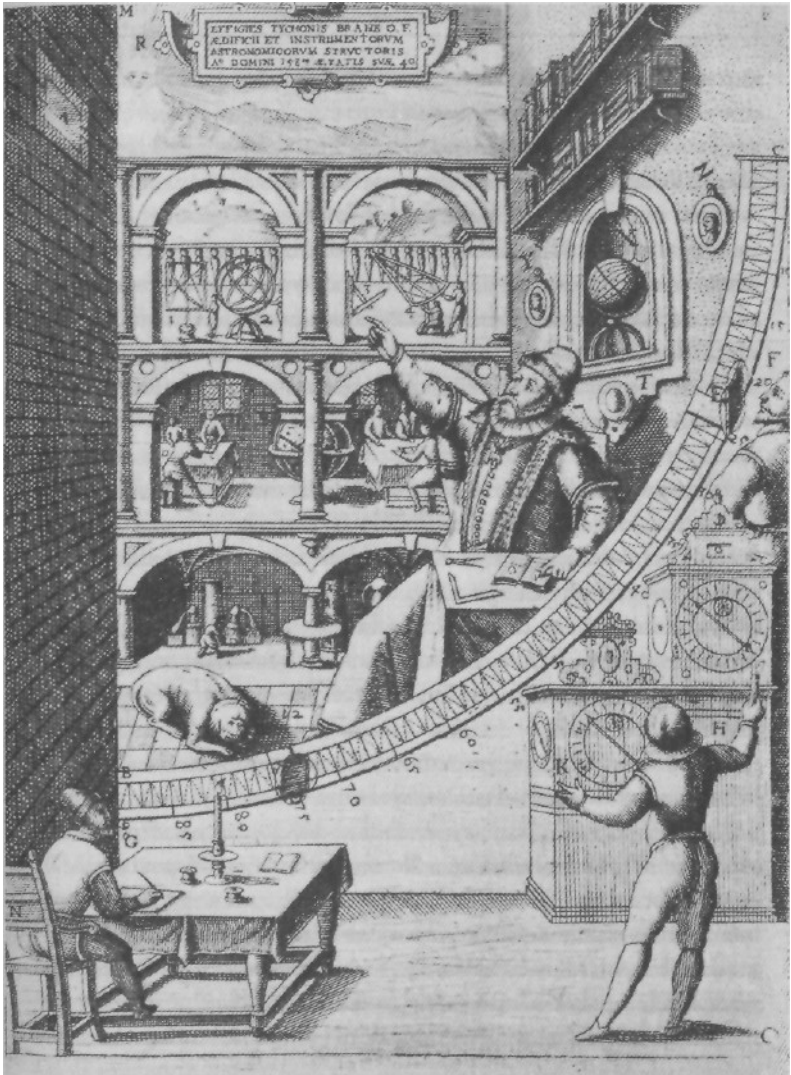
Ich meinerseits denke, es waren ästhetische oder metaphysische Gründe, Erwägungen der Harmonie, die verhinderten, daß Kopernikus beim Stadium Tycho Brahes - wenn er es überhaupt je ins Auge faßte — stehenblieb. Da die Sonne die Quelle des Lichtes und das Licht das Schönste und Beste in der Welt ist, schien es ihm mit der Vernunft, die die Welt lenkt und erschafft, übereinzustimmen, daß dieser leuchtende Körper im Mittelpunkt des Universums seinen Platz hat, das er zu beleuchten bestimmt ist. Kopernikus sagt es ausdrücklich, und ich glaube, es gibt keinen Grund, nicht an seine Sonnenverehrung zu glauben, um so mehr als der große Astronom Kepler — der überhaupt erst die moderne Astronomie eröffnet - darin noch weiterging als Kopernikus.

Ich kann nicht umhin, Tycho Brahe zu erwähnen. Sein astronomisches System, das vor Kopernikus hätte erscheinen müssen, ist dessen genaues Äquivalent, mit dem einen Unterschied, daß Tycho Brahe die Erde für unbeweglich hält und die Sonne mit den sie umkreisenden Planeten um die Erde kreisen läßt.

Welche Gründe bewogen ihn zu diesem Rückschritt, im Vergleich zu Kopernikus? Ich glaube, daß ihn zwei sehr unterschiedliche Arten von Erwägungen leiteten: einerseits seine religiösen Überzeugungen, die ihm nicht erlaubten, eine Lehre anzuerkennen, die im Widerspruch zur Heiligen Schrift stand, und andererseits die Unmöglichkeit, die Bewegung der Erde vom physikalischen Standpunkt aus zuzugestehen. Deshalb beharrt er auf den physikalischen Einwänden gegen die Erdbewegung, worin er übrigens vollkommen recht hat, denn die waren vor der wissenschaftlichen Revolution des siebzehnten Jahrhunderts nicht zu widerlegen.

Ich muß noch von Kepler sprechen, dessen Werk ebenfalls nicht vollständig wissenschaftlich ist und der tief inspiriert ist durch die Idee der Harmonie, durch die Idee, daß Gott die Welt nach Gesetzen mathematischer Harmonie gegliedert hat. Das ist für Kepler der Schlüssel für die Struktur des Universums. Was die Stellungen betrifft, die er der Sonne und der Erde in ihrem Bezug aufeinander zuerkennt, so ist er selbstverständlich Kopernikaner, und er ist es aus demselben Grund wie Kopernikus: Die Sonne ist für ihn der sichtbare Gott des Universums, das Symbol des Schöpfergottes, der sich im erschaffenen Weltall zum Ausdruck bringt. Und deshalb gebührt der Sonne der Platz in der Mitte der Welt.

Auf diesem metaphysischen Fundament errichtet Kepler sein wissenschaftliches Werk, das mit seinen Absichten ebenso wie mit seinen Ergebnissen das des Kopernikus bei weitem überschreitet. Tatsächlich ist das von Kepler verfolgte Ziel sehr ehrgeizig und sehr modern: Er will die Einheit der wissenschaftlichen Weltauffassung, die Einheit von Physik und Astronomie wieder- (oder genauer: überhaupt erst) herstellen. Deshalb heißt das große astronomische Werk, Keplers grundlegendes Werk, das dem Planeten Mars gewidmet ist:



Tycho Brahe (1546-1601) mit dem großen
Mauerquadranten seines Observatoriums in Uranienburg
(Uraniborg/Dänemark).

Holzschnitt aus seiner *Astronomiæ instrumentæ mechanica*
(Wandsbek 1598)

Astronomia nova Αιτιολογητοζ, seu *physica coelestis* (Die Neue Astronomie oder Himmelsphysik).

Keplers Argumentation wird von der Idee der Kausalerklärung geleitet: Wenn die Sonne im Zentrum der Welt liegt, so dürfen die Planetenbewegungen in Relation zur Sonne nicht geometrisch oder optisch - wie bei Kopernikus - geregelt werden, sondern sie müssen auch physikalisch und dynamisch erklärt werden. Keplers Streben ist es deshalb, nicht nur eine astronomische Konzeption zu finden, die es erlaubt, die Erscheinungen zu ordnen und zu »retten«, sondern auch eine physikalische Konzeption, die es erlaubt, die wirkliche Bewegung der Himmelskörper im Weltall mit physikalischen Gründen zu erklären.

Folgerichtig beharrt er in der Vorrede zur *Astronomie nova* auf der Notwendigkeit dieser Vereinigung der Himmelsphysik mit der irdischen Physik und auf der Tatsache, daß die Sonne nicht lediglich der Mittelpunkt der Welt ist und sich damit begnügt, sie zu beleuchten, während sie draußen und unabhängig von ihr *die* je in sich vollständigen Bewegungsmechanismen der Planeten laufen läßt, sondern daß sie einen physikalischen Einfluß auf die Bewegungen der Gestirne ausüben muß.

Es fehlt hier der Raum, über die Struktur von Keplers Denken und die technische Ausarbeitung seiner Lehre ausführlicher zu werden. Merkwürdig und amüsant ist jedenfalls, daß Kepler bei der Deduktion der berühmten Gesetze, die seinen Namen tragen und die jedermann kennt, nämlich daß die Himmelskörper sich auf Ellipsenbahnen bewegen und daß die von ihren Vektorstrahlen bestrichenen Flächen proportional zur Zeit sind, einen doppelten Fehler macht. Aber die Fehler heben sich gegenseitig auf, so daß seine Deduktion schließlich gerade dank dieses doppelten Fehlers richtig ist.

Wahrscheinlich weil er von Anfang an eine neue Lösung des Problems der Planetenbewegungen finden wollte, eine kausale Astronomie (Αιτιολογητοσ), hat Kepler, nachdem er herausgefunden hatte, daß die wirkliche Umlaufbahn des Mars eine Ellipse ist, nicht versucht — was möglich war —, diese Ellipse durch eine Anordnung

von Kreisen zu reproduzieren, sondern er hat den Mechanismus der Kreise, Sphären oder Kugelschalen, welche die Planeten leiten und bewegen, sogleich durch die Vorstellung einer von der Sonne ausgehenden magnetischen Kraft ersetzt, die ihre Bewegungen bestimmt.

Wenn man die Entwicklung des astronomischen Denkens überblickt, könnte man sagen, daß es gleich von Beginn an versuchte, die der Unordnung der Erscheinungen zugrundeliegende geordnete Wirklichkeit der Sternbewegungen zu entdecken. Dazu haben die Griechen die einzigen mathematischen und physikalischen Mittel angewendet, die ihnen der Stand der wissenschaftlichen Kenntnisse ihrer Epoche an die Hand gab, d.h. die Idee der natürlichen Kreisbewegung, wodurch sie wiederum genötigt waren, die sichtbaren Bewegungen durch eine Überlagerung und Akkumulation von Kreisbewegungen zu erklären. Der Mißerfolg des Ptolemaios erzwang schließlich eine Veränderung der Physik selbst, und die Astronomie kam mit Kepler und mehr noch mit Newton erst dadurch zustande, daß sie sich auf eine neue Physik gründete.

Man könnte diese Entwicklung auch unter dem Gesichtspunkt des Studiums der Dimensionen des Universums begreifen. Ich sagte schon, daß das griechische Universum, der griechische (und der mittelalterliche) Kosmos begrenzt waren. Gewiß, er war ziemlich groß - im Verhältnis zu den Dimensionen der Erde -, aber nicht groß genug, um eine bewegliche Erde unterzubringen, eine Erde, die um die Sonne kreist. Die Auffassung von der notwendigen Begrenztheit des stellaren Universums, des sichtbaren Universums, ist ganz natürlich: Wir *sehen* ein Himmelsgewölbe. Wir können es uns als sehr weit weg denken, aber es ist außerordentlich schwer zuzugestehen, daß es gar nicht existiert und die Sterne in unwahrscheinlichen, verschiedenen Entfernungen ohne Ordnung, Sinn und Verstand im Raum verteilt sind. Das setzt eine wirkliche geistige Revolution voraus.

Die Einwände gegen die Unbegrenztheit und sogar gegen die übermäßige Ausdehnung des Universums sind von beträchtlicher Bedeutung; deshalb kommen sie während des gesamten Ganges der Geschichte der Astronomie immer wieder vor. So wendet Tycho Brahe

gegen Kopernikus ein, daß in seinem System die Entfernung zwischen der Sonne und den Sternen *mindestens* siebenhundertmal die Entfernung der Sonne von der Erde wäre, was ihm absolut unzulässig erscheint und ganz und gar nicht von den Daten der (ohne Fernrohre vorgenommenen) Beobachtung gestützt. Aus ähnlichen Gründen vermag Kepler, der die Kreisbewegung der Erde zugesteht und der folglich genötigt ist, die Dimensionen unseres Universums im erforderlichen Maße auszudehnen, um das Fehlen von Parallaxen der Fixsterne zu erklären, trotzdem nicht die Unbegrenztheit der Welt zuzugestehen. Das Himmelsgewölbe oder unser Himmelsweltall bleibt für ihn notwendig begrenzt. Der Himmel ist unermesslich groß, sein Durchmesser umfaßt sechsmillionenmal den Erddurchmesser, aber er ist begrenzt. Die Grenzenlosigkeit der Welt ist metaphysisch unmöglich. Übrigens scheint keine wissenschaftliche Erwägung sie ihm aufzudrängen.

Giordano Bruno ist nahezu der einzige, der sie zugesteht. Aber ausgerechnet Bruno ist weder Astronom noch Gelehrter; er ist ein Metaphysiker, dessen Vision der Welt über die der Wissenschaft seiner Zeit hinausgeht.

Die klassische Physik und auch noch die Physik Galileis ließen sich bei ihrem Postulat der Unendlichkeit des Universums sowie der Identität des wirklichen Raums mit dem Raum der Geometrie von theologischen Erwägungen leiten. Erst mit Newton erfährt die Unendlichkeit des Sternenhimmels ihre zweifelsfreie wissenschaftliche Bestätigung.

Leonardo da Vinci nach 500 Jahren

Von Zeit zu Zeit schickt uns der Himmel jemanden, der nicht nur menschlich ist, sondern auch göttlich dergestalt, daß wir durch seinen Geist und die Überlegenheit seines Verstandes den Himmel erreichen können.« — So beginnt Vasari seine Lebensbeschreibung des Leonardo da Vinci. Derart waren die Empfindungen von Vasaris Zeitgenossen gegenüber dem großen Florentiner, derart wären zweifellos, wenn auch anders formuliert, die Empfindungen unserer eigenen Zeitgenossen: Empfindungen der Hochachtung, der Bewunderung, ja der Verehrung für den großen Künstler, für den großen Gelehrten der Renaissance.

Aus diesem Grunde gab es 1952, fünfhundert Jahre nach der Geburt des Leonardo da Vinci, auf der ganzen Welt, in Italien, in Frankreich, in England und in den Vereinigten Staaten eine große Anzahl von Feiern und Veranstaltungen, um dieses Ereignisses zu gedenken, und auch einige Kolloquien, bei denen Künstler, Historiker, Gelehrte und Wissenschaftler zusammenkamen, nicht nur um zu gedenken, sondern auch, um ihre Ansichten zu vergleichen und gemeinsam ein besseres Verständnis Leonardos, eine bessere Würdigung der Position auszuarbeiten, die ihm in der Geschichte des menschlichen Geistes zugesprochen werden soll.

Es ist immer eine schwierige Aufgabe, die Rolle eines großen Menschen in der Geschichte zu deuten. Ein großer Mensch gehört seiner Zeit an; und dennoch — und genau deswegen nennen wir ihn »groß« — gehört er ihr auch wieder nicht, zumindest nicht gänzlich, sondern überschreitet sie und drückt ihr sein Gepräge auf. Er verwandelt sozusagen seine Vergangenheit und verändert seine Zukunft.

Um ihn genau zu situieren, müssen wir ihn mit seinen Vorgängern, mit seinen Zeitgenossen und mit seinen Nachfolgern konfrontieren — eine schwierige und verwickelte Aufgabe, die um so schwieriger wird, je größer der Mensch in seinen Bestrebungen, seinem Denken und seinem Werk erscheint.

Diese Schwierigkeit wird überwältigend, wenn es sich um Leonardo handelt, der, wenn es überhaupt je eines gab, ein Universalgenie gewesen ist.

Darüber hinaus stehen wir vor einer besonderen, ja einzigartigen Schwierigkeit: Es gibt nicht einen Leonardo da Vinci, sondern zwei.

Einerseits ist da der »öffentliche« oder »äußerliche« Mensch Leonardo. Der begabte Junge, am 15. April 1452 als Sohn des SerPieroda Vinci geboren, der mit vierzehn oder fünfzehn Jahren Schüler oder eher Lehrling des Andrea Verrocchio und in der Folge sein Teilhaber wird.

Es gibt den schönen, glänzenden und außerordentlich begabten jungen Mann: Musiker, Maler, Bildhauer, Architekt und Ingenieur, den Lorenzo Magnifico 1481 an Lodovico Sforza, genannt »Il Moro«, den regierenden Herzog von Mailand ausleiht. 1482 in dessen Dienste getreten, arbeitet er fast zwanzig Jahre lang für ihn bis zum Sturz dieses Fürsten bei der Einnahme Mailands durch die Franzosen. Er arbeitete für ihn als eine Art Mädchen für alles und Tausendsassa: Als Zeremonienmeister organisiert er Schauspiele und Feste, als Ingenieur plant und beaufsichtigt er Kanal-, Festungs- und Dammbauten, als Künstler malt er das Porträt von Lodovicos Schwägerin Isabella d'Este für ihn und auch seine schönen Mätressen Cecilia Callerani (1485) und Lucrezia Crivelli (1495); aber zunächst und vor allem als Bildhauer arbeitet er jahrelang an der großen Reiterstatue des Francesco Sforza, welche diejenigen des Donatello und des Verrocchio an Ausmaß übertreffen sollte, um der Welt die Macht der Dynastie Sforza und den Ruhm Leonardos zu verkünden.

Das ist der Mann, der, während er für »Il Moro« arbeitet, gleichzeitig das *Abendmahl* und die *Feisengrottenmadonna* für die Dominikaner von Santa Maria delle Grazie malt; der später in Florenz, wohin er



Leonardo da Vinci (1452-1519) Selbstbildnis
(Rötelzeichnung, in der Nationalbibliothek Turin)

nach dem Sturz seines Herrn zurückkehrt, die *Heilige Familie* und *Leda* und *Mona Lisa* und *Die Schlacht bei Anghiari* malt und damit seinen Ruf als größter Maler seiner Zeit begründet.

Das ist der Mann, der Cesare Borgia dient und der 1507 nach Mailand zurückkehrt, diesmal, um für die Franzosen zu arbeiten, für Charles von Amboise und den Marschall Trivulzio; der dann, als die Franzosen die Stadt aufgeben und er aufbrechen muß, nach Rom geht, um den Medici zu dienen, dem Papst Leo X., und der schließlich, müde, aber nicht gebrochen, von der Welt besiegt, aber nicht entmutigt, 1515 die Einladung des französischen Königs Franz I. annimmt und die letzten Jahre seines Lebens in Cloux bei Amboise verbringt, wo er friedlich am 2. Mai 1519 stirbt.

Das ist der öffentliche oder äußere Mensch, den das neunzehnte Jahrhundert voller Bewunderung als größten Repräsentanten seiner Zeit ansieht, der Künstler und unvergleichliche Schöpfer, das vollkommene Beispiel des freien und schöpferischen Individuums, das sich in Werken von unvergänglicher Vollkommenheit und Schönheit offenbart.

Zugleich ist er eine tragische Gestalt, denn das Schicksal war hart mit diesem äußeren Menschen und seinen Werken. Einige Bildnisse sind verloren. Verloren sind auch die berühmten Zeichnungen für *Die Schlacht bei Anghiari*. *Das Abendmahl* zersetzt sich. Die große Reiterstatue des Francesco Sforza, *Il Cavallo*, wurde nie gegossen: Es gab kein Geld, um das Metall zu bezahlen, oder vielmehr brauchte man das Metall für Waffen. Das Tonmodell, das 1493 auf dem Postament errichtet wurde, auf dem die Bronzefigur stehen sollte, verschwand spurlos unter der konzertierten Aktion des Regens und der Pfeile der Soldaten des Marschalls Trivulzio, die es als Ziel beim Bogenschießen mißbrauchten.

Wie groß er auch sein mag, dieser öffentliche Mensch ist nicht der ganze Leonardo. Es gibt noch einen anderen, den »inneren« Menschen, den geheimen Menschen. Es ist der Mann, den Franz I. voller Achtung »mein Vater« nannte und über den er zu Benvenuto Cellini zwanzig Jahre nach Leonardos Tod sagte, er sei nicht nur der beste

Maler, Bildhauer und Architekt gewesen, sondern auch und vor allem ein sehr großer Philosoph. Es ist der Mann, der unzählige Blätter mit Notizen und philosophischen und wissenschaftlichen Aufsätzen beschrieb und sie mit geometrischen, mechanischen und anatomischen Zeichnungen bedeckte, mit Buchprojekten und Entwürfen für Maschinen. Es ist der Mann, der diese Notizen und Aufsätze in Spiegelschrift schrieb, die nur mit einem Spiegel zu entziffern sind, um sie vor indiskreten Blicken zu schützen, und der sie darüber hinaus geheimhielt und sie nie - oder doch nur sehr selten - jemandem zeigte. So ließ er sie 1517 Antonio de Beatis sehen, den Sekretär des Kardinals von Aragon, der in der Folge einen Bericht für seinen Herrn schrieb und andeutete, daß diese Handschriften sehr schön seien und sehr nützlich sein könnten, wenn sie veröffentlicht würden.

Diese Papiere wurden nie veröffentlicht. Anstatt sie Franz 1. zu hinterlassen, der sie zumindest alle beieinander verwahrt hätte, vermachte Leonardo sie vor seinem Tod testamentarisch Francesco Melzi, seinem Hausgenossen, Schüler, Sekretär und Freund. Melzi brachte sie nach Italien und hielt sie, so wie sein Meister, praktisch geheim. Nach seinem Tod kamen sie an seine Erben, die einen Teil verloren und das übrige am Ende des sechzehnten Jahrhunderts an einen gewissen Pompo Leoni verkauften, einen italienischen Bildhauer im Dienste des spanischen Hofes.

Die Folge der Geschichte dieser Handschriften ist ziemlich kompliziert und zu lang, um hier erzählt zu werden. Man fand sie in Spanien, dann erneut in Italien, ehe sie zwischen Paris und Windsor, Turin, Mailand und Madrid zerstreut wurden. Worauf es ankommt, ist, daß mit Ausnahme der von der Malerei handelnden Teile der Handschriften, die zur Grundlage des 1651 in Paris veröffentlichten *Tmttato della Pithura* wurden, des sogenannten »Arundel«-Manuskripts (Thomas Howard Lord Arundel brachte es 1638 aus Spanien nach England, wo der deutsche Anthropologe Blumenbach es 1788 sah) und einigen Seiten, die von wissenschaftlichen Problemen handeln, die Guillaume Libri in den Archiven des Insti-

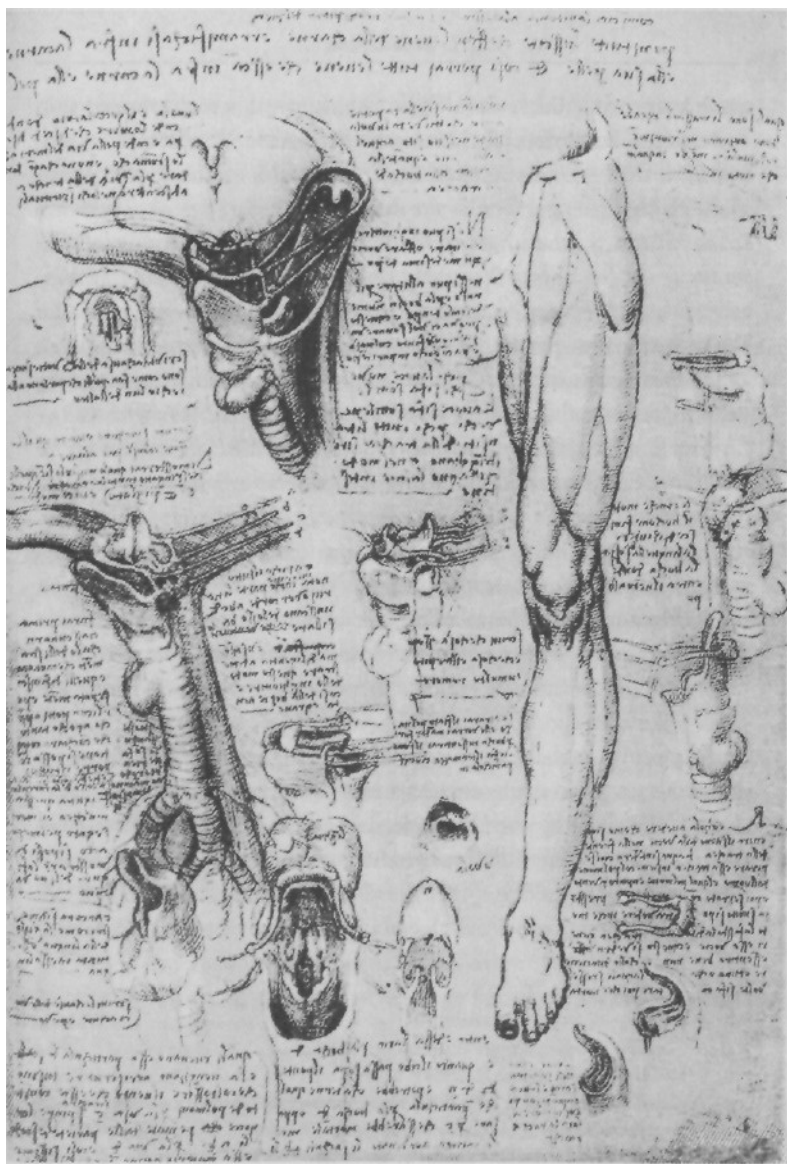
tut de France gestohlen und in seiner *Histoire des sciences mathématiques en Italie* 1841 erwähnt hat, alle anderen Handschriften unbekannt blieben.

Erst im letzten Viertel des neunzehnten Jahrhunderts wurden in den großen öffentlichen Bibliotheken, wo sie seit Hunderten von Jahren friedlich schlummerten, einige dieser Handschriften entdeckt; sie wurden von Jean-Paul Richter (1888), Ravaisson-Mollien (1881-1891), McCurdy (1938) und anderen transkribiert, übersetzt und schließlich veröffentlicht.

Der Eindruck, den diese Publikationen hervorriefen, war beträchtlich. Leonardos Gestalt nahm übermenschliche Ausmaße an. Er wurde zum größten Geist der Moderne ausgerufen, zum Begründer der modernen Techniken und Naturwissenschaften, zum Vorläufer von Kopernikus, Vesalius, Bacon und Galilei, der wie ein Wunder und ein *proles sine matre* (ein Kind ohne Mutter) am Beginn der modernen Welt auftritt.

Dann, in den ersten Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts veröffentlichte der große französische Wissenschaftler und Gelehrte Pierre Duhem, dem wir die Wiederentdeckung der mittelalterlichen Wissenschaft verdanken, sein berühmtes Werk *Leonard de Vinci, ceux qu'il a lus et ceux qui l'ont lu* (L d. V, die, die er las, und die, die ihn lasen, 1906-1913), worin er versuchte, dieses eher mythische Bild Leonardos, das ich gerade beschrieb, zu zerstören und es durch ein anderes, strikt historisches, zu ersetzen.

Duhems Buch ist der Ausgangspunkt jeder modernen Forschung. Im Vergleich mit seinen ungeheuren Verdiensten fällt es wenig ins Gewicht, daß er, geblendet und begeistert von seiner doppelten Entdeckung, der mittelalterlichen Naturwissenschaft einerseits und der mittelalterlichen Elemente in Leonardos Denken andererseits, uns schließlich ein ziemlich befremdliches und paradoxes Bild von ihm zeichnet: das Bild eines Leonardo, der nicht nur ein Naturwissenschaftler war, sondern auch ein so großer Gelehrter wie Duhem selbst; ein Leonardo, der die letzte Frucht der mittelalterlichen Tradition ist, vor allem der Pariser Nominalisten, die er sorgfältig stu-



Anatomische Skizzen des Kehlkopfs, Schlunds, der
Lufttröhre und des Schluckmechanismus, mit einer
Zeichnung des Beins

diert hatte und die er den Wissenschaftlern des sechzehnten und sogar des siebzehnten Jahrhunderts durch seine Handschriften aufbewahrt und weitergereicht hatte. Leonardo erschien nun nicht mehr als einzigartiges Genie, wie ihn die Historiker des neunzehnten Jahrhunderts gesehen hatten. Ganz im Gegensatz dazu wurde er in Duhems Auffassung zum wichtigsten Bindeglied zwischen dem Mittelalter und der Neuzeit, der so die Einheit und die Kontinuität der Entwicklung des wissenschaftlichen Denkens wiederherstellt.

Die zeitgenössischen Gelehrten haben bei aller Anerkennung zahlreicher mittelalterlicher Elemente im Denken Leonardos (seine Dynamik, seine Konzeption von Wissenschaft, die der Erfahrung und der Mathematik zuerteilte Rolle haben mittelalterliche Entsprechungen) das von Duhem gezeichnete Bild nicht akzeptiert.

Wir, die wir dank der von Duhem in Gang gesetzten Bewegung sowohl das Denken des Mittelalters wie das der Renaissance sehr viel besser kennen, als es ihm möglich war, wir wissen jetzt, daß Leonardo nicht über den Handschriften und Inkunabeln des Albert von Sachsen oder Bradwardine, des Nicole Oresme oder Buridan, des Suisset oder Nikolaus von Kues grübeln mußte, um die mittelalterliche Überlieferung in sich aufzunehmen, wenn er auch wahrscheinlich einige dieser Bücher gelesen oder überflogen hat. Diese antiaristotelische Überlieferung, die Überlieferung einer auf dem Begriff des *Impetus*, der im bewegten Körper gegenwärtigen Kraft basierenden Bewegungsenergie, welche die Pariser Nominalisten der Dynamik des Aristoteles entgegengesetzten lag in der Luft; es war eine noch leben-

Nach der Dynamik des Aristoteles impliziert jede starke Bewegung die fortgesetzte Wirkung eines mit dem bewegten Körper verbundenen Bewegers. Es gibt keine Bewegung ohne Beweger- wenn wir sie trennen, hört die Bewegung auf. Wenn Sie einen Wagen nicht länger ziehen oder schieben, wird er deshalb aufhören, sich zu bewegen, und anhalten.

Das ist eine sehr gute Theorie, die die meisten Erscheinungen des täglichen Lebens ausreichend erklärt, die aber bei den Fällen auf die größten Schwierigkeiten stößt, da die Körper sich weiterhin bewegen, selbst wenn sie nicht mehr von einem Beweger gestoßen oder gezogen werden: bei Pfeilen, die vom Bogen geschossen, bei Steinen, die mit der Hand geworfen werden.

dige Überlieferung, die man sowohl im Unterricht der Universitäten wie in den volkstümlichen Büchern in den Vulgärsprachen - besonders auf italienisch - fand, deren Bedeutung und weitere Verbreitung wir inzwischen zu würdigen wissen.

Wir wissen auch, daß die Wissenschaftler des sechzehnten Jahrhunderts, die Bernardino Baldi, Cardano, Tartaglia oder Benedetti, nicht in Leonardos Handschriften suchen mußten, um diese Überlieferung zu finden; sie konnten sie leichter in einer großen Zahl frisch gedruckter Bücher finden.

Duhems Auffassung hatte, obwohl sie die Kontinuität der geschichtlichen Entwicklung betont, das paradoxe Ergebnis, Leonardo als einen späten, in seiner eigenen Zeit mehr oder weniger isolierten mittelalterlichen Geist darzustellen.

Jüngere Historiker neigen dazu, ein stärkeres Band zwischen Leonardo und seiner Epoche zu knüpfen. Sie weisen uns auf eine wissenschaftliche und technische Literatur in den Volkssprachen hin, die ich gerade erwähnt habe. Sie betonen insbesondere, daß das Sezieren des menschlichen Körpers im fünfzehnten und zu Beginn des sechzehnten Jahrhunderts ziemlich häufig war. Sie bringen auch die technischen Studien und die Zeichnungen Leonardos in Beziehung zu dem gerade damals sehr lebhaften Interesse an diesen Fragen. Es war eine in dieser Hinsicht sehr viel weiter fortgeschrittene Epoche, als man noch vor einiger Zeit annahm. Tatsächlich scheint eine große Zahl der auf Leonardos Zeichnungen dargestellten Maschinen nicht von ihm erfunden zu sein, sondern es sind geometrische Zeichnungen von Dingen, die es gab, die er sehen konnte und wahrscheinlich in seiner Umgebung gesehen hat. Andere Forscher neigen in heftiger

Daher konzentrierte sich die Kritik an Aristoteles' Dynamik stets auf das Problem *a quo moveantur projecta*? Was läßt den geworfenen Gegenstand sich bewegen? Um diese Bewegung zu erklären, machten die Pariser Nominalisten sich die Theorie des *Impetus* zu eigen, der vom Beweger auf den bewegten Körper übertragenen Kraft, einer Kraft, die im bewegten Körper bleibt, so wie die Wärme im erhitzten Körper bleibt, und so in gewisser Weise ein innerer Motor wird, der seine Wirkung auf den Körper fortsetzt, nachdem dieser sich von seinem ersten Beweger getrennt hat.

Abwehr gegen Duhems Versuch, Leonardo zu einem Menschen des Mittelalters und zu einem gelehrten Bücherwurm zu machen, dazu, ihn unmittelbar auf griechische Quellen zu beziehen: auf Archimedes, für den Leonardo in der Tat ein tiefes Interesse zeigte, und auf Euklid, dessen Methode er offensichtlich nachzuahmen versuchte. Andere wiederum akzeptieren bereitwillig die Meinung von Leonardos Zeitgenossen: *uomo senza lettere*. d. h. ohne literarische Bildung.

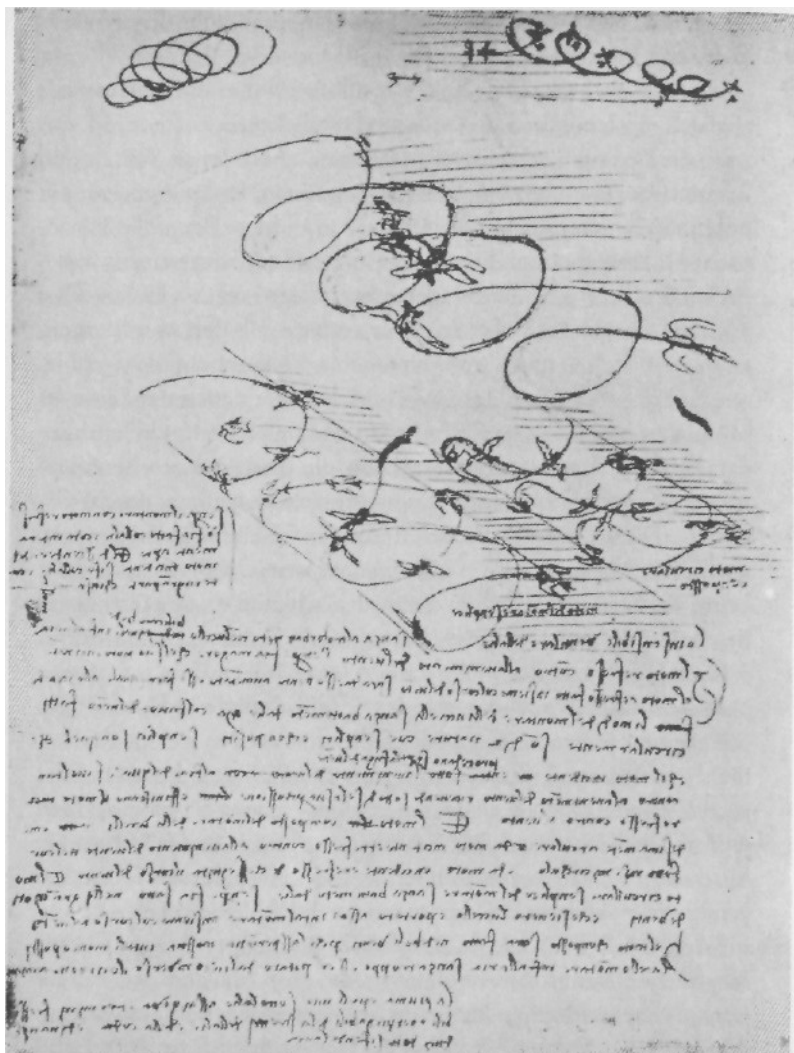
So ersetzten sie das Bild Duhems von einem Leonardo, der alles gelesen hatte und *den* jedermann las, durch das Bild eines Leonardo, der nichts gelesen hatte und den keiner las. Mir scheint, daß die Wissenschaftler unseres Jahrhunderts in ihrer Reaktion gegen Pierre Duhems Theorie zu weit gingen. Leonardo ist tatsächlich ein *uomo senza lettere*. Er sagt es uns selbst, fügt jedoch hinzu, daß seine Feinde ihn so nannten, und nimmt gegen sie die höheren Rechte der Erfahrung für sich in Anspruch. Aber was soll das überhaupt sagen? Nichts, glaube ich, außer daß er kein »homme de lettre«, kein Humanist war, daß es ihm an literarischer Bildung fehlte, daß er nie an einer Universität studierte, daß er kein Griechisch und kein Latein konnte und daß er nicht das gezielte und raffinierte Italienisch sprach, das an den Höfen der Medici oder der Sforza oder von den Mitgliedern der Akademien verwendet wurde. All das ist gewiß wahr. Seine Sprache ist in der Tat, gemäß dem letzten Herausgeber seiner Schriften, die Sprache eines toskanischen Bauern oder Handwerkers. Seine Grammatik ist nicht korrekt, seine Orthographie ist phonetisch. Kurz, das bedeutet, daß er alles selbst erlernt hat. Aber Autodidakt heißt nicht Ignorant, und *uomo senza lettere* kann man, vor allem in diesem Falle, nicht mit *ungebildete Person* übersetzen. Weil er kein Latein *schreiben* konnte, dürfen wir noch lange nicht annehmen, daß er es nicht lesen konnte. Vielleicht nicht sehr gut, aber wenn er Ovid lesen konnte, was er allem Anschein nach tat, so dürfte es ihm sehr viel weniger schwergefallen sein, ein naturwissenschaftliches Buch zu lesen - Geometrie, Optik, Physik oder Medizin, Dinge, die er vollkommen beherrschte. Wissenschaftliche Werke sind in der Tat leicht zu lesen, unter der Bedingung, daß

man mit dem Gegenstand vertraut ist. Bei literarischen Texten stößt man auf Schwierigkeiten.

Jch frage mich übrigens, ob wir, erfüllt wie wir es sind von unserer zugleich akademischen und visuellen intellektuellen Tradition, uns noch die Bedingungen vorstellen können, unter denen Wissen und Erkenntnis, zumindest eine gewisse Art davon, in den Epochen vor unserer Zeit erworben und weitergegeben wurden. Der große französische Historiker Lucien Febvre, der so viel für die Erneuerung historischer Studien in Frankreich getan hat, pflegte auf den Unterschied zwischen unserer mentalen Struktur — oder zumindest unseren mentalen Gewohnheiten, Gewohnheiten von Völkern, die *schweigend* lesen und die alles visuell lernen - und der oder denen der Leute im Mittelalter und selbst im fünfzehnten und im sechzehnten Jahrhundert Nachdruck zu legen, die *laut* lasen, die Worte aussprechen mußten und alles oder zumindest das meiste, was sie wußten, durchs *Ohr* lernten. Diese Leute, für die nicht nur der Glaube *-fides-*, sondern auch das Wissen — *scientia* — *ex auditu*, aus dem Gehörten kam, diese Leute glaubten nicht, daß sie ein Buch lesen mußten, um über etwas Bescheid zu wissen, solange es jemanden gab, der es sie mit lebendiger Stimme lehren konnte.

Daher dürfen wir all das, was der junge Leonardo in Florenz vom Hörensagen lernen konnte — die Florentiner reden ziemlich viel —, nicht verkleinern. Er hörte von Ficino und Pico und den Akten der platonischen Akademie, ohne daß er je ihre großen Folioebände öffnen mußte. Vom Hörensagen hätte er über ihre Kenntnis der Welt - eine Mischung von Platonismus und Scholastik, von Magie und Hermetik—genug lernen können, um daraus eine freie Wahl zu treffen.

Wir dürfen auch nicht die philosophischen und naturwissenschaftlichen Kenntnisse verkleinern, die er in Mailand im Kontakt (*commercium*) mit seinen Freunden Marliani, einem berühmten Arzt, der aus einer Dynastie berühmter Wissenschaftler stammte, und Luca Pacioli erwerben konnte, dem Mathematiker, Verfasser einer ungeheuren *Summa* der Arithmetik, Algebra und Geometrie, die übrigens italienisch und nicht lateinisch geschrieben ist und die



Studie zum Vogelflug

Leonardo 1494 in Padua kaufte, oder auch bei den Anhängern und Schülern des Nikolaus von Kues, von denen, wie wir heute wissen, sich einige in Mailand befanden. Sie hätten ihm, und sie haben es gewiß getan, bedeutende Texte zeigen können und ihm allerlei über die mittelalterlichen Debatten zwischen den Anhängern der reinen aristotelischen Dynamik und denen der Impetustheorie erzählen können, die Nikolaus von Kues sich ebenso zu eigen gemacht hatte wie Giovanni Marliani, der Onkel seines Freundes.

Sie hätten ihm auch von den Debatten über die Einheit oder die Vielheit der Welten berichten können, eine während des Mittelalters heiß diskutierte Frage, bei der die mittelalterlichen Philosophen, aus theologischen Gründen, um die göttliche Allmacht nicht zu beschränken, gegen Aristoteles und seine *sequaces* (Nachläufer) die These der Vielheit oder zumindest der Möglichkeit der Vielheit der Welten verteidigten, wobei sie behaupteten, daß Gott so viele Welten hätte schaffen können, wie er wollte, obwohl er in der Tat nur eine einzige geschaffen habe.

Es ist gar nicht vorstellbar, daß Leonardo nicht von diesen Dingen reden hörte, selbst wenn er die Texte nicht gelesen hat. Ich meinerseits glaube, daß das Dilemma »Bibliotheksmaus«, die wiederholt, was sie gelesen hat, oder reines Originalgenie, das alles schafft und erfindet, ein falsches Dilemma ist; ebenso falsch wie die widersprüchlichen Bilder von Leonardo als Philosoph und Wissenschaftler oder als ignoranter Praktiker. Diese beiden Bilder stammen aus einer Projektion gegenwärtig vorwiegender Bedingungen in die Vergangenheit. Wir sind in der Tat derart gewohnt, alles in der Schule zu lernen - Wissenschaften und Künste - Medizin und Recht -, daß wir leicht vergessen, daß bis ins neunzehnte Jahrhundert und sogar noch später die Techniker, Ingenieure, Architekten, Schiffs- und sogar Maschinenbauer, von Malern und Bildhauern ganz zu schweigen, nicht in Schulen unterrichtet wurden, sondern ihren Beruf vor Ort in den Werkstätten erlernten.

Wir vergessen ebenfalls oder begreifen nicht zur Genüge, daß aus allen diesen präzisen Gründen die Werkstätten eines Ghiberti, eines

Brunelleschi oder eines Verrocchio zugleich Orte waren, an denen man ungeheuer viele Dinge lernte. Ebensoviel, wenn nicht sogar mehr, als man heute in der Schule lernt: Rechnen, Perspektive - d. h. Geometrie -, Steinschnitt und Bronzeguß, Kartographie und Festungsbau, Gewölbekonstruktion und Kanalbau.

Das waren keine Ignoranten, diese in den berühmten Werkstätten unterrichteten »Ungebildeten«, und wenn ihr Wissen vor allem empirisch war, so war es keinesfalls verachtenswert. Deshalb hatte Leonardo vollkommen recht, seine durch die Erfahrung erworbenen Erkenntnisse dem Bücherwissen seiner humanistischen Gegner entgegenzusetzen. Übrigens waren diese Werkstätten, vor allem die Verrocchios, sehr viel mehr als Orte, wo eine überlieferte Fähigkeit bewahrt und gepflegt wurde. Sie waren im Gegenteil Orte, wo die alten und die neuen Probleme studiert wurden, wo neue Lösungen erörtert und ausgeführt wurden, wo man Versuche machte und wo man es kaum erwarten konnte, alles, was anderswo geschah, in Erfahrung zu bringen.

Verrocchios Werkstatt erklärt nicht das Wunder Leonardo - nichts erklärt das Wunder eines Genies. Aber immerhin prägte ihn diese Werkstatt und gab seinem Geist eine gewisse Orientierung, die ihn zur Praxis und nicht zur reinen *Theorie* zog.

Diese praktische Tendenz ist einigermaßen wichtig, um uns das Verständnis und die Würdigung des wissenschaftlichen Werkes von Leonardo da Vinci zu erlauben.

Tatsächlich ist er sehr viel mehr Ingenieur als Wissenschaftler. Ein Ingenieur als Künstler, wohlverstanden. Ähnlich Verrocchio, den George Sarton den Johannes der Täufer Leonardos genannt hat, ähnlich Alberti oder Brunelleschi: eine Gattung von Köpfen, in denen der Geist der Renaissance eine seiner besten und anziehendsten Verkörperungen findet.

Leonardo, ein Mensch der Renaissance ... Ist das nicht zu einfach? Habe ich nicht selbst den Gegensatz zwischen Leonardo und den Gelehrten und Literaten des fünfzehnten Jahrhunderts hervorgehoben? Gewiß, und ich gebe gerne zu, daß Geist und Werk Leonar-

dos die Renaissance weit überschreiten, ja, sich ihr entgegensetzen, vor allem den dem Geist der Renaissance innewohnenden mythischen und magischen Tendenzen, von denen Leonardo vollkommen frei ist.

Ich bin mir auch bewußt, daß der Begriff der Renaissance, wie klar er auch von Burckhardt oder Wölfflin bestimmt wurde, von den Gelehrten unserer Zeit einer so weitgehenden Kritik unterzogen wurde, daß sie ihn durch die Entdeckung typischer Renaissanceerscheinungen mitten im Mittelalter, und vice versa, einer großen Zahl mittelalterlichen Elemente im Denken und im Leben der Renaissance beinahe zunichte gemacht haben.

Der Begriff der Renaissance scheint mir indessen, trotz der Kritik, der man ihn unterzog, unverzichtbar. Das historische Phänomen, das er bezeichnet, besitzt eine wirkliche, wenn auch offensichtlich komplexe Einheit - aber alle historischen Phänomene sind komplex, und die identischen oder analogen Elemente bringen in verschiedenen Verbindungen oder verschiedenen Mischungen unterschiedliche Ergebnisse hervor.

Deshalb fühle ich mich zu der Behauptung berechtigt, daß Leonardo da Vinci zumindest mit einigen Zügen seiner Persönlichkeit - ein Genie, ich wiederhole es, gehört nie vollständig seiner Zeit an — ein Mensch der Renaissance ist und sogar einige ihrer bezeichnendsten und grundlegendsten Aspekte repräsentiert.

Ein Mensch der Renaissance ist er durch die kraftvolle Bestätigung seiner Persönlichkeit, durch sein universelles Denken und durch seine Neugier, durch seine unmittelbare und scharfe Wahrnehmung der *sichtbaren* Welt, sein wunderbares Raumempfinden und seinen Sinn für den dynamischen Aspekt des Seins. Man könnte sogar sagen, daß in gewisser Hinsicht in seinem Humanismus — obwohl er modern ist in seiner Ablehnung *von* Autorität und Bücherwissen - und in seiner offensichtlichen Indifferenz gegenüber der christlichen Auffassung des Universums einige der tiefsten Bestrebungen der Renaissance ihre Vollendung finden.

Aber kehren wir zu unserem Ausgangspunkt zurück. Leonardo,

sagte ich, ist ein Ingenieur als Künstler. Einer der größten ohne Zweifel die die Welt jemals gesehen hat. Er ist ein Mann der Praxis, das heißt ein Mann, der nicht Theorien, sondern Gegenstände und Maschinen konstruiert und der meistens auch entsprechend denkt. Daher stammt seine fast pragmatische Haltung gegenüber der Wissenschaft, die für ihn kein Gegenstand der Kontemplation, sondern ein Instrument zum Handeln ist.

Selbst in der Mathematik, das heißt, in der Geometrie ist seine Haltung gewöhnlich die eines Ingenieurs, obwohl wir ihm einige rein theoretische Entdeckungen verdanken, wie die Bestimmung des Gravitationszentrums der Pyramide und einige merkwürdige Theoreme über die Mönchchen (*Lunula*): Er sucht praktische Lösungen, die mittels mechanischer Instrumente in *verum naturae* ausgeführt werden können. Wenn diese Lösungen nicht immer ganz korrekt, sondern lediglich approximativ sind, so hat das für ihn keine Bedeutung, unter der Bedingung, daß sie vom Gesichtspunkt der Praxis aus der Lösung so nahe wie möglich kommen. Warum auch sollten wir uns von theoretischen Unterschieden stören lassen, wenn diese so gering sind, daß weder ein menschliches Auge noch ein Instrument sie jemals entdecken können? Daher ist die Geometrie des Leonardo da Vinci meistens dynamisch und praktisch.

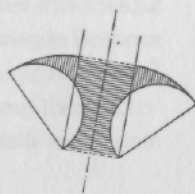
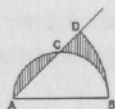
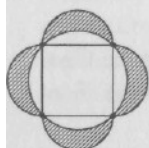
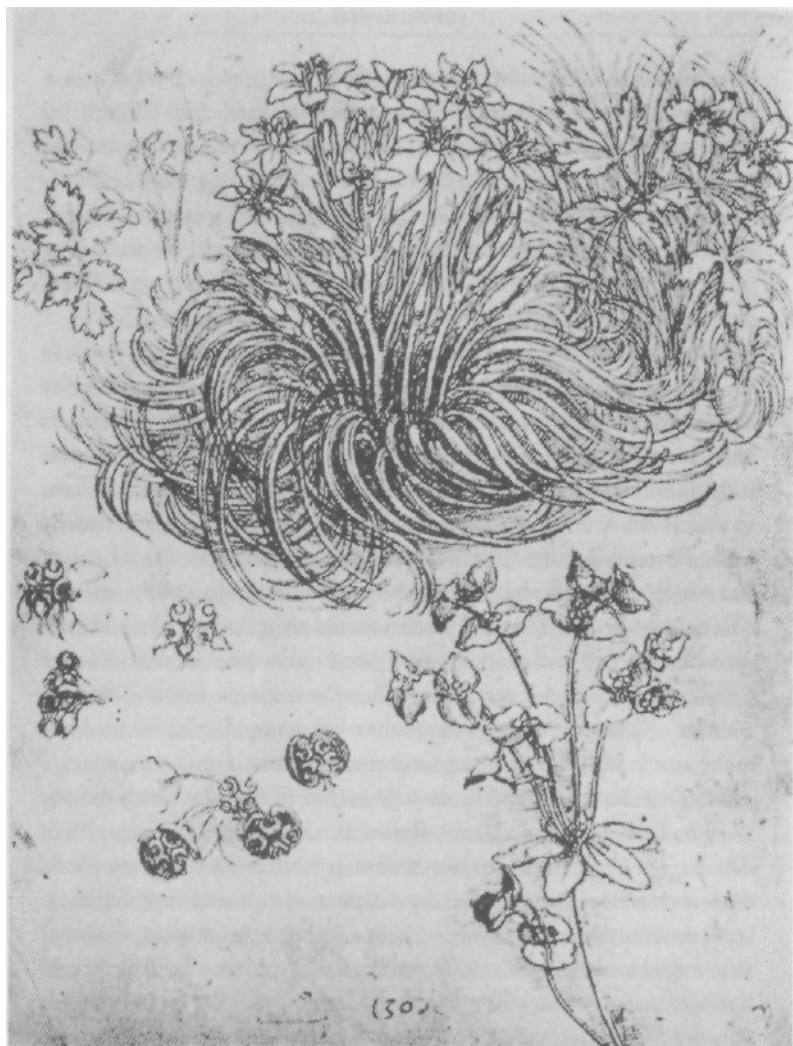
Nichts ist in dieser Hinsicht charakteristischer als seine Art, das alte Problem der Quadratur des Kreises zu behandeln oder zu lösen. Leonardo löste es, indem er den Kreis auf einer geraden Linie abrollt ... eine elegante und leichte Lösung, die nur leider nichts mit dem von den griechischen Geometern gestellten und behandelten Problem zu tun hat. Aber warum soll man, vom Gesichtspunkt der Praxis aus, nicht unorthodoxe Methoden anwenden? Warum sollten wir unsere Handlungsarten und -mittel beschränken? Warum sollte es erlaubt sein, gerade Linien und Kreise zu ziehen, aber nicht, diese Kreise auf diesen Linien abzurollen? Warum sollten wir die Existenz von Rädern ignorieren oder vergessen? Nun ist Leonardos Geometrie, wenn sie *praktischer* Art ist, doch keineswegs empirisch. Leonardo ist kein Empirist. Trotz seines tiefen Verständnisses der ent-

scheidenden Rolle und beherrschenden Bedeutung der Beobachtung und der Erfahrung für den Fortgang wissenschaftlicher Erkenntnis, oder vielleicht gerade *deswegen*, hat er nie den Wert der Theorie unterschätzt. Er setzt sie im Gegenteil über die Erfahrung, deren Hauptverdienst für ihn ja gerade darin besteht, daß sie uns erlaubt, eine gute Theorie auszuarbeiten. Ist diese Theorie einmal ausgearbeitet (eine gute, d.h. mathematische Theorie), so absorbiert sie und ersetzt sogar die Erfahrung.

In Leonardos wissenschaftlichem Werk bleibt diese Exaltation des theoretischen Denkens leider ein wenig theoretisch. Er kann sie nicht in die Praxis umsetzen; er hat nicht gelernt, abstrakt zu denken. Er besitzt eine wunderbare Gabe der Intuition, aber er kann von den instinktiv erfaßten Prinzipien aus keine korrekte Deduktion machen, so daß er das Gesetz der Beschleunigung beim Fall der Körper nicht formulieren kann, obwohl er in der Lage ist, die wahre Natur dieser Art von Bewegung zu begreifen. So ist er außerstande, das Prinzip der Gleichheit von Aktion und Reaktion als abstraktes Prinzip auszusprechen, das er in seiner Analyse konkreter Fälle — oder genauer halbkonkreter - des Zusammenstoßens von Körpern instinktiv anwendet, die er mit außerordentlicher Präzision vornimmt und die mehr als ein Jahrhundert lang unerreicht bleibt.

Es gibt indessen einen Erkenntnisbereich, in dem das anschauende Denken Leonardos kein Nachteil war: die Geometrie. Leonardo ist in der Tat ein geborener Geometer, und er besitzt im höchsten Maße die - extrem seltene - Gabe des Raumempfindens. Diese Gabe erlaubt es ihm, seinen Mangel an theoretischer Schulung zu überwinden. Er behandelt nicht nur alle möglichen Probleme der Mönchchen (*Lunula*) und der Transformation von Figuren und Körpern ineinander, die Konstruktion regelmäßiger Figuren, die Bestimmung von Schwerpunkten, erfindet Zirkel, um die Kegelschnitte zu zeichnen, sondern es gelangen ihm auch, wie ich bereits sagte, einige wirkliche Entdeckungen.

Zugleich, und das scheint mir sehr wichtig, dominiert die Geometrie bei ihm die Ingenieurwissenschaft. Deshalb ist seine Geo-



metric in den meisten Fällen die eines Ingenieurs, und umgekehrt ist seine Ingenieurwissenschaft stets die eines Geometers. Genau aus diesem Grund untersagt er denen, die keine Geometer sind, diese Kunst auszuüben und sogar zu erlernen. »Die Mechanik«, sagt er, »ist das Paradies der mathematischen Wissenschaften.« Auf dem Gebiet der Mechanik - die Bedeutung des Begriffs hat sich seit dem fünfzehnten Jahrhundert geändert -, der Wissenschaft von den Maschinen also, in dieser Wissenschaft - oder Kunst - war Leonardo, wenn es je überhaupt eines gab, ein technisches Genie und entwickelte absolut verblüffende Fähigkeiten. Was hat er nicht alles konstruiert! Kriegsmaschinen und Maschinen für den Frieden, Panzerwagen und Bagger, Waffen und Kräne, Bomben und Spinnmaschinen, Brücken und Turbinen, Drehbänke, um Schrauben herzustellen und um Linsen zu schleifen. Druckerpressen und reibungsfreie Rollen, sich selbst bewegende Fahrzeuge und Schiffe, Tauchboote und Flugmaschinen und Maschinen, um die menschliche Arbeit zu erleichtern, sie bequemer zu machen und ihre Effizienz zu steigern. Diese praktischen und nützlichen Erwägungen scheinen mir aber, offen gestanden, weder in Leonardos Denken noch in seinem Handeln eine beherrschende Rolle gespielt zu haben. Vielleicht habe ich ihn irrtümlich einen Konstrukteur von Maschinen genannt. Erfinder wäre eine genauere Bezeichnung.

Denn es ist tatsächlich überhaupt nicht erwiesen, ob er von all diesen wunderbaren Maschinen, deren Zeichnungen ungezählte Seiten seiner Handschriften bedecken, auch nur eine einzige konstruiert hat. Er scheint sehr viel mehr mit der Ausarbeitung als mit der

Links oben: Pflanzenstudie, >Stern von Bethlehem'
(Königliche Bibliothek, Windsor): Überall findet Leonardo
seine Wirbel und auch seine Lunulae wieder

Links unten: Geometrische Konstruktionen der Lunula,
Möndchen

Verwirklichung seiner Projekte beschäftigt gewesen zu sein. Und die intellektuelle Macht des menschlichen Geistes, der diese Maschinen zu konzipieren und zu erfinden fähig ist, scheint ihn sehr viel mehr interessiert zu haben als die reale Macht, die sie den Menschen verleihen würden, und als die praktischen Aufgaben, die sie ihnen zu leisten erlaubt hätten. Das vielleicht ist der tiefere Grund, weshalb er so selten Nutzen aus seinen eigenen Erfindungen und sogar aus denen anderer zu ziehen versuchte. So hat er sich zum Beispiel, im Gegensatz zu Dürer, niemals, zumindest für sich selbst, der Drucktechnik, des Kupferstichs und des Holzschnitts, der großen technischen Neuerungen seiner Zeit, bedient, obwohl er selbst die Druckerpresse erfunden und vervollkommen und selbst die Tafeln mit regelmäßigen geometrischen Körpern für die *Divina proportione* seines Freundes Luca Pacioli geschnitten hat. Wahrscheinlich sind auch aus ebendiesem Grund die Zeichnungen Leonardos, die die Vorstellungskraft des Theoretikers und nicht die Erfahrung des Praktikers verkörpern, so völlig verschieden von den technischen Werken und Sammlungen des fünfzehnten und sechzehnten Jahrhunderts. Während letztere Skizzen oder Gemälde sind, handelt es sich bei Leonardos Zeichnungen um geometrische Aufrisse, die ersten, die je gezeichnet wurden.

Während es sehr schwierig ist, die Maschinen des Mittelalters zu rekonstruieren, von denen wir lediglich die Beschreibung oder die Zeichnungen haben, ist nichts einfacher, als Leonardos Maschinen zu konstruieren, oder genauer, nichts ist einfacher, als sie heute zu konstruieren. So hat zum Beispiel Robert Guatelis eine ansehnliche Sammlung von Modellen Leonardos gebaut, die die International Business Machines Corporation (IBM) 1952 ausgestellt hat, um sie dann dem Museum in Vinci - Leonardos Geburtsort - zu stiften. Ich habe allerdings starke Zweifel, ob irgend jemand, und Leonardo selbst eingeschlossen, sie zu seiner Zeit hätte bauen können. Das vermindert um nichts die Größe von Leonardos Genie, läßt es aber in seinem wirklichen Licht erscheinen: Er war viel eher Technologe als Techniker.

Der Ingenieur Leonardo ist gewiß einer der größten Technologen

aller Zeiten. Aber wie steht es mit dem Physiker? Die modernen Historiker haben, in wohlbegründeter Reaktion gegen die Übertreibungen ihrer Vorgänger, darauf hingewiesen, daß seine Äußerungen oft ungenau und ziemlich häufig widersprüchlich sind: Seine Technologie ermangelt der Präzision, sein Begriff der *Forza* - der bewegenden Kraft als Ursache der Bewegung freier Körper - ist mythisch oder poetisch. Er definiert oder beschreibt sie in der Tat als die einzige Wesenheit in dieser Welt, wo alles im Sein zu beharren strebt, die im Gegenteil zu ihrer Vernichtung und ihrem Tod tendiert. Sein Begriff der Schwerkraft (Schwere), der manchmal als Ursache und manchmal als Folge der Bewegung dargestellt wird, ist inkonsistent. Auch unterstreichen die Historiker Leonardos Schwankungen in seiner Auffassung vom Grad der Beschleunigung beim (freien) Fall der Körper, der in einigen Passagen proportional zu dem vom Körper durchquerten Raum (der Flugbahn) und in anderen proportional zu der während des Flugs verstrichenen Zeit ist.

Alles das ist ganz richtig. Wir dürfen indessen nicht vergessen, daß diese Begriffe und Fragen schwierig sind und daß zum Beispiel die Beschleunigung im Verhältnis zum Raum leicht mit der im Verhältnis zur Zeit verwechselt werden konnte, so leicht, daß diese Konfusion bis zu Galilei und Descartes fort dauerte, denen sie auch unterlief und die sich schwer darin taten, diese zweideutigen Begriffe auseinanderzuhalten.

Wir dürfen ebensowenig vergessen, daß Leonardo Schriften über einen langen Zeitraum hinweg schrieb, so daß wir nicht genau wissen, wann dieser oder jener Text entstand. Es ist durchaus möglich, daß die Widersprüche und Schwankungen nicht aus Inkonsistenz herrühren, sondern aus einer Entwicklung, einem Wandel und Fortschritt seines Denkens. Warum sollen wir ihm nicht zugute halten - ich meinerseits halte das für sehr wahrscheinlich -, daß Leonardo zu Beginn verworren gedacht hat - das Denken beginnt immer so - und sich fortschreitend einen Weg zur Klarheit bahnte? Wäre es so, dann ergäbe sich ein ganz anderes Bild. Wir müßten dann Leonardo das Verdienst zuschreiben, die wahre Struktur der Beschleunigung bei

der Fallbewegung schwerer Körper erfaßt zu haben, obwohl er, wie ich schon erwähnte, nicht in der Lage war, seine Intuition in mathematischen Begriffen auszudrücken und daraus das genaue Verhältnis zwischen der verstrichenen Zeit und dem durchmessenen Raum bei einer solchen Bewegung abzuleiten. Selbst in diesem Fall also könnte seine Intuition sogar grundlegend richtig gewesen sein.

Ich meinerseits bin dieser Ansicht. Aber es ist schwierig, das zu beweisen, denn Leonardos Terminologie ist tatsächlich äußerst vage und inkonsistent - es ist die Terminologie eines *uomo senza lettere*. Er erklärt zum Beispiel, daß der von einem Körper im Fall durchmessene Raum nach Art einer Pyramide zunehme, aber er spezifiziert nicht, worauf er sich bezieht: die Kante, den Inhalt oder den Schnitt der Pyramide. Es ist in der Tat zu bedauern, daß Leonardo nicht, wie Duhem es wollte, ein Schüler der Pariser Nominalisten war. Dann nämlich hätte ihm eine präzise und subtile Terminologie zur Verfügung gestanden, und es wäre mir ein leichtes gewesen, genau darzulegen, was er unter dieser Behauptung verstand. Leider war er nicht ihr Nachfolger, ebensowenig wie er Galileis Vorgänger war, von dem ihn seine Auffassung von *Forza* und *Impetus*, die innere Ursache der Bewegung, trennt - eine Auffassung, von der Galilei sich zugleich mit der Befreiung der Physik befreit hat, indem er diese Konzeption durch die der *Inertia*, der Trägheit, ersetzte.

Trotz seiner Verspätung auf theoretischem Gebiet ist es für einen Philosophen oder Wissenschaftshistoriker hochinteressant, Leonardo als Physiker zu studieren.

Der Historiker muß zugestehen, daß Leonardo, obwohl er das Trägheitsprinzip nicht kannte, darum nicht weniger die Tatsachen benannt hat, die es für uns in aller Evidenz impliziert und die übrigens erst wieder nach der Entdeckung dieses Prinzips durch Galilei benannt wurden. Leonardo war mithin der einzige, und für mehr als ein Jahrhundert, der im Gegensatz zur Meinung der Theoretiker und der Praktiker - der Feuerwerker und der Kanoniere - behauptete, daß die Flugbahn einer Kanonenkugel eine kontinuierliche Kurve ist und nicht, wie man glaubte, eine Linie, die sich aus zwei durch einen

Kreisbogen miteinander verbundenen Geraden zusammensetzt. Um auf den schon erwähnten Fall seines Studiums des Zusammenpralls zurückzukommen, so war er der erste und übrigens über nahezu hundertfünfzig Jahre hinweg der einzige, der nicht nur für zwei gleiche Objekte, die aufeinanderprallen, das allgemeine Gesetz von der Gleichheit der Geschwindigkeit nach dem Zusammenstoß sowie der von Einfall- und Brechungswinkel aufstellte, sondern der auch bewies, daß zwei gleiche Körper, die sich mit verschiedenen Geschwindigkeiten aufeinander zu bewegen, diese Geschwindigkeiten nach einem Zusammenprall austauschen. Die Philosophen mögen die seltsame Fähigkeit bewundern und analysieren, die es Leonardo erlaubt hat, zu solchen Schlußfolgerungen zu gelangen, ohne die Voraussetzungen, auf die sie sich gründen, zu kennen.

All dies vor Augen, können wir bei näherer Untersuchung entdecken, daß nicht nur der Physiker, sondern auch seine Physik interessanter sind, als man noch vor kurzer Zeit annahm, daß diese Physik gerade in ihrer Unvollkommenheit und Schwäche zumindest ihren Intentionen nach origineller ist, als es auf den ersten Blick schien.

Mit ihrem Zögern, ihren Widersprüchen und ihren Inkonsistenzen scheinen Leonardos Texte eine beharrliche Anstrengung zu offenbaren, die Physik zu reformieren, indem man sie zugleich dynamisiert und mathematisiert. So könnte der dialektische Charakter seiner Auffassung der *Forza* als Versuch gedeutet werden, die Idee der physikalischen Ursache selbst zu verwandeln, indem man die Wirkursache (*causa efficiens*) und die Zweckursache (*causa finalis*) im Begriff der Kraft verschmelzen läßt, die in der Wirkung, die sie hervorbringt und in der sie sich vollendet, zu verschwinden strebt. Vielleicht sind auch die Schwankungen in der Auffassung der Schwerkraft - Quelle und Wirkung der Bewegung - nur als Folge der Bemühungen zu verstehen, diesen Begriff zu »dynamisieren« und Statik und Dynamik zu verschmelzen, indem man die potentielle Energie eines schweren Körpers und die, die er in und durch seine Fallbewegung erhält, einander annähert.

Die Tendenz, die Physik zu mathematisieren, bekundet sich, abge-

sehen von dem ergebnislosen Versuch, das Gesetz der Beschleunigung des Falles abzuleiten, und von seinem Erfolg bei der Analyse der Gesetze des Zusammenpralls, in seinem tiefen Interesse für Archimedes, den er wiederholt zitiert und dessen Schriften er sein ganzes Leben lang studierte. Und sie äußert sich womöglich noch stärker in seiner Auffassung der physikalischen Wissenschaft im allgemeinen, für welche die Euklidische Geometrie offensichtlich das Vorbild lieferte.

Die Physik müßte gemäß Leonardo mit einer Anzahl von Prinzipien und ersten Lehrsätzen beginnen, welche die Grundlage weiterer Entwicklungen lieferten. Ein wunderbares Ideal, in der Tat, das aber Ideal bleibt.

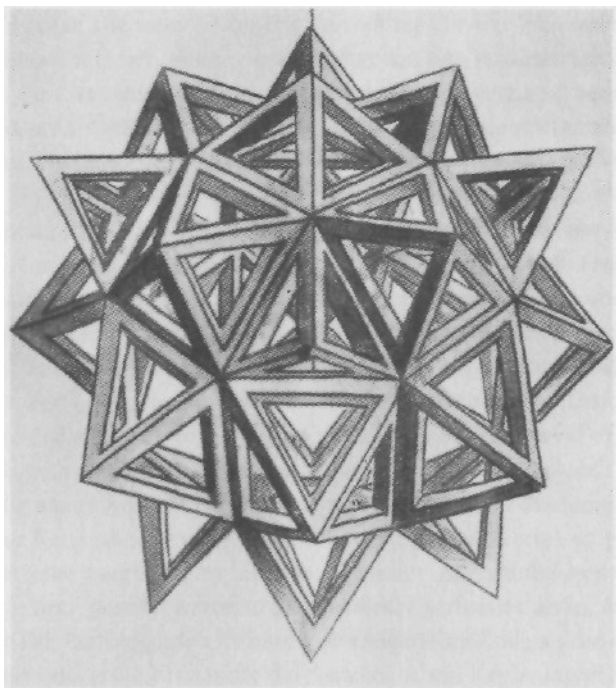
Leonardos Leistungen auf dem Gebiet der Naturkunde, der Geologie, der Botanik und der Anatomie müssen an dieser Stelle nicht extra hervorgehoben werden, denn sie sind viel besser bekannt und unbestritten. Aber man kann nicht umhin, die Präzision und die künstlerische Qualität seiner Zeichnungen zu bewundern, seinen durchdringenden Blick und die, Vesalius oft überlegene, ingeniöse Technik. Allerdings muß ich betonen, daß sein gesamtes anatomisches Werk sich auf ein sehr präzise bestimmtes Ziel richtet: die innere mechanische Struktur des menschlichen Körpers zu *entdecken*, um sie der unmittelbaren Beobachtung, das heißt, dem *Auge* zugänglich zu machen.

Damit stehen wir vor der Frage nach der relativen Bedeutung und dem Verhältnis von Sehen und Hören, *visus* und *auditus*, als Quellen und Organe des Wissens und der Erkenntnis zu verschiedenen Zeiten und in verschiedenen Kulturen.

Mir scheint, daß durch Leonardo und mit ihm, vielleicht zum erstenmal in der Geschichte, *auditus* auf den zweiten Platz verwiesen ist, während *visus* die erste Stelle einnimmt. Die Tatsache, daß *auditus* in den zweiten Rang geschoben wird, bedeutet im Bereich der Künste die Erhebung der Malerei auf den Gipfel der Hierarchie, die sie untereinander bilden. Und das, wie Leonardo uns sorgfältig erklärt, weil die Malerei die einzige Kunst ist, die zur *Wahrheit* fähig ist, das heißt,

die allein in der Lage ist, uns die Dinge so zu zeigen, wie sie sind. Im Bereich der Erkenntnis und der Wissenschaft bedeutet das etwas anderes, viel Wichtigeres, nämlich das Ersetzen von *fides* (Glauben) und *traditio* (Überlieferung) des Wissens der anderen durch das *Sehen* und die *Einsicht*, die persönlich, frei und ohne Zwang sind.

Leonardo da Vinci hat die Wissenschaft, von der er träumte, nicht entwickelt. Er hätte es auch nicht tun können. Es war zu früh, und er hatte sehr wenig Einfluß auf das wissenschaftliche Denken seiner Zeitgenossen und seiner unmittelbaren Nachfolger. Das ändert nichts an seiner Stellung in der Geschichte des menschlichen Den-



Polyeder (ausgehöhlt), Federzeichnung Leonardos in einer Handschrift der *Divina Proportione* von Luca Pacioli (Stadt- und Universitätsbibliothek Genf)

kens: Ihm ist es zu verdanken, daß aus *Technik*, wie wir gesehen haben, Technologie *wurde* und der menschliche Geist sich zu einem Ideal der Erkenntnis erhob, das ein Jahrhundert später Galilei und seine Freunde, die Mitglieder der *Accademia äei Linea* inspirierte, die Autorität und Überlieferung verwarfen und die Dinge so *selten* wollten, wie sie sind.

Der Beitrag der Renaissance zur wissenschaftlichen Entwicklung

Vom Beitrag der Renaissance zur wissenschaftlichen Entwicklung zu sprechen scheint ein paradoxes, ja aussichtsloses Unterfangen. Denn war auch die Renaissance eine außerordentlich vielgestaltige, fruchtbare Epoche, die unsere bildliche Vorstellung von der Welt unermesslich bereichert hat, eines war sie nicht: von der Wissenschaft inspiriert. Das ist heute weithin anerkannt. Die zu Recht so benannte *renaissance des lettres et des arts* bezeichnet keineswegs ein wissenschaftliches, sondern ein rhetorisches Ideal. Und es ist geradezu typisch, daß die große Reform der Logik, die die Epoche unternahm - ich denke an die Logik des Ramus -, den Versuch darstellte, die klassische Kunst des Beweisens durch eine Überredungskunst zu ersetzen.

Ganz offenbar ist es der große Künstler, der das Milieu und den Geist der Renaissance am besten verkörpert - jedoch auch und vielleicht in besonderem Maße der Schriftsteller. Er ist der treibende Geist, der Verkünder, das Sprachrohr: der Federführende. Dazu zählen auch die Gelehrten. Doch, um mit Brehier zu sprechen: Der Geist der Gelehrsamkeit ist keineswegs schon der der Wissenschaft.

Wir wissen heute, und das ist sehr wichtig, daß der kritische Geist in der Renaissance einen selten schwachen Stand hatte; da gibt es kaum eine vergleichbare Epoche. Finsterer Aberglaube herrschte; Magie und Hexerei waren ungleich stärker verbreitet als im Mittelalter. Die Astrologie spielte eine sehr viel größere Rolle als die Astronomie - die arme Verwandte der Astrologie, wie Kepler sagte: Astrologen bekleideten öffentliche Ämter in den Städten und an den Höfen. Und es sind nicht die Prachtbände aus den venezianischen Druckereien, in denen die Klassiker übersetzt sind, womit die Buch-

handler die großen Erfolge machen; es sind die dämonologischen Werke, die Zauberbücher; Hieronymus Cardanus und später Giambattista Porta sind die großen Autoren, die überall gelesen werden.

Diesen Geisteszustand zu erklären wäre eine komplizierte Sache, die ich hier nicht angehen will. Soziologische ebenso wie historische Faktoren sind dabei zu berücksichtigen; so etwa die Tatsache der Wiedergewinnung der antiken, griechischen und lateinischen Literatur und deren Verbreitung; der Respekt, den noch die größten Albernheiten den Schriftstellern und Gelehrten der Renaissance einflößten, sobald man sie in klassischen Texten fand.

Ich denke noch an etwas anderes. Es ist die aristotelische Synthese, die aus philosophischer und wissenschaftlicher Sicht als Feind der Renaissance zu betrachten ist. So gesehen wäre deren Großtat die Zerstörung eben dieser Synthesis gewesen. Nun erscheinen mir die besagte Leichtgläubigkeit, der Aberglaube etc. als unmittelbare Folgen dieser Zerstörung. Und in der Tat stand man nach der Zerstörung der aristotelischen Physik, Metaphysik und Ontologie plötzlich ohne da, ohne Ontologie, ohne Physik; ob irgend etwas möglich wäre oder nicht, Heß sich vorab nicht mehr entscheiden.

In unserem Denken, so scheint mir, bestimmt aber jederzeit das Mögliche das Wirkliche. Das Wirkliche ist nichts als der Rückstand des Möglichen und im Rahmen dessen, was nicht unmöglich ist, zu orten oder zu finden. Die aristotelische Ontologie kannte eine Unzahl unmöglicher Sachverhalte, also solcher, deren Falschheit von vornherein feststand. Ist diese Ontologie einmal zerstört, so gibt es ohne eine neue, wie sie erst im 17. Jahrhundert erarbeitet wurde, kein Kriterium mehr, das es erlaubt, über die Wahrheit oder Falschheit eines Berichtes zu entscheiden, den man von dieser oder jener »Tatsache« erhält.

Leichtgläubige Wesen sind wir Menschen von Natur aus; glauben gern dem Zeugnis, wenn es aus der Ferne, auch der zeitlichen, zu uns kommt; ebenso üblich ist es, ehrbaren und respektablen, vertrauenerweckenden Leuten Glauben zu schenken. Und vom Zeugnis her gesehen steht nichts so fest wie die Existenz des Teufels und der

Zauberei. Solange man nicht weiß, daß das Treiben der Zauberei und der Magie Unfug ist, hat man keinen Grund, diese Tatsachen zu bezweifeln.

Durch die bloße Zerstörung der mittelalterlichen Ontologie sah sich die Renaissance zurückgeworfen auf eine magische Weltanschauung, deren Einfluß überall spürbar wird. Die großen Systeme, die großen synthetisch-philosophischen Versuche der Epoche, diejenigen Marsilio Rcinos, Bernardino Telesios, selbst der Campanellas, gründen allesamt in einer magischen Seinslehre. Selbst jene, die gleichsam verpflichtet gewesen wären, die aristotelische Seinslehre zu verteidigen, die Averroisten und die paduanischen Alexandristen, waren vom Zeitgeist infiziert; sowohl bei Agostino Nifo wie bei Pietro Pomponazzi findet sich die gleiche magische Ontologie, der gleiche Glaube an dämonische Mächte.

Alles ist möglich: so, meine ich, läßt sich die Mentalität der Renaissance auf den Begriff bringen. Es geht nur um die Frage, ob dazu übernatürliche Kräfte erforderlich sind oder nicht. Ob man Nifo glaubt, dessen umfangreiche Dämonologie, ein gewichtiger Band, enormen Erfolg hatte - oder ob man das Einwirken übernatürlicher Kräfte abstreitet und sagt, alles sei natürlich, und selbst die Wunder aus natürlichen Wirkungen erklärt. Solche magische Naturalisierung des Wunderbaren macht den sogenannten »Naturalismus« der Renaissance aus.

Soviel zur Kehrseite der Medaille. Wenden wir uns der anderen Seite zu, der grenzenlosen Neugier, der Scharfsicht, dem Abenteuergeist; sie lenkten die Schiffe zu großer Fahrt, sie leiteten die Gelehrten zu ihren großen beschreibenden Werken an. Die Entdeckung Amerikas, die Umseglung Afrikas, ja der ganzen Welt vermehrten die faktischen Kenntnisse in unerhörtem Maße und nährten zugleich die Neugier nach weiteren, nach dem Reichtum der Welt, der Vielfalt und Vielzahl der Dinge. Auf allen Gebieten, wo das Anlegen einer Sammlung, die Akkumulation von Wissen ausreichte und wo es keiner Theorie bedurfte, hat das 16. Jahrhundert wahre Wunder vollbracht.

Nichts ist prächtiger als etwa die Sammlungen botanischer Zeichnungen, die Blatt für Blatt unübertrefflichen Scharfblick offenbaren. Denken wir an Dürers Zeichnungen, Conrad Gessners Sammlungen, Aldrovandis große Enzyklopädie, in der übrigens allenthalben von der magischen Macht und Wirkung der Pflanzen berichtet wird. Doch mangelt es an Klassifikationskriterien, um die versammelten Tatsachen auf vernünftige Weise ordnen zu können. Letztlich verbleibt man im Stadium bloßer Katalogisierung. Aber man akkumuliert: Es entstehen Sammlungen von Mineralien und anderen Gegenständen, Anthologien, man gründet botanische Gärten. Die »Wunder der Natur« genießen größtes Interesse, die Anschauung der Vielfalt, die *varietas rerum*.

Ebenso verhält es sich mit den Reisen, mit der Geographie, mit der Beschreibung und der Analyse des menschlichen Körpers. Seziert wird er lange vor Leonardo da Vinci; der aber wagt es als erster, Zeichnungen anzufertigen, bringt alle an mehreren anatomischen Objekten beobachteten Details auf einem einzigen Blatt unter. Mehr als fünfzig Jahre später erscheint das große Werk des Andreas Vesalius, *De fabrica corporis humani*, im gleichen, doppelt denkwürdigen Jahre 1543 auch das Hauptwerk des Kopernikus, *De revolutionibus orbium coelestium*.

Auch der Trieb zur Gelehrsamkeit zeugt Früchte, ganz gleich wie — möglicherweise unfreiwillig - sie zustande kommen mögen. Die zum Teil zuvor gar nicht oder kaum bekannten wissenschaftlichen Texte der griechischen Antike werden erstmalig oder erneut übersetzt und verlegt. Erst im 15. Jahrhundert wird Ptolemäus tatsächlich vollständig ins Lateinische übersetzt; von dem Studium seines Werks her aber vollzog sich, wie wir wissen, die astronomische Reform. Auch die großen griechischen Mathematiker werden im Lauf des 16. Jahrhunderts übersetzt und verlegt: vor allem Archimedes, dann auch Apollonius, Pappus und Heron der Mechaniker. Im Jahre 1575 versucht Maurolico die verschollenen Bücher des Apollonius zu rekonstruieren. Ein Unternehmen, das am Ende des 16. und zu Beginn des 17. Jahrhunderts, bis zu Fermat, eines der dringlichsten Bestreben der

großen Mathematiker sein wird. Wie aber die Wiederaneignung der archimedischen Lehre der wissenschaftlichen Revolution des 17. Jahrhunderts zugrunde liegt, so ermöglichte allein das Eindringen in die Bücher des Apollonius über die Kegelschnitte Keplers astronomische Revolution.

Gehen wir nun zur wissenschaftlichen Entwicklung im engeren Sinne über, so muß man wohl sagen, daß sich diese für den erwachenden Geist eher am Rande vollzog, am Rande des Geschehens der eigentlichen Renaissance. Richtig ist allerdings, daß die Zerstörung der aristotelischen Synthesis die vorgängige, notwendige Basis dieser Entwicklung bildet.

Brehier hat uns daran erinnert, daß in der aristotelischen Synthesis die Welt einen wohlgeordneten stofflichen Kosmos bildet, in dem sich jedes Ding an seinem Platz befindet; so steht insbesondere die Erde kraft der diesem Universum eigenen Struktur im Zentrum desselben. Sollte die heliozentrische Astronomie ihren Aufschwung nehmen, so mußte zuerst dieses Weltbild zerstört werden.

Ich kann jetzt nicht die Geschichte des astronomischen Denkens nachzeichnen, möchte aber doch die Tatsache hervorheben, daß es die Philosophen waren, die die Bewegung einleiteten. Nikolaus von Kues eröffnete die Zerstörungsarbeit an der kosmologischen Ordnung, indem er die Wirklichkeit der Erde und des Himmels auf ein und dieselbe ontologische Ebene stellte. Die Erde, so der Cusaner, ist *Stella nobilis*, ein edler Stern; dies aber, verbunden mit der Behauptung der Unendlichkeit bzw. der unbestimmten Ausdehnung des Alls, löst den Denkprozeß aus, der schließlich in die neue Ontologie mündet, in die Geometrisierung des Raumes und die Auflösung der hierarchischen Synthesis.

In der aristotelischen Physik und Kosmologie ist es, mit etwas moderneren Worten gesprochen, die Struktur des physikalischen Raumes, die den Ort der in ihr befindlichen Objekte bestimmt. Aufgrund ihrer Natur, weil sie schwer ist, befindet sich die Erde im Zentrum der Welt. Die schweren Körper streben dem Zentrum zu, nicht weil dort

irgend etwas ist, weil irgendeine Kraft sie dorthin zieht, sondern weil ihre Natur sie dorthin treibt. Und gäbe es die Erde nicht oder wäre sie zerstört und nur ein kleiner Brocken wäre der Vernichtung entgangen, so würde dieser sich doch wie von selbst im Zentrum einfinden, als dem ihm einzig gehörigen »Ort«. Für die Astronomie bedeutet dies, daß die Struktur des physikalischen Raumes sowie die Eigenatur der Gestirne deren Ort und Bewegung bestimmen. Genau die umgekehrte Vorstellung kommt in den verschiedenen astronomischen Systemen, die gegen die aristotelische Auffassung antreten, zutage: Der kosmologische Gesichtspunkt wird allmählich von einem physikalischen abgelöst.

Wenn die schweren Körper, so Kopernikus, sich zur Erde hinbewegen, so nicht, weil sie aufs Zentrum, d. h., auf einen bestimmten Ort im Universum zugehen, sondern einfach deshalb, weil sie zur Erde zurückwollen. In der kopernikanischen Argumentation wird somit eine *physische* Realität oder Verknüpfung an die Stelle einer metaphysischen gesetzt, eine *physische* Kraft anstelle einer kosmischen Struktur. Worin auch immer vom physikalischen oder mechanischen Standpunkt aus die Unvollkommenheit der kopernikanischen Astronomie bestehen mag - sie hat die physikalische Beschaffenheit der Erde mit jener der Himmelskörper identifiziert, indem sie beide mit der gleichen Kreisbewegung versah. Auf solche Weise hat sie die sublunare und supralunare Welt einander angeglichen und damit den ersten Schritt auf jenem Weg vollzogen, der zur Identifikation der »Materien« oder Wesenheiten führt, die das Universum ausmachen, zur Zerstörung des hierarchischen Gefüges, das die aristotelische Welt beherrschte.

Die zwei Jahrhunderte währende Auseinandersetzung zwischen der ptolemäischen und der kopernikanischen Konzeption von Astronomie und Physik läßt sich hier nicht wiedergeben. Auf beiden Seiten wurden Argumente vorgebracht, die zwar keineswegs zu vernachlässigen, im Grunde aber doch nicht sehr stark waren; uns interessiert jedoch weniger die Entwicklung der Astronomie als solcher als vielmehr die fortschreitende Vereinheitlichung des Universums, die

Ersetzung des hierarchisch aufgebauten aristotelischen Kosmos durch ein Universum, das von *einer* Gesetzmäßigkeit durcherrscht wird.

Den zweiten Schritt zu dieser Vereinheitlichung tut Tycho Brahe, der zwar - aus sehr triftigen physikalischen Gründen - die geozentrische Position verfochten, aber etwas gänzlich Neues zur Astronomie und Wissenschaft überhaupt beigetragen hat, nämlich einen Sinn für Präzision: Präzision in der Beobachtung des Sachverhalts und in der Messung, Präzision in der Herstellung der zur Beobachtung dienenden Meßinstrumente. Das ist zwar noch nicht der Sinn fürs Experiment; immerhin aber wird hier der Sinn für Präzision in die Erkenntnis des Universums eingeführt. Tychos präzise Beobachtungen liegen der Arbeit Keplers zugrunde. Wenn uns der Herr, so Kepler, einen solchen Beobachter wie Tycho Brahe gesandt, so haben wir nicht das Recht, eine Differenz von acht Sekunden zwischen seinen Beobachtungen und der Berechnung zu vernachlässigen. Laut Kepler war es Tycho, der definitiv mit der Vorstellung brach, die Planeten würden *von orbibus coelestibus* getragen, welche die Erde bzw. Sonne umschlossen. Seinen Nachfolgern hat er damit die Frage nach den physikalischen Ursachen der Himmelsbewegungen aufgegeben, auch wenn er selbst sich diesem Problem nicht gestellt hat.

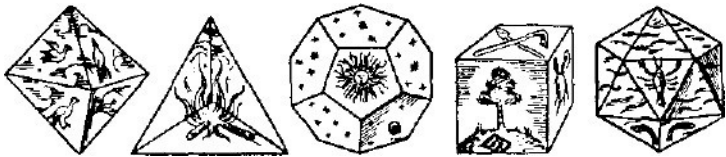
Auch das großartige Werk Keplers kann hier nicht dargestellt werden, ein zugleich konfuse und geniales Werk, das im Feld der Wissenschaft den Geist der Renaissance vielleicht am besten wiedergibt, ist es auch zeitlich dieser schon entwachsen; die großen Hauptwerke Keplers gehören nämlich schon ins 17. Jahrhundert: die *Astronomia nova sive physica coelestis* erscheint 1609, die *Epitome Astronomiae Copernicanae* 1618-1621.

Das radikal Neue des Keplerschen Weltbilds ist die Idee der einen und selben, und zwar ihrem Wesen nach streng mathematischen Gesetze, die das Universum in all seinen Bereichen beherrschen. Zwar ist ein All in bezug auf die Sonne hierarchisch aufgebaut und vom Schöpfer harmonisch angeordnet, der sich dergestalt in einem allumfassenden Symbol ausdrückt; bei der Erschaffung der Welt aber folgt

Gott einer Regel, die strikt mathematischen und geometrischen Überlegungen entspricht.

Beim Studium der fünf regelmäßigen platonischen Körper kam er auf die Idee, daß deren Gesamtheit das Modell abgebe, nach welchem Gott die Welt erschaffen; und daß die Abstände der Planeten von der Sonne sich nach den Möglichkeiten richten müßten, diese regelmäßigen Körper ineinander zu verschachteln *.

Kepler ist eine janusköpfige Erscheinung: In seinem Werk finden



Die fünf platonischen Körper nach Johannes Kepler,
Harmonices Mundi, Frankfurt 1619, 11. Buch, XXV. Satz. Die
Zeichnungen zeigen Oktaeder, Tetraeder, Dodekaeder,
Hexaeder und Ikosaeder.

Anm. d. Übers.: Piaton hat im *Timaios* aus den zwei -schönsten" rechtwinkligen Dreiecken, deren eine Kathete *halb* so groß wie die Hypotenuse bzw. wie die andere Kathete ist, die gesamte Geometrie der Weltkörper abgeleitet- *Sechs* der ersten Dreiecke bilden das *gleichseitige* Dreieck, aus dem der regelmäßige Vierflächner (*Tetraeder*), der Achtflächner (*Oktaeder*) und der Zwanzigflächner (*Ikosaeder*) gebildet werden. *Vier* Exemplare des zweiten Dreiecks ergeben das *Quadrat*, aus dem er den Würfel den Sechsfächner (*Hexaeder*), bildet. Abschließend wird aus dem regelmäßigen *Fünfeck* (*Pentagon*) das zwölfblächige *Dodekaeder* rekonstruiert. Das *Tetraeder* gilt Piaton als die Grundform des *feurigen*, das *Oktaeder* als die des *luftigen*, das *Ikosaeder* als die des *wäßrigen* Elements, das *Hexaeder* als die Grundform des *irdische*» Stoffes, das *Dodekaeder* aber als die Grundform, die für das *Wehganze* entsteht. Nach solcher Maßgabe geht nun Kepler folgendermaßen vor; Dem ersten Körper wird eine Kugel einbeschrieben, deren Oberfläche sämtliche Flächen desselben tangential berührt; dann wird dieser Körper von einer weiteren Kugel umschlossen, auf welcher sich alle Ecken oder Außenkanten des Körpers befinden. Um diese zweite Kugel wird der zweite platonische Körper eingezeichnet: Diesem ist sie hiernach ebenso einbeschrieben wie die erste Kugel dem ersten Körper. Um eine den zweiten Körper umschließende dritte Kugel wird in gleicher Weise der dritte platonische Körper eingezeichnet ist. Aus den Maß Verhältnissen der so erhaltenen fünf Kugelradien ergeben sich annähernd die Planeten abstände ...

wir den ganz entscheidenden Übergang von einer noch animistischen zu einer mechanischen Weltauffassung. Im *Mysterium Cosmographicum* erklärt Kepler die Bewegung der Planeten noch durch die Kraft der Seelen, die sie treiben und lenken; in der *Epitome* aber erklärt er schließlich, daß man nicht auf Seelen zurückzugreifen brauche, wo doch die Wirkung materieller oder quasimaterieller Kräfte wie die des Lichts oder des Magnetismus eine ausreichende Erklärung böten; der Mechanismus aber genüge schon, weil die Planetenbewegung ja nach streng mathematischen Gesetzen erfolge.

Da Kepler überdies die Ungleichförmigkeit der Planetenbewegung, d. h., die periodischen Schwankungen, denen die Geschwindigkeiten jener in Zeit und Raum unterworfen sind, entdeckt hat, mußte er sich dem Problem der physikalischen Ursachen stellen, die solche Bewegungen hervorbrachten. Von daher mußte er, wenn gleich auf noch unvollkommene Weise, als erster eine Anziehungskraft unterstellen. Diese ist zwar nicht universell, reicht aber gleichwohl weit genug, um die Weltkörper an die Sonne binden zu können.

Die richtigen Gesetze der Planetenbewegung zu entdecken hat Kepler wohl vermocht, nicht aber, jene der Bewegung selbst zu formulieren. Denn es ist ihm nicht gelungen, die Geometrisierung des Raumes weit genug voranzutreiben — übrigens ein extrem schwieriges Unterfangen —, um auf diesem Wege zu dem neuen Bewegungsbegriff zu gelangen. In dieser Frage blieb er ein guter Aristoteliker. Die Ruhe bedarf ihm keiner Erklärung, im Gegensatz zur Bewegung, die der Erklärung durch eine Kraft bedarf. Aus diesem Grunde dringt er nicht zur Erfassung des Trägheitsprinzips vor. In seiner Mechanik, wie in der aristotelischen, bewirken die bewegenden Kräfte Geschwindigkeiten, keine Beschleunigungen; die Beharrlichkeit der Bewegung verlangt die beharrliche Aktivität eines Bewegers.

Keplers Scheitern erklärt sich vermutlich aus der Tatsache, daß er, dessen Denken doch von der Idee einer wohlgeordneten Welt beherrscht wird, die eines unendlichen Universums nicht annehmen kann. Nichts ist in dieser Hinsicht bezeichnender als seine Kritik an den Einsichten Giordano Brunos. Bruno, soviel steht fest, ist kein

Mann der Wissenschaft, er ist ein miserabler Mathematiker; stellt er eine Berechnung an, so kann man sicher sein, daß sie falsch ausfällt. Die Geometrie wollte er reformieren, indem er das atomistische Konzept der *minima* einführte. Und doch begriff er, weil er Philosoph war, daß die kopernikanische Reform der Astronomie verlangte, die Vorstellung eines strukturierten und hierarchisch geordneten Universums vollständig und endgültig aufzugeben. Und so verkündete er mit beispielloser Kühnheit die Vorstellung eines unendlichen Alls. Obgleich er kein Mathematiker ist und die wahre Physik, jene des Archimedes, nicht kennt und somit nicht zum Begriff einer sich im nunmehr unendlichen Raum aus sich heraus fortsetzenden Bewegung vorzudringen vermag, gelingt es ihm, jene Geometrisierung des Raumes und unendliche Expansion des Universums als Prinzip zu behaupten, ein Gedanke, der der wissenschaftlichen Revolution des 17. Jahrhunderts, der Grundlegung der klassischen Naturwissenschaft als unverzichtbare Prämisse zugrunde liegt.

Sehen wir zu, auf welch eigentümliche Weise Kepler sich gegen diese Auffassung zur Wehr setzt. Wohl ist Keplers Welt sehr viel weiter als die der aristotelischen Kosmologie, auch als die der kopernikanischen Astronomie. Doch sie ist noch begrenzt durch das Himmelsgewölbe, das den gewaltigen Hohlraum umschließt, den unser Sonnensystem besetzt. Über dieses hinaus läßt Kepler keine räumliche Ausdehnung zu. Weder einen vollen, von weiteren Sternen bevölkerten Raum, von Sternen, die uns unsichtbar sind - das schiene ihm eine willkürliche, der Wissenschaft zuwiderlaufende Vorstellung-, noch einen leeren Raum, denn dieser wäre nur ein Nichts, sogar ein wirklich existierendes Nichts. Die Welt, so wie er sie sich vorstellt, ist immer noch Ausdruck des Schöpfers, ja der göttlichen Dreieinigkeit. In der Sonne sieht er den Ausdruck Gottvaters, in der Sternenwelt den des Sohnes, im Licht und der Kraft, die zwischen beiden im Räume zirkulieren, den des Heiligen Geistes. Und gerade diese Treue zur Vorstellung einer begrenzten und endlichen Welt erlaubt es Kepler nicht, die Grenzen der aristotelischen Dynamik zu überschreiten.

Kepler (und Bruno) lassen sich noch der Renaissance zuordnen;

mit Galilei aber verlassen wir ein für allemal diese Epoche. Nichts, das sie kennzeichnete, trifft auf ihn zu: hochgradig abgeneigt gegen jeden Zauber, keineswegs der dinglichen Vielfalt zugetan, um so mehr aber der archimedischen Idee einer mathematischen Physik, die das Reale auf die Geometrie reduziert. Er geometrisiert das Universum, d. h., er identifiziert den physikalischen Raum mit dem der euklidischen Geometrie und läßt so Kepler hinter sich. Aus diesem Grund ist er imstande, das für die klassische Dynamik grundlegende Konzept der Bewegung zu formulieren. Zwar schweigt er sich - man möchte meinen: wohlweislich - über die Frage der Endlichkeit bzw. Unendlichkeit des Universums aus, bleibt uneindeutig, doch von einem begrenzenden Himmelsgewölbe findet sich bei ihm mit Sicherheits nichts. Indem er aber die Bewegung als ebenso stabilen, dauerhaften *Seinszustand* wie die Ruhe annimmt, braucht er keine konstante Kraft mehr, die die Bewegung des Bewegten erklärt. Er nimmt die Relativität der Bewegung und des Raumes an und ermöglicht so die Anwendung der strengen Gesetze der Geometrie auf die Mechanik.

Vielleicht war Galilei der erste, der an die tatsächliche Realisierung der mathematischen Formen in der Welt glaubte. Alles in dieser Welt Seiende ist der geometrischen Form unterworfen; alle Bewegungen und Formen unterliegen mathematischen Gesetzen, nicht bloß die regelmäßigen, möglicherweise in der Natur überhaupt nicht auffindbaren, sondern auch die unregelmäßigen. Die unregelmäßige Form ist ebenso geometrisch wie die regelmäßige, ebenso präzise - nur viel komplizierter. Die Abwesenheit von vollkommenen Geraden und Kreisen in der Natur spricht nicht gegen die maßgebliche Rolle der Mathematik in der Physik.

Galilei erscheint gleichzeitig als einer der ersten, die die Beschaffenheit und Funktion der Erfahrung in der Naturwissenschaft auf sehr genaue Weise begriffen. Er weiß, daß die Erfahrung - oder wenn ich mir erlauben darf, hier den lateinischen Terminus des *experimentum* dem der gemeinen *experience*, welche nichts als Beobachtung ist, entgegensetzen -, daß also das *experimentum* vorbereitet werden

muß, daß dies eine Frage ist, die der Natur gestellt wird, in einer ganz speziellen Sprache, jener der Geometrie und Mathematik; er weiß, daß es nicht genügt, das, was der Fall ist, das, was sich normaler- und natürlicherweise unseren Augen darbietet, zu beobachten; daß man wissen muß, wie die Frage zu formulieren und wie darüber hinaus die Antwort zu entziffern und zu begreifen ist: wie also auf *das experimentum* die strikten Gesetze der Meßkunst und der mathematischen Interpretation anzuwenden sind.

Auch ist zumindest nach meinem Dafürhalten Galilei derjenige, der das erste wirklich wissenschaftliche Instrument schuf oder konstruierte. Zwar waren, wie erwähnt, Tycho's Beobachtungsinstrumente schon von bis dato unbekannter Präzision; doch waren sie, wie alle anderen astronomischen Geräte vor denen Galileis, solche der Beobachtung, waren allenfalls Meßinstrumente für schlicht beobachtete Sachverhalte. In gewissem Sinn waren sie noch Werkzeuge. Galileis Instrumente dagegen, und das gilt sowohl für das Pendel als auch für das Teleskop, waren Instrumente im strengsten Sinn des Begriffs: Sie waren Inkarnationen der Theorie. Das galileische ist nicht bloß die Verbesserung des »holländischen« Fernrohrs. Galilei ging bei seiner Herstellung von einer optischen Theorie aus; er wollte dem nackten Auge Unsichtbares offenbaren. Kraft einer in Materie eingegangenen Theorie. Zum ersten Mal wird es hier ermöglicht, die Grenzen des Beobachtbaren, also dessen, was der Sinneswahrnehmung als der *experience*, der Grundlage aller vorgalileischen Wissenschaft, gegeben ist, zu überschreiten. So macht Galilei die Mathematik zum Kern der physikalischen Realität. Das zieht notwendig den Verzicht auf die qualitative Welt nach sich und die Verbannung aller sinnlichen Qualitäten, aus denen die aristotelische Welt besteht, in eine subjektive oder auf das lebendige Wesen bezogene Sphäre. Dieser Einschnitt ist fundamental.

Vor der Heraufkunft der galileischen Wissenschaft akzeptierten die Menschen - freilich mit einiger Anpassung und Auslegung - die sinnlich gegebene Welt als die wirkliche. Mit Galilei und nach ihm tritt ein Bruch auf zwischen der sinnlich gegebenen und der wirk-

liehen Welt - jener der Wissenschaft. Diese wirkliche Welt ist verkörperte, realisierte Geometrie. Damit sind wir aus der Renaissance herausgetreten; ausgehend von der galileischen Physik und ihrer cartesianischen Interpretation ist schließlich Newton imstande, die gewaltige Synthesis des 17. Jahrhunderts zu schaffen, und auf ihr gründet die Wissenschaft, wie wir sie kennen.

Galilei und die wissenschaftliche Revolution des 17. Jahrhunderts

Ungleich der Athene, der Tochter des Zeus, ist die neuzeitliche Wissenschaft nicht als Kopfgeburt fix und fertig dem Geist des Galilei entsprungen. Ganz im Gegenteil, die Revolution - eine Revolution aber ist und bleibt sie - im Zeichen beider wurde durch eine langwierige Denkanstrengung vorbereitet. Und nichts ist interessanter, aufschlußreicher und spannender als deren historische Untersuchung: die Geschichte des menschlichen Geistes, der hartnäckig und unermüdlich mit denselben bleibenden Problemen ringt, auf dieselben Schwierigkeiten stößt und mit denselben Hindernissen kämpft, dabei aber ganz allmählich seine Werkzeuge und Instrumente schmiedet, neue Begriffe, neue Denkweisen, mit denen schließlich die Hürde bewältigt wird.

Spannend ist die Geschichte, gewiß, doch zu lang, um hier erzählt zu werden. Wollen wir aber Ursprung, Tragweite und Bedeutung der galilei-cartesianischen Revolution erfassen, so kommen wir um einen wenn auch nur flüchtigen Blick zurück nicht herum: Richten wir ihn auf einige Zeitgenossen und Vorgänger Galileis.

Die neuzeitliche Physik studiert vornehmlich die Bewegung schwerer Körper, die Bewegung von Körpern, die uns umgeben. Die begriffliche Bewegung, die schließlich zur Aufstellung der fundamentalen Gesetze führt, entspringt somit aus der Anstrengung, Fakten und Phänomene der gewöhnlichsten täglichen Erfahrung wie Fall oder Wurf zu erklären. Doch entspringt die Gedankenarbeit daraus weder direkt noch ausschließlich noch hauptsächlich. Die neuzeitliche Physik stammt nicht nur von der Erde, sondern ebenso vom Himmel. Und im Himmel findet sie ihre Vollendung. Sie hat in der

Tat gleichsam ihren Prolog und Epilog im Himmel: Sie gründet im Studium astronomischer Probleme und hält im Lauf ihrer gesamten Geschichte daran fest. Das ist von beträchtlicher Bedeutung, hat entscheidende Konsequenzen. Denn damit ist die Preisgabe des klassischen und mittelalterlichen Weltbildes bezeichnet, jenes *Kosmos*, der als abgeschlossenes, einheitliches Ganzes gilt, das qualitativ bestimmt und hierarchisch gegliedert ist und dessen Bestandteile nach irdischer und himmlischer Natur zu unterscheiden sind und unterschiedlichen Gesetzen folgen. An die Stelle dieses Kosmos tritt ein *Universum*, das als offene, unbegrenzt ausgedehnte Gesamtheit existiert, beherrscht und geeint durch die fundamentalen Gesetze, die überall darin gelten. So werden *physica coelestis* und *pkysica terrestis* miteinander verbunden, und so wird es der letzteren möglich sein, auf ihre Probleme die hypothetisch-deduktiven mathematischen Methoden anzuwenden, die die erstere und ältere Schwester entwickelt hatte. Insofern ist es unmöglich, eine irdische Physik, zumindest eine irdische Mechanik ohne eine solche des Himmels zu begründen - und daraus erklärt sich bereits das partielle Scheitern sowohl des Galilei als auch des Descartes.

Die neuzeitliche Physik, die in und mit den Arbeiten Galileis ihren Anfang und in denen Einsteins ihr Ende findet, betrachtet das Prinzip der Trägheit oder der geradlinig gleichförmigen Bewegung als ihr grundlegendes. Sie tut dies aus guten Gründen, denn *ignomto motu ignoratur natura*, und für die neuzeitliche Wissenschaft geht es eben darum, alle Phänomene der Natur aus »Zahl, Figur und Bewegung« zu erklären. Freilich war es Descartes und nicht Galilei, der die Tragweite und Bedeutung dieses Prinzips als erster voll erkannte.¹ Dennoch hat Newton nicht ganz unrecht, wenn er dessen Entdeckung gänzlich Galilei zuschreibt. Zwar hat dieser das Trägheitsprinzip nie explizit formuliert, hätte dies auch gar nicht tun können; stillschweigend aber beruht seine ganze Mechanik darauf. Und nur sein Zögern vor den letzten Konsequenzen des eigenen Bewegungsbegriffs, sein Zögern, die experimentellen Daten radikal und restlos in den Wind

zu schlagen zugunsten eines theoretischen Postulats, um dessen Aufstellung er wahrlich genug gerungen hatte, hielt ihn davon ab, den letzten Schritt auf dem Weg zu tun, der aus dem Kosmos der Antike in die Unendlichkeit des Universums der Modernen führt.

Das Trägheitsprinzip ist sehr einfach. Es besagt, daß ein sich selbst überlassener Körper im Zustand der Ruhe oder Bewegung verbleibt, solange keine äußere Kraft auf ihn einwirkt. Anders gesagt, ein ruhender Körper bleibt also ewig in Ruhe, wenn er nicht »in Bewegung versetzt« wird; und ein bewegter Körper wird sich gleichförmig weiterbewegen, auf einer geradlinigen Bahn, solange ihn keine äußere Kraft daran hindert.³ Dieses Prinzip erscheint uns völlig klar, plausibel, ja es liegt praktisch auf der Hand. Es scheint uns offensichtlich, daß ein in Ruhe befindlicher Körper auch darin verharren wird - wo auch immer er sich befindet, er wird sich nicht aus freien Stücken wegbegeben. Und gerät er umgekehrt einmal in Bewegung, so wird er fortfahren, sich zu bewegen, in ursprünglicher Richtung. Und mit immer gleicher Geschwindigkeit. Wir sehen auch wirklich nicht ein, aus welchem Grunde oder welcher Ursache es sich anders zutragen sollte. Das erscheint uns nicht bloß plausibel, es erscheint uns ganz natürlich. Doch es ist nichts weniger als das. Die natürliche, handgreifliche Evidenz, die diese Auffassungen genießen, ist nämlich vergleichsweise jungen Datums: Wir verdanken sie Galilei und Descartes. In der griechischen Antike ebenso wie im Mittelalter wären die gleichen Auffassungen als »offenkundig« falsch, ja absurd eingestuft worden.

Erklären läßt sich das nur, wenn wir zugestehen oder erkennen, daß all diese »klaren« und »einfachen« Begriffe, die das Fundament der neuzeitlichen Naturwissenschaft abgeben, dies an und für sich gar nicht sind, sondern nur im Zusammenhang weiterer Auffassungen und Grundsätze, ohne welche sie keineswegs »klar« sind. Nur so verstehen wir im folgenden, weshalb der Entdeckung so simpler Tatbestände wie z. B. der fundamentalen Bewegungsgesetze, die heutzutage jedes Schulkind zu begreifen lernt, eine so tiefgründige, gewaltige und oftmals ganz vergebliche Geistesanstrengung vorausgehen mußte. Beteiligt waren einige der hellsten Geister der Menschheit,

die jene simplen Gesetze nicht schlichtweg entdeckten oder aufstellten, sondern zu entwickeln hatten, einschließlich des gesamten Rahmenwerks, das solche Entdeckungen erst ermöglichte. Zunächst galt es, den menschlichen Intellekt selbst umzubilden, ihm eine Anzahl neuer Begriffe zu gehen, einen neuen Naturbegriff, einen anderen Wissenschaftsbegriff, kurz: eine neue Philosophie.

Wir kennen die grundlegenden Auffassungen und Prinzipien zu gut, oder richtiger, wir sind zu sehr an sie gewöhnt, um die Hürden, die es zu ihrer Formulierung zu überwinden galt, richtig abschätzen zu können. Galileis Begriff der Bewegung (und auch der des Raumes) erscheint uns so »natürlich-, daß wir vermeinen, ihn selbst aus Erfahrung und Beobachtung abgeleitet zu haben. Wenngleich wohl noch keinem von uns ein gleichförmig verharrender oder sich bewegender Körper je untergekommen ist - und dies schlicht deshalb, weil so etwas ganz und gar unmöglich ist. Ebenso geläufig ist uns die Anwendung der Mathematik auf das Studium der Natur, so daß wir kaum die Kühnheit dessen erfassen, der da behauptet: »Das Buch der Natur ist in geometrischen Zeichen geschrieben.« Uns entgeht die Waghalsigkeit Galileis, mit der er beschließt, die Mechanik als Zweig der Mathematik zu behandeln, also die wirkliche Welt der täglichen Erfahrung durch eine bloß vorgestellte Wirklichkeit der Geometrie zu ersetzen und das Wirkliche aus dem Unmöglichen zu erklären.

Bekanntlich betrachtet die neuzeitliche Wissenschaft Bewegung als bloße geometrische Verschiebung von einem Punkt zum andern. Die Bewegung beeinflußt daher nicht den Körper, der sie ausführt; die Tatsache, daß er sich bewegt oder sich in Ruhe befindet, ruft seitens des bewegten oder in Ruhe befindlichen Körpers keine Veränderung hervor. Der Körper als solcher verhält sich indifferent gegenüber beiden Zuständen. Folglich sind wir auch nicht imstande, einem bestimmten Körper an und für sich Bewegung zuzuschreiben. Ein Körper ist nur in bezug auf etwas anderes in Bewegung, einen anderen Körper, den wir uns als in Ruhe befindlich vorstellen. Die Bewegung kann also nach Belieben dem einen oder andern der beiden Körper zugeschrieben werden - sie ist immer relativ.

Ganz so wie sie den sie ausführenden Körper selbst nicht beeinflusst, so beeinflusst die Bewegung auch nicht andere, die er gleichzeitig ausführen mag. Ein Körper kann also über eine beliebige Anzahl einzelner Bewegungen verfügen, die sich allesamt nach geometrischen Regeln zu einer resultierenden Bewegung kombinieren lassen; und umgekehrt läßt sich jede Bewegung nach den gleichen Regeln in eine beliebige Anzahl von Komponenten zerlegen.

Nichtsdestoweniger soll aber die Bewegung ein *Zustand* sein und die Ruhe ein anderer, dem ersten absolut entgegengesetzter, so daß es gilt, *Kraft* aufzuwenden, um einen Körper zur Ruhe oder umgekehrt in Bewegung zu bringen.

Daraus ergibt sich schlüssig, daß ein Körper im Zustand der Bewegung darin immer weiter verharren wird, so daß es keiner Kraft bedarf und keines weiteren Grundes, um seine geradlinig gleichförmige Bewegung zu erklären bzw. zu erhalten, ebensowenig wie es einer bedarf, um seinen Ruhezustand zu erklären oder zu erhalten. Um also als völlig einleuchtend erscheinen zu können, muß das Trägheitsprinzip dreierlei voraussetzen:

- a) die Möglichkeit, einen Körper von seiner gesamten physischen Umgebung zu isolieren;
- b) eine Vorstellung des Raumes, die ihn mit dem homogenen, unendlich ausgedehnten Kontinuum der euklidischen Geometrie gleichsetzt;
- c) eine Vorstellung der Bewegung und der Ruhe, die diese als Zustände betrachtet und auf derselben ontologischen Seinsebene ansiedelt.

Kein Wunder, daß diese Vorstellungen den Vorgängern und Zeitgenossen des Galilei nicht nur als ziemlich unannehmbar, ja unverständlich erschienen. Seinen aristotelischen Gegnern mußte ein Begriff der Bewegung als relativer, beharrlicher *und* substantieller Zustand so abstrus und widersprüchlich erscheinen wie die berühmten substantiellen Formen der Scholastik uns Heutigen. Kein Wunder, daß Galilei selbst hart um seine neue Auffassung ringen mußte und daß bedeutende Köpfe wie Bruno oder selbst Kepler das Ziel verfehl-

ten. Im Grunde ist bis in unsere Tage die hier zur Rede stehende Vorstellung nicht einfach zu erfassen; dem wird jeder beipflichten, der einmal Studenten ohne physikalische Grundkenntnisse in dieses Fach einzuführen versucht hat. Der gesunde Menschenverstand ist, was er immer gewesen: mittelalterlich und aristotelisch.

Werfen wir nun einen Blick auf die vorgalileische, im wesentlichen aristotelische Begrifflichkeit von Raum und Zeit. Natürlich kann ich mich hier nicht darauf einlassen, einen Abriß der aristotelischen Physik zu liefern. Nur einige charakteristische Züge will ich hervorheben, die der neuzeitlichen Sicht entgegengesetzt sind, wobei ich verdeutlichen möchte, daß die aristotelische Physik *zu Unrecht* breite Mißbilligung erfährt, da sie ein sehr gründlich durchdachtes und kohärentes theoretisches Rüstzeug bietet. Und sie gründet eben nicht allein in beträchtlicher philosophischer Tiefe, sondern befindet sich, wie P. Duhem und P. Tannery aufgezeigt haben', in weitaus größerer Übereinstimmung mit dem gesunden Menschenverstand und der täglichen Erfahrung als die Physik Galileis. Sinneswahrnehmung begründet die Physik des Aristoteles, und darum ist diese strikt nicht-mathematisch. Sie weigert sich, um mathematischer Abstraktionen willen von der bunten Vielfalt qualitativ bestimmter Tatsachen der Tageserfahrung abzugehen, ja sie leugnet die bare Möglichkeit mathematischer Physik, denn

- a) sind die mathematischen Begriffe unvereinbar mit den Daten der Sinneserfahrung, und
- b) ist die Mathematik nicht imstande, Qualität zu erklären und Bewegung zu deduzieren; im zeitlichen Reich abstrakter Figuren und Zahlen gibt es weder Qualität noch Bewegung.

Die aristotelische Physik betrachtet die Bewegung - $\chi\iota\nu\eta\sigma\iota\varsigma$ - oder schärfer: die Ortsbewegung als einen Prozeß der Veränderung, welcher der *Ruhe* entgegengesetzt ist, die als Ziel und Zweck aller Bewegung und somit als *Zustand* zu begreifen ist.⁴ Bewegung ist Veränderung, ein Werden oder Vergehen. Und diese Veränderung erfährt der Körper selbst; er verändert sich nicht bloß in bezug auf

andere. Die Bewegung affiziert also stets den sich bewegenden Körper, und ist er mit zwei oder mehreren Bewegungen ausgestattet, so beeinflussen diese sich gegenseitig, behindern sich, lassen sich bisweilen gar nicht miteinander vereinbaren. Außerdem gesteht Aristoteles weder das Recht noch die bloße Möglichkeit zu, den konkreten Welt-Raum seines wohlgeordneten und endlichen Kosmos mit dem geometrischen »Raum« zu identifizieren, ebensowenig wie die Möglichkeit, einen bestimmten Körper aus seiner physischen und kosmischen Umgebung zu isolieren. Die Analyse eines konkreten physikalischen Problems muß daher stets die Ordnung der Dinge und den Seinsbereich (den »natürlichen« Platz) des betreffenden Körpers oder Gegenstands berücksichtigen. Im übrigen sind die verschiedenen Seinsbereiche keinesfalls gleichen Gesetzen unterworfen, auch — und vielleicht gerade — nicht den gleichen Bewegungsgesetzen. Die schweren Dinge fallen, die leichten steigen, irdische bewegen sich geradlinig, himmlische im Kreise usw.

Daraus erhellt schon, daß Bewegung, da sie nicht als *Zustand*, sondern als *Veränderungsprozeß* gilt, sich nicht spontan oder automatisch fortsetzt, sondern zur Andauer eine stetig wirksame Ursache oder einen stetig tätigen Beweger erfordert, und daß sie mit Abbruch dieses Wirkens auf den Körper sofort aufhört, d. h., sobald jener von seinem Beweger getrennt wird: *Cessante causa, cessat effectus*. Es folgt daraus mit absoluter Notwendigkeit, daß die durchs Trägheitsprinzip postulierte Bewegung in sich widersprüchlich und völlig unmöglich ist.

Kommen wir nun zu den Fakten. Die neuzeitliche Wissenschaft entspringt nicht bloß im engen Zusammenhang mit der Astronomie, sondern genauer genommen aus der Notwendigkeit, *physikalischen* Einwänden zu begegnen, die von einigen führenden Wissenschaftlern jener Tage gegen die kopernikanische Astronomie erhoben wurden. Diese Einwände waren keineswegs neu; vielmehr waren sie im wesentlichen mit jenen identisch, die von Aristoteles und Ptolemaios gegen die Möglichkeit der Erdbewegung erhoben worden waren, auch wenn sie zuweilen in modernisierter Form dargeboten wurden,

wenn etwa anstelle des Steinwurfs der antiken Argumentation eine fliegende Kanonenkugel auftauchte. Verfolgen wir die sehr interessante und aufschlußreiche, immer wieder von Kopernikus selbst, dann von Bruno, Tycho Brahe, Kepler und schließlich Galilei entfachte Diskussion dieser Einwände.⁵

Von ihrer bildhaften Einkleidung befreit, gehen die aristotelischen und ptolemäischen Argumente ihrem Kern nach auf die Behauptung zurück: Würde sich die Erde bewegen, so würde alles Geschehen auf ihrer Oberfläche davon in zweifacher Weise beeinflusst. Erstens würde die enorme Geschwindigkeit dieser (Rotations-)Bewegung eine derartige Zentrifugalkraft entwickeln, daß alle mit der Erde unverbundenen Körper wegflogen, und zweitens ließe sie alle unverbundenen oder auch nur zeitweilig nicht erdverbundenen Körper ins Hintertreffen geraten. Folglich würde ein vom Turm geworfener Stein nie an dessen Fuß landen, und erst recht würde ein senkrecht in die Luft geworfener Stein (oder eine so abgeschossene Kugel) nie auf den Schützen oder Werfer zurückfallen, da während des Flugs oder Falls der Ausgangsort, »von unten her weggezogen, sich schon anderswo befände«.

Da gibt es nichts zu lachen. Im Licht der aristotelischen Physik ist das völlig gerechtfertigt, auf ihrer Grundlage aber auch unwiderlegbar. Um dieses Licht auszulöschen, mußte das ganze System verändert und ein neuer Begriff der Bewegung entwickelt werden - und das war der des Galilei.

Für den Aristoteliker ist, wie wir sahen, Bewegung ein Prozeß, der »im« bewegten Körper stattfindet und ihn affiziert. Es falle nun ein Körper von A nach B; aus einer gewissen Höhe über der Erde wird er sich dabei auf diese, genauer: auf ihr Zentrum zubewegen, der geraden Linie folgend, die die Orte A und B miteinander verbindet. Rotiert nun während dieser Bewegung die Erde um ihre Achse, dann hat an dieser Drehung weder der fallende Körper noch dessen Bahn — jene von A über B ins Erdzentrum führende Gerade — Anteil, denn der von der Erde abgelöste Körper wird durch die Erddrehung nicht beeinflusst. Die Tatsache, daß die Erde unter ihm sich bewegt, hat

keine Auswirkung auf seine Bahn. Der Körper kann der Erde nicht nachlaufen. Er verfolgt seine Bahn, als sei nichts geschehen, denn in der Tat ist *ihm* nichts geschehen. Selbst die Tatsache, daß der Punkt A (die Spitze des Turmes) nicht stillstand, sondern sich mit der Erde fortbewegte, bedeutet nichts für seine Bewegung: Was mit dem Ausgangsort des Körpers späterhin geschieht, hat auf sein Verhalten nicht den geringsten Einfluß.

Diese Auffassung mag uns seltsam anmuten, ist aber keineswegs absurd: Genauso stellen wir Heutigen uns nämlich die Bewegung oder Ausbreitung des Lichtstrahls vor. Und auch aus diesem Bewegungsbegriff folgt unweigerlich, daß der vom Turm fallende Gegenstand infolge der Erdbewegung eben nicht an dessen Fuß landet und daß ein senkrecht in die Luft geworfener Stein oder eine derart abgeschossene Kugel nicht an ihren Ausgangsort zurückkehren; und erst recht folgt daraus, daß ein Stein oder Ball, der von der Mastspitze eines fahrenden Schiffes fällt, nie am Fuß des Masts aufschlagen wird.

Demgegenüber sind die Argumente des Kopernikus ziemlich schwach. Seine Behauptung lautet, daß die von den Aristotelikern deduzierten peinlichen Konsequenzen wohl im Fall einer »gewalt-samen« Bewegung gelten, nicht aber im Fall der Bewegung der Erde und aller irdischen Dinge mit ihr, für welche dies eine »natürliche« Bewegung sei. Das sei der Grund dafür, daß Wolken, Vögel, Steine usw. sich mitbewegen, ohne ins Hintertreffen zu geraten.

Eine recht dürftige Antwort. Und doch enthält sie die Keime einer neuen Auffassung: Die Saat geht unter den Nachfolgern auf. Denn die kopernikanische Überlegung wendet die Gesetze der »Himmelsmechanik« auf irdische Phänomene an, ein Schritt, der praktisch beinhaltet, daß man sich der alten qualitativen Aufteilung des Kosmos in zwei verschiedenen Welten begibt. Außerdem erklärt Kopernikus den *augenscheinlich geradlinigen* Weg des fallenden Körpers mit dessen Teilhabe an der Erdbewegung. Außer der Erde hat nämlich ebenso der Körper wie der Betrachter Anteil daran, und darum erscheint uns die Erdbewegung, »als existiere sie gar nicht«.

Zugrunde aber liegt seinem Argument die eher mystische Auffas-

sung einer »gemeinsamen Natur« der Erde und aller irdischen Dinge. Später ersetzt die Wissenschaft diese Sicht durch den Begriff des physikalischen Systems, des Systems der Dinge, die dieselbe Bewegung ausführen. Man verläßt sich nicht mehr auf die *optische*, augenscheinliche, sondern die *physische* Relativität der Bewegungen. Dazu aber mußte man den Boden der aristotelischen Philosophie der Bewegung verlassen und anderen Grund betreten. Tatsächlich werden wir im weiteren immer deutlicher sehen, daß es sich hier um eine philosophische Problematik handelt.

Es war Giordano Bruno, der die in den kopernikanischen Argumenten implizit enthaltene Konzeption eines physikalischen oder richtiger: mechanischen Systems ausarbeitete. Vermöge einer genialen Intuition erkannte Bruno, daß die neue Astronomie die Vorstellung einer geschlossenen und endlichen Welt fallenlassen und durch die eines offenen, unendlichen Universums ersetzen mußte. Damit fiel freilich auch der Gegensatz zwischen »natürlichen« und unnatürlichen »gewaltsamen« Bewegungen. Im unendlichen Universum Brunos tritt an die Stelle des aristotelischen Raumbegriffs einer sphärischen Hülle jener des Piaton: Raum als bloßes Behältnis, als »Rezeptakel« (χωρα), in dem alle Aufenthaltsorte aller Körper prinzipiell völlig gleichwertig und folglich auch natürlich sind. Wo also Kopernikus zwischen der »natürlichen« Erdbewegung und etwaigen »gewaltsamen« Bewegungen auf ihr unterscheidet, da gleicht der Nolaner sie ausdrücklich an. Gesetzt, die Erde bewege sich, dann, so Bruno, läßt sich alles irdische Geschehen exakt mit dem auf einem Schiff vergleichen, das über den Ozean dahingleitet: Die Bewegung der Erde selbst beeinflusst diejenige auf ihr nicht mehr als jene des Schiffs die Bewegung all der Dinge, die es mit sich führt. Die Konsequenzen, die Aristoteles deduzierte, träten nur ein, wenn der Ursprung bzw. der Ausgangsort des bewegten Körpers der Erde unverbunden wäre.

Nach Bruno determiniert der Ursprungsort als solcher in keiner Weise Bewegung und Weg des Körpers. Nur die vorhandene oder fehlende Verbindung dieses Ortes mit dem mechanischen System zählt. Es ist, *horrible dictu*, auch durchaus möglich, daß ein und der-

selbe Ort gleichzeitig zwei oder mehreren Systemen verbunden ist. Stellen wir uns etwa zwei Männer vor, einer oben im Mastkorb eines Schiffs, das eine Brücke passiert, auf welcher sich der zweite befindet; in einem bestimmten Augenblick mögen sich die Hände der beiden am selben Ort befinden. Lassen nun beide in diesem Augenblick je einen Stein fallen, so wird der des Brückenstehers geradewegs ins Wasser fallen, der des Seemanns aber der Schiffsbewegung folgen und am Fuß des Masts aufschlagen, wobei er von der Brücke aus gesehen eine gekrümmte Bahn, eine Kurve beschreiben würde. Bruno erklärt dies unterschiedliche Verhalten der Steine aus der einfachen Tatsache, daß der letztere Stein an der Schiffsbewegung Anteil hatte und im Fall noch einen Teil der ihm eingegebenen *virtus motrix* bewahrt. Mithin ersetzt Bruno die aristotelische Dynamik durch die *impetus*-Dynamik der Pariser Nominalisten. Diese schien ihm eine für seine Konstruktion ausreichende Basis abzugeben. Darin irrte er, wie wir inzwischen wissen. Zwar war die Vorstellung des *impeius*, einer virtuellen Kraft oder Macht, welche die Bewegung des Körpers erregt und in Gang hält, sich dabei aber auch verbraucht, durchaus imstande, zumindest einige der aristotelischen Einwände zu widerlegen. Doch nicht mit allen Einwänden wurde diese Konzeption fertig, und noch weniger vermochte sie den Bau der neuzeitlichen Wissenschaft zu tragen.

Insgesamt erscheinen uns Brunos Argumente als sehr vernünftig. Zu seiner Zeit aber machten sie wenig Eindruck: weder auf Tycho Brahe, der in seinem Streit mit Rothmann unermüdlich die alten aristotelischen Einwände wiederkaut, wenn er auch etwas zeitgemäßer formuliert - noch auf Kepler, der zwar von Bruno beeinflusst ist, sich aber zur Besinnung auf die Beweismittel des großen Kopernikus verpflichtet glaubt, wobei er allerdings dessen mythische Vorstellung einer gemeinsamen Natur der Dinge durch eine physikalische, die einer Anziehungskraft ersetzt.

Tycho Brahe leugnet schlicht, daß eine von der Mastspitze eines Schiffs fallende Kugel an dessen Fuß aufschlagen wird. Sie falle zurück, und um so stärker, je mehr Fahrt das Schiff habe. Und ebenso

soll die von der bewegten Erde senkrecht in die Luft geschossene Kanonenkugel nie auf die Kanone zurückfallen können.

Im Falle der von Kopernikus behaupteten Erdbewegung, so Tycho weiter, sei es unmöglich, eine Kanonenkugel gleich weit nach Osten und nach Westen zu schießen: Die äußerst schnelle Bewegung der Erde hindere die der Kugel, die an ihr Teil habe, ja verhindere sie ganz und gar, schösse man die Kugel in die der Erdbewegung entgegengesetzte Richtung ab. Brahes Sichtweise mutet uns recht seltsam an. Bedenken wir aber, daß ihm wiederum Brunos Ideen gänzlich unglaublich und übertrieben anthropomorph vorkamen: sich vorzustellen, daß zwei vom gleichen Ort gleichzeitig in Richtung aufs Erdzentrum fallende Körper verschiedenen Bahnen folgen, bloß weil einer der beiden anfangs mit einem Schiff in Verbindung stand, der andere hingegen nicht, das kann einem Aristoteliker nur bedeuten, daß jener Körper sich noch an seine Schiffsbewegung *erinnert* und somit *weiß*, wohin er fallen muß, und auch die Fähigkeit besitzt, diesen seinen Weg zu gehen, kurz: daß er eine Seele hat.

Nun werden sich, wie bereits erwähnt, sowohl vom Standpunkt der aristotelischen als auch von dem der impetHS-Dynamik zwei verschiedene Bewegungen immer gegenseitig behindern. Das beweist schon die bekannte Tatsache, daß im Fall eines Schusses die Geschwindigkeit der horizontalen Bewegung die Abwärtsbewegung der Kugel verhindert und es ihr ermöglicht, viel länger in der Luft zu bleiben, als wenn wir sie einfach fallen lassen. Tycho Brahe lehnt also - wie alle anderen Vorgänger des Galilei - die wechselseitige Unabhängigkeit von Bewegungen ab und ist daher ganz im Recht, wenn er die Fakten und die Theorien, die dies zulassen, verwirft.

Keplers Position ist von besonderem Interesse, zeigt sie uns doch, besser als jede andere, die im Grunde *philosophischen* Wurzeln der galileischen Revolution. Vom rein wissenschaftlichen Standpunkt aus ist Kepler zweifellos einer der genialsten Köpfe, wenn nicht *das* Genie seiner Zeit - wir verdanken ihm unter anderem den Begriff der Trägheit (*inertia*). Seine außerordentliche mathematische Begabung steht ganz außer Frage; nur die Kühnheit seines Denkens kommt ihr

gleich. Schon der Titel eines seiner Werke, *Physica coekstis*^b, ist eine Herausforderung an die Zeitgenossen. Und doch steht er philosophisch Aristoteles und dem Mittelalter näher als Galilei und Descartes. Er bewegt sich noch in den Begriffen des Kosmos; Ruhe und Bewegung sind ihm entgegengesetzt wie Licht und Finsternis, wie Sein und Nichtsein. Im Unterschied zu Newton bedeutet ihm der Begriff der Trägheit noch den Widerstand, den die Körper einzig und allein der Bewegung entgegensetzen, nicht aber der Zustandsänderung schlechthin. Daher benötigt er wie Aristoteles und die Physiker des Mittelalters keinen Grund, der die Ruhe, wohl aber eine Kraft, die die Bewegung erklärt; wie jene, so glaubt auch er, daß bewegte Körper sofort zur Ruhe kommen, sobald sie von ihrem Beweger geschieden oder des Wirkens ihrer bewegenden Kraft beraubt sind. Um also zu erklären, daß Körper auf der sich bewegenden Erde auch dann, wenn sie mit dieser gar keine feste, materielle Verbindung haben, nicht - zumindest *nicht wahrnehmbar*⁷ - zurückfallen, daß aufwärts geworfene Steine an ihren Ausgangsort zurückkehren und daß Kanonenkugeln (fast) so weit gen Westen wie gen Osten fliegen, muß er eine reale Kraft annehmen oder entdecken, die solche Körper an die Erde bindet und sie zwingt, deren Bewegung zu folgen.

Diese Kraft findet Kepler in der gegenseitigen Anziehung aller materiellen, zumindest aller irdischen Körper - was in praktischer Hinsicht Anziehung aller irdischen Dinge durch die Erde bedeutet. Kepler sieht all jene Dinge durch unzählige elastische Ketten an die Erde gebunden; und es ist die Zugkraft dieser Stränge, die dafür sorgt, daß Wolken und Nebel Steine und Kugeln nicht reglos in der Luft verharren, sondern der Erde bei ihrer Bewegung folgen. Daß diese Ketten allüberall sind, erklärt nach Keplers Meinung auch die Möglichkeit, *gegen* die Erdbewegung Steine zu werfen oder Kanonen abzufeuern. Die Anziehungsketten ziehen den Stein gleichzeitig nach Osten und Westen, und so wird ihr Einfluß nahezu neutralisiert. Die wirkliche Bewegung des Körpers einer vertikal abgeschossenen Kanonenkugel ist dann eine Kombination oder Mischung a) der eigenen und b) der Erdbewegung. Da aber die letzte allen untersuchten

Beispielen zukommt, so zählt nur die erste. So wird klar, was Tycho Brahe nicht einsehen wollte, daß nämlich die Schußweite zweier Kugeln, die nach Osten bzw. Westen abgefeuert werden, auf der Erde nahezu die gleiche ist (auch wenn sich vom Weltraum aus gemessen ein Unterschied ergibt). Die gleiche Kraft, hervorgebracht durch die gleiche Pulvermenge, wird daher die Kugeln in beide Richtungen gleich weit befördern.

Tychos und der Aristoteliker Einwänden gegen die Erdbewegung wird also gleichermaßen und zur Genüge Rechnung getragen. Und Kepler zeigt, wieso es irrig war, die Erde einem fahrenden Schiff zu vergleichen: die Erde »zieht« alle mitgeführten Körper »magnetisch an«, das Schiff hingegen nicht. Auf dem Schiff also bedarf es einer materiellen Verbindung, die auf der Erde völlig überflüssig ist.

Das soll uns reichen. Wir sehen, daß der große Kepler, der Begründer der modernen Astronomie, derselbe, der die Einheit aller kosmischen Materie proklamierte und sein *ubi materia, ibi geometria* hinsetzte, daß eben dieser die Grundlegung der neuzeitlichen Physik nur aus einem einzigen Grund verfehlte: Er verharrte in dem Glauben, daß die Bewegung ontologisch auf einer höheren Seinsstufe stünde als die Ruhe.

Wenden wir uns nach diesem kurzen historischen Aufriß Galileo Galilei zu - und wundern uns nicht, daß auch er der Diskussion jener abgegriffenen aristotelischen Argumente viel Platz einräumt, sehr viel Platz. Um so eher sind wir in der Lage, die vollendete Bravour anzuerkennen, mit der er in seinem *Gespräch über die zwei hauptsächlichstett Weltsysteme*⁸ das Aufgebot seiner Argumente zum letzten und entscheidenden Angriff auf den Aristotelismus ins Feld führt.

Galilei ist sich der außerordentlichen Schwierigkeit seiner Aufgabe bewußt. Er weiß genau, daß er mit starken Feinden zu tun hat: mit der Autorität, der Tradition und dem ärgsten Bedränger, dem gesunden Menschenverstand. Es ist sinnlos, jenen Beweise zu liefern, die deren Wert nicht einsehen können - sinnlos also, jenen, die nicht mathematisch zu denken gewohnt sind, den Unterschied zwischen der linearen und der Kreisgeschwindigkeit zu erklären. Mit der Kon-

fusion dieser Geschwindigkeitsbegriffe steht und fällt aber schon der erste der aristotelischen und ptolemäischen Einwände. Am Anfang muß also die Erziehung stehen. Man muß langsam vorangehen, Schritt für Schritt, wieder und wieder die alten und die neuen Argumente durchgehen, man muß sie in verschiedener Form vortragen, muß die Beispiele vermehren und neue, schlagende hinzuerfinden. Wie etwa das des speerwerfenden Reiters, der seine Waffe aus dem Flug wieder auffängt, das des Bogenschützen, der auf Grund veränderlicher Bogenspannung verschiedene *Pfeilgeschwindigkeiten* erzielt, das Beispiel eines Bogens auf einer fahrenden Kutsche, der die jeweilige Fahrgeschwindigkeit durch seine jeweilige Pfeilgeschwindigkeit kompensiert. Und unzählige andere Beispiele, die uns oder vielmehr seine Zeitgenossen Stück für Stück an diese paradoxe und unerhörte Ansicht heranzuführen, welche besagt, daß Bewegung *in se et per se* besteht und keinen Grund und keine Kraft benötigt, um fortzubestehen. Ein harter Brocken. Denn es ist, wie gesagt, ganz und gar nicht natürlich, bei Bewegung an Geschwindigkeit und Richtung zu denken - und nicht an Kraftaufwand und Verrückung.

Tatsächlich aber können wir die Bewegung im Sinne von Kraftaufwand und Verrückung gar nicht *denken*; wir können sie uns nur so *vorstellen*. Also gilt es zu wählen: entweder denken oder aber vorstellen — Galilei gegen den gesunden Menschenverstand. Denn es ist Denken, reines, unverfälschtes Denken, und nicht - wie bisher - Erfahrung oder Sinneswahrnehmung, die den Grund der »neuen Wissenschaft« des Galileo Galilei abgibt.

Das stellt er ganz außer Frage. Das Beispiel der von der Mastspitze auf ein fahrendes Schiff fallenden Kugel aufgreifend, erklärt er ausführlich das Prinzip der physikalischen Relativität der Bewegung, den Unterschied zwischen der Bewegung des Körpers relativ zur Erde oder zu einem Schiff, und dann schließt er *ohne jede Bezugnahme auf Erfahrung*, daß sich *relativ zum Schiff* die Bewegung der Kugel durch dessen Fahrt nicht verändern wird. Als der fiktive aristotelische Gegner im Dialog, ein alter Empiriker, ihn fragt, ob er ein Experiment gemacht habe, erklärt er stolz, nein, das brauche er nicht: »Ich bin

ohne Versuch gewiß, daß das Ergebnis so ausfällt, wie ich Euch sage, denn es muß so ausfallen.«

Necesse geht somit vor *esse*. Gute Physik wird *a priori* gemacht. Die Theorie geht der Tatsache voraus. Vor aller Erfahrung verfügen wir schon über die gesuchte Erkenntnis. Die Erfahrung ist unnütz. Die fundamentalen Bewegungsgesetze, die das raumzeitliche Verhalten materieller Körper bestimmen, sind mathematischer Natur. Von derselben Natur wie jene, die für die Beziehungen und Gesetze der geometrischen Figuren und der Zahlen gelten. Nicht in der äußeren Natur, sondern in uns, in unseren Köpfen, in unserem Gedächtnis sind sie zu finden, wie das schon Piaton gelehrt hatte.

Dem konsternierten aristotelischen Widersacher erklärt Galilei, daß wir aus eben *diesem* Grund imstande sind, für alle Lehrsätze, welche die »Symptome« einer Bewegung beschreiben, strenge und rein mathematische Beweise zu liefern, also eine naturwissenschaftliche Sprache zu entwickeln, die Natur durch mathematisch geplante Experimente ⁹ zu befragen und das große Buch der Natur zu lesen, welches »in geometrischen Zeichen geschrieben ist«. Das Buch der Natur ist in geometrischen Zeichen geschrieben: So wie die Physik seines wahren Lehrers, des *divus Archimedes*, eine Geometrie der Ruhe war, so ist die Galileis eine Geometrie der Bewegung.

Wie denn? Waren die alten aristotelischen Einwände gegen Piatons Mathematisierung der Natur endlich widerlegt und abgetan? Nicht ganz. Denn wirklich ist für Qualität im Zahlenbereich kein Platz, und darum muß Galilei gleich Descartes die bunte, qualitative Welt der sinnlichen Wahrnehmung und der täglichen Erfahrung verwerfen und durch die farblose, abstrakte, archimedische ersetzen. Und auch Bewegung kommt unter Zahlen wohl nicht vor. Doch die Bewegung, zumindest die Bewegung archimedischer Körper im homogenen und unendlichen Raum der neuen Naturwissenschaft, bestimmt sich nach Zahlenverhältnissen. Nach den *legibus et rationibus Humerorum*.

Die Bewegung wird also der Zahl unterworfen: So weit war auch der größte der alten Platoniker, eben Archimedes, nicht gegangen.

Dies blieb dem »vorzüglichsten Prüfer der Natur«, wie sein Schüler und Freund Cavalieri ihn nennt, dem Platoniker Galileo Galilei vorbehalten.

Der Platonismus Galileis (auf den ich andernorts eingehe¹⁰) ist nicht mit dem der Florentiner Akademie zu vergleichen; seine mathematische Philosophie der Natur unterscheidet sich erheblich von ihrer neupythagoräischen Zahlenmystik. Doch in der Geschichte der Philosophie gibt es mehr als eine platonische Schule, mehr als eine platonische Tradition, und ob der von Iamblichus und Proclus beschrittene Weg platonischer ist als der archimedische, bleibt unausgemacht.¹¹

Für Galilei, seine Zeitgenossen und Schüler war der Grenzverlauf zwischen Aristotelismus und Platonismus klar. In ihrer Sicht beruhte der Gegensatz dieser beiden Philosophien auf einer unterschiedlichen Einschätzung der Mathematik als Wissenschaft und ihrer Rolle bei der Begründung der Naturwissenschaft. Sah man die Mathematik bloß als mit Abstraktionen beschäftigte Hilfswissenschaft und daher der Physik, als Realwissenschaft, unterlegen an, optierte man also für eine Physik *der* Erfahrung und der Sinneswahrnehmung, so war man Aristoteliker. Gab man dagegen der Mathematik den Vorrang und die Vorherrschaft beim Studium der Naturdinge, so war man Platoniker. Als Rückkehr zu Piaton, als Sieg Piatons über Aristoteles erschien demzufolge den Zeitgenossen und Schülern Galileis ebenso wie diesem selbst die galileische Wissenschaft und ihre Philosophie der Natur. Diese Interpretation, das gebe ich zu, erscheint mir völlig richtig.

ANMERKUNGEN

- 1 Vgl. A. Koyré, *Etudes galileennes*, Paris 1939; vgl. auch A. Koyré, *From the Cbsed World to tkeInfinite Uttiverse*, Baltimore 1957 (dt. Übers.: Frankfurt/M. 1967).
- 2 Isaac Newton, *Philosopkiae Naturalis Prittcpia Mathematica; Ax'iomata sive leges motus*, Lex 1: *Corpus am«? perseverare m statvt SMO quiescoufi vel movendi uttiformiter indtrectum, nisi quatenus a viris impressis cogiturstatum illemutare*. Siehe dazu auch

- »Newton and Descartes«, in: A. Koyré, *Newtonian Studies*, London/Cambridge, Mass. 1965.
- 3 P. Duhem, *Le Systeme du monde*, Bd. I, Paris 1915, S. 194ff., und P. Tannery, »Galilee et les principes de la dynamique«, in: *Memoires scientifiques*, Bd. VI, Paris 1926, S. 399ff.
- 4 Für Aristoteles stellt die Ruhe einen Mangel (*privatio*) dar und steht auf ontologisch niedrigerer Stufe als die Bewegung (*actus eitis in potentia in quantum est in potentia*).
- 5 Vgl. A. Koyré, *Budes galileennes...*, Teil 111: »Galile et la loi d'inertie«.
- 6 Der vollständige Titel lautet: Johannes Kepler, *Astronomie nova AITIO-AOFHTOS seit Physica coelestis tradita Commentariis de motibus stellae Martis*, Heidelberg 1609; A. d. Ü.
- 7 Vgl. dazu A. Koyré, *Etudesgalileennes....* S. 172-194.
- 8 Galileo Galilei, *Dialogo sopra i due Massimi Sistemi de! Mondo*, dt. Übers. E. Strauss: *Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme*, Darmstadt 1982, S. 152.
- 9 Das Experiment ist - im Unterschied zur bloßen Erfahrung - eine Frage, die wir der Natur stellen, und zwar in einer angemessenen Sprache, die zu formulieren ist. Zusammenfassend ließe sich die gesamte galileische Revolution als die Entdeckung dieser Sprache bezeichnen: die Entdeckung der Mathematik als Grammatik der physikalischen Wissenschaft. Diese Entdeckung der rationalen Struktur der Natur ist es, die zum apriorischen Fundament der modernen *experimentellen* Wissenschaft wird und deren Konstitution ermöglicht.
- 10 Vgl. »Galilei und Piaton«; in diesem Band S. 88 ff.
- 11 Der ganzen doxographischen Tradition gilt jedenfalls Archimedes als *philosophus platoHicus*.

Galilei und Platon

Die wissenschaftliche Revolution des 17. Jahrhunderts, mit welcher sich Galileis Name unauslöschlich verbindet, ist die vielleicht gründlichste Umwälzung des menschlichen Denkens seit der griechischen Entdeckung des Kosmos: Sie bedeutet nichts weniger als eine radikale intellektuelle »Mutation«, deren Ausdruck und Ergebnis die moderne Physik ist.¹

Zuweilen wird diese Revolution als geistiger Aufstand dargestellt und als vollständige Umwälzung der grundlegenden menschlichen Geisteshaltung interpretiert. Das »praktische« Denken, die *vita activa* trete an die Stelle der *εωρία* der *vita contemplativa*, die bisher als vornehmste geistige Tätigkeit galt. Der neuzeitliche Mensch suche die Natur zu beherrschen, während der antike und mittelalterliche sie vor allem betrachtet habe. Aus dem menschlichen Macht- und Tatendrang sei die mechanistische Tendenz der klassischen, also galileischen, cartesischen, hobbesschen Physik zu erklären. Denn die *scientia activa* und *operativa* ziele darauf ab, den Menschen zum »Herrn und Besitzer der Natur« zu machen. Als bloßer Ausfluß dieser Attitüde, als bloße Anwendung dieser Denkkategorien des *homo faber*² sei die mechanistische Tendenz zu deuten; und die cartesische, erst recht die Wissenschaft Galileis sei nichts anderes als jene des Handwerkers oder des Ingenieurs.³

Diese Erklärung ist, so glaube ich, nicht ganz triftig. Natürlich ist die neuzeitliche Philosophie, Ethik und Religion praxisbetonter als die antike und die mittelalterliche. Und auch die neuzeitliche Wissenschaft ist dies — ich denke an die cartesische Physik und ihre Vergleiche mit Rollen, Stricken und Hebeln. Und doch ist die Attitüde

des Naturbeherrschers weniger die des Descartes oder des Galilei als vielmehr diejenige Bacons, der in der Wissenschaftsgeschichte eine ganz andere Stellung einnimmt.⁴ Galilei und Descartes sind jedoch nicht Männer des Handwerks oder der mechanischen Künste; sie haben kaum je etwas Handfesteres als ein Gedankengebäude errichtet.⁵ Die neue Ballistik wurde nicht von Kanonieren und Kugelgießern, sondern gegen deren Widerstand durchgesetzt. Und Galilei lernte *sein* Geschäft nicht von Leuten, die in den Zeughäusern und Werften Venedigs schufteten, ganz im Gegenteil: Er lehrte sie das *ihre*.⁶

Die angedeutete Theorie erklärt zu viel und zu wenig zugleich. Den gewaltigen technologischen Fortschritt des 17. Jahrhunderts leitet sie aus dem der Technologie ab. Im Vergleich zum Fortschritt der Wissenschaft war der letztere jedoch geradezu unscheinbar. Außerdem übersieht man die technologischen Leistungen des Mittelalters und vernachlässigt den Hunger nach Macht und Reichtum, der die Alchimie durch ihre gesamte Geschichte hindurch inspirierte.

Andere Autoren stellen Galileis Kampf gegen die Autoritäten, vor allem gegen die des Aristoteles, in den Vordergrund: gegen die wissenschaftliche und philosophische Tradition, die von der Kirche aufrechterhalten und an den Universitäten gelehrt wird. Dabei legt man Wert auf die Bedeutung von Beobachtung und Erfahrung in der neuen Wissenschaft von der Natur.⁷ Natürlich bilden Beobachtung und Experiment geradezu deren Kennzeichen, natürlich finden sich in Galileis Schriften unzählige Verweise darauf, und es findet sich bittere Ironie gegenüber jenen, die ihren Augen nicht trauten, weil das, was sie sahen, der kanonischen Lehre widersprach. Die, wie Cremonini, nicht einmal durch Galileis Fernrohr sehen wollten, aus Furcht davor, sie möchten etwas erblicken, was ihren überkommenen Theorien und Annahmen widersprechen könnte. In der Tat hat Galilei gerade dadurch der Astronomie und Kosmologie seiner Zeit einen entscheidenden Schlag versetzt, daß er ein Fernrohr baute und hindurchsah und damit sorgfältig den Mond und die Planeten beobachtete und die Jupitermonde entdeckte.

Und dennoch haben Beobachtung und Erfahrung - im Sinne der spontanen Erfahrung des gemeinen Menschenverstands - in der Begründung der neuen Wissenschaft keinen entscheidenden Part gespielt, es sei denn den eines Hindernisses.⁸ Ohnehin stand, wie Tannery und Duhem festgestellt haben, solcher Erfahrung die aristotelische Physik und erst recht die der Pariser Nominalisten viel näher: Buridan und Nicolaus von Oresme kommen dem gesunden Menschenverstand sehr viel mehr entgegen als Galilei und Descartes.⁹ Nicht die Erfahrung, sondern das Experiment spielte einen großen positiven Part, und auch das erst später. Experimentieren bedeutet methodische Befragung der Natur, eine Befragung, die eine *Sprache* voraussetzt und impliziert, in der die Fragen zu formulieren sind, und ein Wörterbuch, das uns die Antworten lesbar und interpretierbar werden läßt. Für Galilei waren das bekanntlich Kurven, Kreise und Dreiecke: die mathematische, weder rein spekulative noch gemeinverständliche, *Sprache der Geometrie*. In dieser war die Natur anzusprechen, um Antwort zu erhalten. Die Wahl der Sprache konnte aber doch nicht durch jene Erfahrung bestimmt werden, die mit Hilfe dieser erst möglich wurde. Sie mußte anderen Quellen entspringen.

Manche Philosophie- und Wissenschaftshistoriker waren bescheidener:¹⁰ Sie charakterisierten die neuzeitliche Physik als solche durch einige ihrer markanten Züge, etwa durch die Rolle des *Trägheitsprinzips*. Wieder ganz richtig: Im Gegensatz zur antiken Mechanik hat das Trägheitsprinzip in der klassischen Mechanik einen herausragenden Stellenwert. Es ist deren fundamentales Bewegungsgesetz; es liegt der galileischen Physik implizit, der cartesianischen und newtonschen explizit zugrunde. Doch gräbt man m. E. mit dieser Kennzeichnung noch nicht tief genug. Die Tatsache festzustellen reicht meiner Meinung nach nicht aus. Wir müssen sie verstehen und erklären.

Weshalb war die *neuzeitliche* Physik in der Lage, sich dieses Gesetz zu eigen zu machen? Wie wurde dieses Inertialprinzip, das uns so simpel und selbstverständlich erscheint, so simpel und selbstverständlich? Wie wurde, was den Griechen und Denkern des Mittel-

alters als offenbar falsch, ja absurd erschienen wäre¹¹, die Idee, daß ein einmal in Bewegung gesetzter Körper für immer fortfahren wird, sich zu bewegen, schließlich zu einer Wahrheit *a priori*!

Hier soll nicht der Versuch unternommen werden, die Gründe und Ursachen zu klären, welche die geistige Revolution des 16. Jahrhunderts hervorbrachten. Wir wollen uns darauf beschränken, zwei (miteinander verbundene) Züge zu beschreiben, die für die Geisteshaltung der neuen Wissenschaft charakteristisch sind: Zu der Zerstörung des Kosmos, mit der auch alle Überlegungen aus der Wissenschaft verschwinden, die auf diesem Begriff beruhen¹², tritt die Geometrisierung des Raumes, der als solcher, als homogener, abstrakter Raum der euklidischen Geometrie den qualitativ differenzierten und konkreten Welt-Raum der vorgalileischen Physik ablöst. Kurz: Was mit Galilei einsetzt, ist die geometrische Mathematisierung der Natur und damit die der Wissenschaft von der Natur.

Die Auflösung des Kosmos bezeichnet die Zerstörung der Vorstellung von einer hierarchisch geordneten, endlichen Welt, die qualitativ und ontologisch differenziert ist. An ihre Stelle tritt diejenige eines offenen, unbegrenzten, ja unendlichen Universums, das durch ein und dieselben universalen Gesetze geeint und beherrscht wird. Ein Universum, in dem alle Dinge auf derselben Seinsebene stehen, ganz im Gegensatz zur traditionellen Vorstellung mit ihrem Unterschied und Gegensatz der zwei Welten von Himmel und Erde. Die Gesetze des Himmels werden mit denen der Erde verschmolzen. Von nun an hängen Astronomie und Physik voneinander ab, werden vereinheitlicht und miteinander vereinigt.¹³ Das wiederum hat zur Folge, daß alle Betrachtungen aus dem (natur-)wissenschaftlichen Blickfeld verschwinden, in denen es um Wert geht, um Vollendung, Harmonie, Bedeutung, Zweck.¹⁴ Im unendlichen Raum des neuen Universums verlieren sich solche Betrachtungen. In dieser neuen Welt einer Geometrie, die zur Wirklichkeit gemacht wird, gelten die Gesetze der klassischen Physik, hier finden sie ihre Anwendung.

Ich wiederhole: Die Auflösung des Kosmos scheint mir die gründlichste Umwälzung zu sein, die der menschliche Geist vollbracht oder

erlitten hat, seit die Griechen den Kosmos erfanden. Eine so profunde, weitreichende Revolution, daß der Menschheit - mit wenigen Ausnahmen, darunter Pascal - ihre Tragweite und Bedeutung jahrhundertlang entging; noch heute wird sie häufig unterbewertet und mißverstanden.

Was also den Begründern der neuzeitlichen Wissenschaft aufgegeben war, war nicht nur die Kritik und Bekämpfung einiger fehlerhafter Theorien, die es zu korrigieren oder durch bessere zu ersetzen hieß, sondern etwas ganz anderes: Sie mußten eine Welt zerstören und sie durch eine andere ersetzen. Das ganze Gerüst unseres Intellekts mußten sie umbauen, seine Begriffe umbilden, eine neue Einstellung zum Sein entwickeln, eine neue Auffassung vom Wissen, von der Wissenschaft. Und dazu mußten sie sogar eine sehr natürliche Einstellung, nämlich die des gesunden Menschenverstands, durch eine andere ersetzen, die alles andere als natürlich war.¹⁵

Deshalb erforderte die Entdeckung der Dinge, der Gesetze, die heute so simpel, so kinderleicht erscheinen: Fallgesetz, Bewegungsgesetze, eine so langwierige und zermürbende, oftmals erfolglose Anstrengung einiger der größten Genies des Menschengeschlechts, eben die Anstrengung eines Galilei, die eines Descartes.¹⁶ Das wiederum scheint mir den neueren Versuch zu widerlegen, Galileis Originalität, zumindest aber den revolutionären Charakter seines Denkens zu schmälern oder gar zu leugnen. Und es zeigt, daß die scheinbare Kontinuität in der Entwicklung von der mittelalterlichen zur neuzeitlichen Physik, so emphatisch sie auch von Caverni und Duhem betont wird, eine Illusion ist.¹⁷

Zwar führt eine ungebrochene Tradition aus dem Werk der Pariser Nominaüstenschule in diejenigen Benedettis, Brunos, Galileis und des Descartes. (Zu der Geschichte dieser Tradition habe ich selber ein Bindeglied beigetragen.¹⁸) Doch der Schluß, den Duhem daraus zieht, ist irrig: Auch eine gut vorbereitete Revolution ist eine Revolution. Auch wenn Galilei in seiner Jugend die Ansichten der mittelalterlichen Kritiker des Aristoteles teilte und ihre Theorien lehrte (wie dies zuzeiten auch Descartes tat), so ist doch Galileis

Wissenschaft nicht von seinen »Pariser Vorgängern« inspiriert. Sie ist von ganz anderem Rang, einem Rang, den ich den archimedischen nennen möchte. Der wahre Ahnherr der neuzeitlichen Physik ist nicht Buridan, nicht Nicolaus von Oresme, auch nicht Johannes Philoponos, sondern Archimedes.¹⁹

I

Die Geschichte des naturwissenschaftlichen Denkens im Mittelalter und in der Renaissance, in die wir allmählich Einblick gewinnen²⁰, läßt sich in zwei Perioden einteilen. Weil aber die chronologische Ordnung dieser Zweiteilung nur sehr grob entspricht, gliedert man diese Geschichte besser *grosso modo* in drei Stufen oder Epochen, denen wiederum drei unterschiedliche Denkweisen korrespondieren. Diese drei Denkweisen sind erstlich die aristotelische Physik, zweitens die *imperws*-Physik, die wie alles andere ebenfalls der griechischen Antike entstammt und im Lauf des 14. Jahrhunderts von den Pariser Nominalisten ausgearbeitet wurde, und schließlich die der modernen mathematischen, archimedischen oder galileischen Physik.

Diese Etappen begegnen uns nun in den Werken des jungen Galilei, die uns somit nicht nur die Geschichte oder Vorgeschichte seines Denkens liefern, der Triebfedern und Motive, die es dominierten und inspirierten, sondern uns gleichzeitig ein prägnantes und lehrreiches, wie durch die bewundernswerte Geisteskraft des Autors verdichtetes und geklärtes Geschichtsbild der gesamten vorgalileischen Physik bieten. Verfolgen wir diese Geschichte kurz, beginnend mit der aristotelischen Physik.

Natürlich ist diese falsch und gänzlich überholt. Nichtsdestoweniger ist sie eine »Physik«, will heißen eine ausgearbeitete, wenn auch nichtmathematische, wissenschaftliche Theorie auf hohem Niveau.²¹ Keine kindische Phantasie, kein bloßes verbales Wiederkauen des gesunden Menschenverstands in neuer Form, sondern eine Theorie, also eine Lehre, die natürlich an gemeinhin bekannten

Sinnesdaten ansetzt, diese aber einer äußerst kohärenten und systematischen Behandlung unterwirft.²²

Die dieser Theorie zugrundeliegenden Daten sind sehr einfach, und praktisch nehmen wir sie ebenso an wie Aristoteles. Auch uns erscheint es »natürlich«, daß ein schwerer Körper sich »abwärts« bewegt; und wie Aristoteles oder Thomas von Aquin wären auch wir baß erstaunt, einen Stein oder einen Ochsen wie von selbst in die Luft gehen zu sehen. Das schiene uns ziemlich »unnatürlich«; und zur Erklärung würden wir nach der Wirkung eines verborgenen Mechanismus Ausschau halten.

Gleichermaßen »natürlich« finden wir es, daß eine Streichholzflamme »hoch« geht, daß wir Töpfe und Pfannen »aufs« Feuer stellen. Es nähme uns Wunder, drehte sich die Flamme plötzlich und zeigte nach »unten«. Ist all das kindisch und simpel? Vielleicht. Doch nach Aristoteles beginnt alle Wissenschaft eben dort, bei der Erklärung des natürlich Erscheinenden. Wenn aber ein Prinzip der Thermodynamik besagt, daß »Wärme« immer vom warmen auf einen kälteren Körper übergeht, aber nicht umgekehrt - wird da nicht einfach der intuitive Gemeinplatz übersetzt, daß ein »warmer« Körper »natürlich« kälter, ein kalter aber nicht von selbst »natürlich« warm wird? Und wenn wir behaupten, daß der Schwerpunkt eines Systems immer den niedrigstmöglichen Punkt einnimmt und nicht von sich aus aufsteigen kann - folgen wir da nicht derselben alltäglichen Intuition, die sich in der aristotelischen Physik als Unterscheidung zwischen »natürlicher« und »gewaltsamer« Bewegung niederschlug?²³

Nicht anders als die Thermodynamik überträgt auch die aristotelische Physik das eben bezeichnete »Faktum« aus dem gesunden Menschenverstand und beläßt es nicht bei ihm; überträgt es, so daß die Unterscheidung zwischen »natürlichen« und »gewaltsamen« Bewegungen eingebettet wird in eine umfassende Konzeption der physischen Realität. Als deren Hauptmerkmale erscheinen

- a) der Glaube an die Existenz qualitativ bestimmter »Naturen«,
- b) der Glaube an die Existenz eines Kosmos, d.h. an das Vorhan-

densein von Ordnungsprinzipien, kraft derer die Gesamtheit des real Seienden ein hierarchisch gegliedertes Ganzes bildet.

Das Ganze, die kosmische Ordnung und die Harmonie: Diese Begriffe beinhalten, daß die Dinge nach einer fest bestimmten Ordnung im Universum verteilt und angebracht sind oder es zumindest sein sollen; daß ihre Verortung weder für sie selbst noch für das Universum gleichgültig ist. Ganz im Gegenteil: seiner Natur gemäß hat jedes Ding seinen bestimmten, in gewisser Hinsicht seinen eigenen »Ort« im Universum.²⁴ Ein Platz für alles, und alles an seinem Platz: Das Konzept des »natürlichen Ortes« formuliert diesen theoretischen Anspruch der aristotelischen Physik.

Der Vorstellung vom »natürlichen Ort« liegt eine völlig statische Vorstellung von Ordnung zugrunde: Denn wäre tatsächlich alles »in Ordnung«, so wäre alles an seinem Ort und würde stets dort bleiben. Warum sollte es sich wegbewegen? Im Gegenteil, jedem Versuch der Verrückung würde Widerstand geleistet. Nur die Ausübung einer gewissen »Gewalt« könnte eine solche Vertreibung bewirken; der betreffende Körper aber würde diese rückgängig zu machen suchen.

Somit entspringt alle Bewegung einer Art kosmischer Unordnung, einer Störung des Weltgleichgewichts, ist entweder direkte Wirkung einer *Gewalt* aufs Seiende oder aber bereits dessen Reaktion darauf, der Versuch, entgegen der *Gewalt* wieder den natürlichen Ort der Ruhe aufzusuchen. Das, was wir »natürliche« Bewegung genannt haben, besteht just in dieser Rückkehr zur Ordnung.²⁵

Störung des Gleichgewichts - Rückkehr zur Ordnung: ganz offenkundig bildet die Ordnung einen festen, dauerhaften Zustand, der sich unbegrenzt auszuweiten strebt. Daher bedarf der Zustand der Ruhe keiner Erklärung, zumindest nicht der eines Körpers, der an seinem richtigen, natürlichen Ort ruht; die Ruhe erklärt sich aus seiner eigenen Natur. Es ist schlechthin die Natur der Erde, im Zentrum des Weltalls zu ruhen. Ebenso klar ist, daß die Bewegung notwendig vergänglich ist: natürliche Bewegung endet natürlich dann, wenn sie ihr Ziel erreicht hat. Der abnormen, gewaltsamen Bewegung gesteht Aristoteles keine Dauer zu, dazu ist er zu optimistisch. Außerdem ist

gewaltsame Bewegung Unordnung, welche Unordnung schafft, und wenn das unbegrenzt weitergehen könnte, so wäre die Idee des wohlgeordneten Kosmos hinfällig. Daher hält Aristoteles an der beruhigenden Vorstellung fest, *nihil contra naturam possit esse perpetuum*.²⁶

Die Bewegung ist also in der aristotelischen Physik ihrem Wesen nach ein vergänglicher Zustand. Buchstäblich genommen wäre diese Behauptung allerdings unrichtig, und das sogar in zweierlei Hinsicht: Zwar ist *für jeden der bewegten Körper* - zumindest soweit es sich um solche der sublunaren Welt handelt, also für die beweglichen Dinge unserer Erfahrung - die Bewegung ein notwendig vorübergehender, flüchtiger Zustand. Für das Weltganze jedoch ist sie ein notwendig ewiger Zustand, daher auch ein ewig notwendiges Phänomen.²⁷ Ein Phänomen, das ohne die Entdeckung seines Ursprungs und Grundes sowohl in der physischen als auch in der metaphysischen Ordnung des Kosmos unerklärlich bleibt. Eine solche Analyse ergäbe, daß die ontologische Struktur des materiellen Seins dieses daran hindert, jenen Zustand der Vollkommenheit zu erreichen, der im Begriff der absoluten Ruhe enthalten ist. Und weitergehend zeigte sie uns als letzte Ursache der zeitweiligen und veränderlichen Bewegungen der irdischen, sublunaren Körper die kontinuierliche, gleichförmige und ewige Bewegung der himmlischen Sphären.²⁸ Andererseits ist aber die Bewegung genaugenommen gar kein Zustand: sie ist ein Prozeß, ein Fluß, ein *Werden*, in dem und durch das die Dinge entstehen, sich verwirklichen und vollenden.²⁹ Zwar hat das Werden das Sein zum Zweck, kommt die Bewegung in der Ruhe zum Ziel. Doch diese unerschütterliche Ruhe eines vollständig verwirklichten Seins unterscheidet sich durchaus von dem plumpen, ohnmächtigen Stillstand eines bloß unbeweglichen Körpers. Der erste Zustand ist ein positiver, ist *perfectio* und *actus*, der zweite beschreibt einen Mangel. Die Bewegung - als *processus*, als Werden, als Veränderung - wird somit ontologisch zwischen diesen beiden Ruhezuständen angesiedelt. Sie umfaßt alles veränderliche Sein, ja sie besteht nur als solches, indem sie sich selbst verändert. Die berühmte aristotelische Definition der Bewegung, die Descartes vollkommen unverständlich fand, *actus entis in potentia in*

quantum est in potentia, bringt in bewundernswerter Form zum Ausdruck, daß Bewegung der *actus* ist, das Sein all dessen, was nicht göttlich ist.

Bewegung ist Veränderung, *aliter et aliter se habere*, sowohl Selbstveränderung als auch Veränderung in bezug auf anderes. Das erfordert wiederum einen Relationsbegriff, im Vergleich zu dem eigene oder relative Veränderungen erkennbar werden. Im Fall der Ortsbewegung³⁰ schließt das die Existenz eines unbeweglichen Bezugspunkts ein, eines Fixpunkts, relativ zu welchem sich das Bewegte selbst bewegt. Das kann offenbar nur das Zentrum des Universums sein.

Weil aber jede Veränderung, jeder Prozeß eine Ursache zu seiner Erklärung braucht, so braucht jede Bewegung einen Beweger, der sie erzeugt und für ihre jeweilige Dauer in Gang hält. Sie bleibt nicht wie die Ruhe aus sich heraus bestehen. Die Ruhe, ob als Mangel- oder als Endzustand, bedarf nicht des Wirkens einer Ursache, um ihre Fortdauer zu erklären. Für Bewegung hingegen, Veränderung für jeden Verwirklichungs- oder Verfallsprozeß, jedes Werden oder Vergehen ist ein solches Wirken unentbehrlich. Ohne Beweggrund kommt jede Bewegung zum Stillstand: *cessante causa cessat effectus*.³¹

Im Fall der »natürlichen« Bewegung ist diese Ursache, dieser Motor die Natur des Körpers selbst: seine »Form«, die ihn an seinen Ort zurückzubringen sucht und auf diese Weise die Bewegung in Gang hält. Umgekehrt benötigt die Bewegung, insofern sie *contra naturam* ist, das *kontinuierliche* Wirken eines *äußeren* Bewegers, der dem bewegten Körper verbunden sein muß. Ohne Beweger erlischt die Bewegung. Trennt man ihn nur vom Bewegten, erlischt sie ebenfalls. Bekanntlich lehnt Aristoteles jede Fernwirkung, jede Aktion auf Distanz ab³²; nur in der Berührung kann Bewegung übertragen werden. Das geht nur auf zweierlei Art und Weise: Druck und Zug. Nur durch Schieben oder Ziehen läßt sich ein Körper von der Stelle bewegen. Andere Möglichkeiten gibt es nicht.

Somit bildet die aristotelische Physik eine bewunderswerte und in sich vollkommen schlüssige Theorie, die abgesehen davon, daß sie falsch ist, nur einen einzigen Mangel hat: die Alltagshandlung des

Werfens steht im Widerspruch zu ihr. Doch den wahren Theoretiker schert der Einspruch des gemeinen Menschenverstands wenig. Stoßt er auf eine »Tatsache«, die nicht in seine Theorie paßt, so leugnet er sie. Und wenn er sie nicht leugnen kann, erklärt er sie. Und eben in der Erklärung des Wurfes, einer Bewegung, die trotz offenkundiger Abwesenheit eines »Bewegers« andauert, erweist Aristoteles seine Meisterschaft. Er erklärt die scheinbar motorlose Bewegung des Wurfgeschosses durch die Reaktion des vermittelnden Mediums, der Luft oder des Wassers.³³ Ein Geniestreich. Nur ist er leider falsch und obendrein, vom gemeinen Verstand aus beurteilt, vollkommen unvorstellbar. So war es kein Wunder, daß die Kritik der aristotelischen Dynamik immer wieder auf dieselbe *quaestio disputata* hinauslief: *a quo movemur projecta?* Was bewegt den Körper im Wurf?

2

Bevor wir auf diese *quaestio* zurückkommen, müssen wir noch auf ein Detail der aristotelischen Dynamik eingehen: die Verneinung des Vakuums und aller Bewegung darin. Denn gäbe es ein Vakuum in dieser Dynamik, so würde dies die Bewegung darin nicht erleichtern; im Gegenteil, es machte sie gänzlich unmöglich, und das aus gewichtigen Gründen.

Für die aristotelische Dynamik ist, wie bereits erwähnt, jeder Körper mit der Neigung versehen, seinen natürlichen Ort anzustreben und ihn wieder aufzusuchen, wenn er gewaltsam daraus vertrieben wurde. Daraus erklärt sich seine (natürliche) Bewegung: Es ist die, die ihn auf kürzestem und schnellstem Weg an seinen natürlichen Ort führt. Also verläuft *jede* natürliche Bewegung geradlinig und schnellstmöglich, so schnell, wie es die hinderliche, mehr oder weniger Widerstand leistende Umgebung erlaubt. Gäbe es deren Widerstand gegen die sie durchquerende Bewegung gar nicht, gäbe es nichts, was diese Bewegung aufhielte (was doch beim Vakuum der Fall wäre), so würde der Körper unendlich schnell, also augenblick-

lieh an »seinen« Ort gelangen.³⁴ Dies jedoch erscheint Aristoteles zu Recht als ganz unmöglich. Der Schluß liegt auf der Hand: Im Leeren kann es keine (natürliche) Bewegung geben. Was nun eine gewaltsame Bewegung wie etwa die des Werfens angeht, so gleicht jede Bewegung im Vakuum einer Bewegung ohne Beweger. Offensichtlich ist das Vakuum kein physisches Medium und kann eine Bewegung weder empfangen noch übertragen oder in Gang halten. Außerdem gibt es im Vakuum (etwa im Raum der euklidischen Geometrie) keine ausgezeichneten Orte oder Richtungen. Es gibt darin keine »natürlichen« Orte und kann sie gar nicht geben. Ein in ein Vakuum versetzter Körper wüßte nicht wohin und hätte keinen Grund, sich eher in diese als in irgendeine andere Richtung zu bewegen. Weshalb also sollte er sich überhaupt bewegen? Und bewegte er sich doch, so hätte er ebensowenig Ursache, eher hier als dort einzuhalten, und somit hätte er keinen Grund, überhaupt einzuhalten.³⁵ Beides ist vollkommen absurd.

Wieder hat Aristoteles völlig recht. Ein leerer Raum (wie der der Geometrie) sprengt jeden Begriff einer kosmischen Ordnung: in ihm gäbe es nicht nur keinen »natürlichen«³⁶, sondern gar keinen *Ort*. Die Idee des Vakuums verträgt sich nicht mit der Deutung der Bewegung als Veränderung und Prozeß, ja vielleicht nicht einmal mit derjenigen der konkreten Bewegung konkreter, »wirklicher«, wahrnehmbarer Gegenstände, eben jener unserer täglichen Erfahrung. Das Vakuum ist ein *non ens*³⁷; in solchem Nichtseienden reale Dinge unterbringen zu wollen ist absurd.³⁸ Im geometrischen Raum lassen sich nur geometrische Körper »orten«.

Der Physiker untersucht die Wirklichkeit, der Geometer sinnt über Abstraktionen nach. Daher besteht Aristoteles darauf, daß nichts gefährlicher ist, als Geometrie und Physik zu vermischen, als die reine geometrische Denkmethode aufs Studium der Natur anzuwenden.

Trotz oder gerade wegen ihrer theoretischen Perfektion hat die aristotelische Dynamik einen großen Nachteil: dem gesunden Menschenverstand bleibt sie völlig unplausibel, unglaublich und unannehmbar; sie widerspricht der gewöhnlichsten alltäglichen Erfahrung. Kein Wunder, daß sie nie allgemeine Anerkennung genoß und daß ihr die Kritiker und Gegner fortwährend die allbekannte Tatsache einer Bewegung entgegenhielten, die von ihrem Beweger getrennt fort dauert. Angefangen bei Hipparch und Philoponos über Johannes Buridan und Nicolaus von Oresme bis zu Leonardo da Vinci, Benedetti und Galilei wurden ständig die klassischen Beispiele solcher Bewegung ins Feld geführt, das sich weiterdrehende Rad, der fliegende Pfeil, der geworfene Stein.³⁹

Ich will hier nicht die traditionellen Argumente analysieren, die seit Johannes Philoponos⁴⁰ von den Verfechtern seiner Dynamik wiederholt worden sind. Sie lassen sich *grosso modo* in zwei Gruppen einteilen:

- a) Unwahrscheinlich sei die Annahme, daß vermittle der Reaktion der Luft ein großer und schwerer Körper bewegt werden könne, eine Kugel, ein sich drehender Mühlstein, ein Pfeil, der gegen den Wind fliegt. Das sind die stofflichen Argumente, im Unterschied zu den formalen:
- b) Der Luft würden widersprüchliche Eigenschaften zugeschrieben, die Doppelrolle des Behinderns und Verursachens der Bewegung. Die ganze aristotelische Wurftheorie sei illusionär, da sie das Problem bloß vom Körper auf die Luft verschiebe. Was als Fähigkeit aller anderen Dinge geleugnet werde, müsse nun der Luft zugeschrieben werden: eine Bewegung aufrechtzuerhalten, die doch von ihrer äußeren Ursache abgetrennt sei.

Warum soll man, so fragen sie, also nicht vermuten, daß der Beweger das Bewegte prägt, es mit etwas ausstattet, das es beweglich macht – *δυναμις*, *virtus motiva*, *virtus impresia*, *Impetus*, *Impetus impressus*, mitunter auch *forza* oder *motio*: Immer wird eine Art Macht oder Kraft

gedacht, die sich vom Beweger aufs Bewegte überträgt, die Bewegung fortsetzt, ja als deren Ursache erst hervorbringt.

Damit sind wir, wie Duhem selbst zugab, wieder beim gesunden Menschenverstand. Die Anhänger der *impetus*-Physik denken im Rahmen der Alltagserfahrung. Liegt es nicht auf der Hand, daß eine *Leistung* vonnöten, daß eine Kraft aufzubringen und zu verausgaben ist, um etwas zu bewegen, um etwa einen Karren zu schieben, einen Stein zu werfen oder einen Bogen zu spannen? Ist es nicht klar, daß diese Kraft es ist, die den Körper bewegt oder, besser, die macht, daß er sich bewegt? Wie sonst sollte der Körper denn den Widerstand der Luft und andere Hindernisse überwinden können?

In aller Breite, aber erfolglos diskutierten die mittelalterlichen Anhänger dieser Physik den ontologischen Status des *impetus*. Man versuchte, ihn ins aristotelische Schema einzufügen und ihn als *Form* oder eine Art *habitus*, oder, gleich der Wärme, als Qualität zu deuten: so bei Hipparch und Galilei. Diese Diskussionen verraten nur die dunstige und imaginäre Natur dieser Vorstellung, in der sich Alltagsverstand niederschlägt oder verdichtet.

Mehr noch als die aristotelische verträgt sich somit diese Auffassung mit jenen realen oder bloß vorgestellten »Tatsachen«, die die experimentelle Basis der mittelalterlichen Dynamik abgeben. Insbesondere mit jener allseits bekannten »Tatsache«, wonach ein Geschoß nach dem Abfeuern schneller wird und seine Maximalgeschwindigkeit erst nach der Trennung vom »Beweger« erreicht.⁴¹ Wer über ein Hindernis springen will, muß Anlauf nehmen. Ein gezogenes oder geschobenes Fuhrwerk beginnt langsam und dann allmählich schneller zu rollen; es nimmt ebenfalls »Anlauf« und kommt in Fahrt; jedes ballwerfende Kind, das ein Ziel fest treffen will, tritt vor diesem zurück, damit der Ball Schwung gewinnen kann. Die *impetus*-Physik hat hier keine Erklärungsschwierigkeiten; von ihrem Standpunkt her gesehen ist es ganz natürlich, daß der *Impetus* seine Zeit braucht, um sich des Körpers zu bemächtigen - genauso wie Wärme einen Körper nur allmählich durchdringt. Anders als in aristotelischer Sicht gilt in der *impetus*-Physik die Bewegung nicht mehr als ein

Prozeß der Verwirklichung. Wohl aber als Veränderung, und als solche muß sie durch das Wirken einer bestimmten Kraft oder Ursache erklärt werden. Der *Impetus* ist eben jene immanente Ursache, welche die Bewegung bewirkt. Der *Impetus impressus* bringt also die Bewegung hervor, er *bewegt* den Körper. Gleichzeitig aber überwindet er den Widerstand, den das jeweilige Medium der Bewegung entgegensetzt.

Bei einem so zweideutigen Begriff wie dem des *Impetus* ist es nur natürlich, daß die beiden Aspekte sich schließlich vermischen. Einige Anhänger dieser Theorie kommen zu dem Schluß, daß in gewissen Fällen wie etwa dem der Kreisbewegung der himmlischen Sphären oder, allgemeiner, der Bewegung einer auf planer Ebene rollenden Kugel oder, noch allgemeiner, in allen Fällen, in denen die Bewegung ohne äußeren Widerstand vonstatten geht, wie dies im Vakuum der Fall wäre, der *impetus* sich nicht abschwächt, sondern »unsterblich« bleibt. Das scheint dem Inertialgesetz sehr nahe zu kommen. Um so interessanter und wichtiger ist daher, daß Galilei, der uns in seiner Schrift *De Motu* eine der besten Darstellungen der *impetus*-Dynamik gibt, die Möglichkeit dieser Annahme entschieden abstreitet und auf der wesentlich vergänglichen Natur des *impetus* beharrt.

Damit hat er offenkundig recht. Wird nämlich die Bewegung als *immanente* - und nicht natürliche - Wirkung des *impetus* erklärt, so ist es absurd und undenkbar, daß die produzierende Ursache oder Kraft sich im Verlauf dieser Produktion nicht allmählich verbraucht. Unverändert kann sie nicht andauern, schon im nächsten Augenblick muß sie sich verringert haben, und so muß die Bewegung allmählich langsamer werden und zu Ende gehen.⁴² Folglich erteilt der junge Galilei uns eine wichtige Lektion. Er lehrt uns, daß die *impetus*-Physik zwar verträglich mit der Bewegung im *Vakuum*, mit dem Trägheitsprinzip aber genauso *unverträglich* ist wie die aristotelische Physik. Und er geht weiter, indem er zeigt, daß gleich dieser die *impetus*-Physik keine mathematische Behandlung trägt. Sie führt zu nichts. Sie ist eine Sackgasse.

Die *impetus*-Physik kam in den tausend Jahren, die Philoponos von Benedetti trennen, kaum voran. In den Werken des letzteren - aller-

dings noch klarer, konsequenter und bewußter in jenen des jungen Galilei - finden wir, offenkundig unter dem Einfluß des »übermenschlichen Archimedes«⁴³, einen entschiedenen Versuch, die Prinzipien der »mathematischen Philosophie«⁴⁴ auf die Physik anzuwenden.

Nichts ist lehrreicher als das Studium dieses Versuchs bzw. dieser Versuche - und ihres Scheiterns. Sie erweisen die Unmöglichkeit, die unbeholfene, vage und verwirrte Vorstellung des *Impetus* zu mathematisieren, d. h., in ein exaktes mathematisches Konzept zu überführen. Um in der Nachfolge der archimedischen Statik eine mathematische Physik auszubilden, mußte man diese Vorstellung gänzlich fallenlassen.⁴⁵ Ein neuer und origineller Begriff der Bewegung war zu bilden und zu entwickeln. Diesen neuen Begriff verdanken wir Galilei.

4

Wir sind so vertraut mit den Auffassungen und Prinzipien der neuzeitlichen Mechanik, oder besser: sind so sehr an sie gewöhnt, daß es uns fast unmöglich ist, die Schwierigkeiten zu sehen, die zu überwinden waren, um diese Prinzipien und Auffassungen zu etablieren. Sie erscheinen uns so simpel, so natürlich, daß wir die Paradoxa, die in ihnen stecken, nicht erkennen. Doch die bloße Tatsache, daß die größten menschlichen Geister, daß Galilei, Descartes sich diese Prinzipien nur unter Kämpfen zu eigen machen konnten, belegt, daß diese klaren und einfachen Begriffe der Bewegung oder des Raumes so klar und einfach, wie sie uns erscheinen, gar nicht sind. Oder nur klar und einfach von einem gewissen Standpunkt aus, in Verbindung mit gewissen Begriffen und Axiomen, ohne die sie ganz und gar nicht einfach sind. Vielleicht sind die Grundlagen der klassischen Mechanik aber auch zu klar und zu einfach - so klar und einfach, daß sie, gleich allen Grundbegriffen, sehr schwer zu fassen sind.

Bewegung und Raum — vergessen wir für eine Weile, was wir in der

Schule gelernt haben; besinnen wir uns darauf, was sie in der Mechanik bedeuten. Versetzen wir uns in die Lage eines Zeitgenossen Galileis, der an die Auffassungen der aristotelischen Physik gewöhnt ist; diese hat *er* in *seiner* Schule gelernt. Und nun begegnet er zum ersten Mal der neuzeitlichen Auffassung von der Bewegung. Was ist Bewegung? In der Tat etwas recht Seltsames. Etwas, das den Körper, der mit ihr versehen ist, in keiner Weise affiziert: Ob in Ruhe, ob in Bewegung, nichts ändert sich dadurch für den betreffenden Körper, auch in ihm selbst nicht. Beidem gegenüber verhält sich der Körper als solcher völlig indifferent.⁴⁶ Daher sind wir nicht imstande, einem bestimmten, für sich betrachteten Körper Bewegung zuzuschreiben. Ein Körper ist nur in Bewegung im Verhältnis zu einem anderen Körper, den wir als ruhend annehmen. Alle Bewegung ist relativ. Wir können sie daher *ad libitum* dem einen wie dem anderen der beiden Körper zuschreiben.⁴⁷

Bewegung scheint also eine Relation zu sein. Gleichzeitig ist sie aber ein *Zustand*, ebenso wie die Ruhe ein weiterer, dem ersteren ganz und gar entgegengesetzter ist. Zudem sind beides *Zustände von Dauer*.⁴⁸ Das berühmte erste Bewegungsgesetz, das Trägheitsgesetz, lehrt uns, daß ein sich selbst überlassener Körper auf ewig im Zustand der Ruhe oder Bewegung bleiben wird und daß wir eine Kraft aufwenden müssen, um einen Zustand der Bewegung in einen solchen der Ruhe zu verwandeln *et vice versa*.⁴⁹ Doch nicht jede Art von Bewegung ist derart mit ewigem Sein versehen, sondern nur die gleichförmige Bewegung entlang einer Geraden. Die neuere Physik, soweit wir wissen, bestätigt das: Ein Körper, der einmal in Bewegung versetzt ist, behält auf ewig seine Richtung und Geschwindigkeit bei, vorausgesetzt, er unterliegt nicht der Wirkung einer äußeren Kraft.⁵⁰ Darüber hinaus antwortet die neuere Physik auf die Entgegnung des Aristotelikers, daß ihm zwar die ewige Bewegung bekannt sei, und zwar als Kreisbewegung der himmlischen Sphären, er aber noch nie auf eine andauernde geradlinige Bewegung gestoßen sei: Natürlich nicht! Eine geradelinige, gleichförmige Bewegung ist ganz unmöglich; nur im Vakuum kann es sie geben.

Überlegen wir einmal - vielleicht werden wir dann mit dem Aristoteliker weniger streng ins Gericht gehen, der sich außerstande sah, diese unerhörte Idee zu fassen und anzunehmen, die Idee eines dauerhaften, substantiellen »Relationszustandes«, eine Konzeption, die ihm so abstrus, so unmöglich erschien wie uns die unseligen substantiellen Formen der Scholastik. Kein Wunder, daß der Aristoteliker baß erstaunt war angesichts des verblüffenden Versuchs, das Wirkliche aus dem Unmöglichen zu erklären - oder, was auf dasselbe hinausläuft, ein reales Sein durch ein mathematisches zu erklären. Denn wie gesagt: Diese Körper, die sich geradlinig durch den unendlichen, leeren Raum bewegen, sind keine *wirklichen* Körper, die sich im *wirklichen* Raum, sondern *mathematische* Körper, die sich im *mathematischen* Raum bewegen.

Und an die mathematische Wissenschaft, die mathematische Physik sind wir ebenso gewöhnt, empfinden nicht mehr das Seltsame des mathematischen Zugriffs auf das Sein, das paradoxe Wagnis von Galileis Äußerung, das Buch der Natur sei in geometrischen Zeichen geschrieben.⁵¹ Uns ist das ausgemachte Sache. Nicht so den Zeitgenossen Galileis. Daher geht es im *Gespräch über die zwei hauptsächlichsten Weltsysteme* gar nicht so sehr um den Gegensatz zweier Astronomien, als vielmehr um das Recht der Mathematik als Wissenschaft auf die mathematische Erklärung und Begründung der Natur, im Gegensatz zur nichtmathematischen Erklärung und Begründung, wie sie der gesunde Menschenverstand und die aristotelische Physik liefern. Wie ich in meinen *Etudes galileennes* gezeigt zu haben glaube, ist der galileische *Dialogo* tatsächlich nicht so sehr ein Buch, das von der *Wissenschaft* nach unserem heutigen Verständnis handelt, als ein solches, das von der *Philosophie* handelt — oder, um es richtiger zu sagen und einen oft mißbrauchten, doch altehrwürdigen Ausdruck zu verwenden: von der *Naturphilosophie*. Der Grund dafür ist einfach: Die Lösung des astronomischen Problems hängt ab von der Begründung einer neuen Physik - und das schließt wiederum die Antwort auf die *philosophische* Frage nach der Rolle der Mathematik bei der Begründung der Wissenschaft von der Natur ein.

Der Ort der Mathematik in der Naturwissenschaft, ihre Stellung und Rolle darin ist gewiß kein neues Problem. Ganz im Gegenteil; mehr als zweitausend Jahre lang war dies der Gegenstand philosophischen Denkens, Forschens und Erörterns. Kein Wunder, daß Galilei sich dessen bewußt war - hatte er doch als junger Student der Pisaner Universität Gelegenheit, aus seines Lehrers, des Francesco Bonamici, Vorlesungen zu entnehmen, daß die Frage nach der Rolle und dem Wesen der Mathematik den entscheidenden Stein des Anstoßes zwischen Aristoteles und Piaton abgibt.⁵² Und als er einige Jahre später selbst als Lehrer dorthin zurückkehrte, konnte er in seines Freundes und Kollegen Jacopo Mazzoni Buch über Piaton und Aristoteles nachgelesen haben, daß »keine andere Frage Anlaß zu edlerer und schönerer Spekulation gegeben hat... als diejenige, ob der Gebrauch der Mathematik in der *scientia physica* als Prüfstein und vermittelnde Beweisinstanz von Nutzen sei oder nicht, d. h., ob sie uns etwas einbringe oder gar gefährlich, schädlich sei«. Und Mazzoni fährt fort: »Es war bekanntlich der Glaube Piatons, daß die Mathematik sich ganz besonders für die physikalische Untersuchung eigne, daher er selbst viele Male Zuflucht zu ihr nahm, um physikalische Rätsselfragen zu erklären. Aristoteles war aber ganz anderer Ansicht, und er erklärte die Irrtümer des Piaton aus dessen allzu großer Wertschätzung der Mathematik.«⁵³

Bonamici und Mazzoni geben nur der *communis opinio* Ausdruck: Es wird deutlich, daß für das wissenschaftliche und philosophische Bewußtsein der Zeit die Gegnerschaft, genauer die Scheidelinie zwischen Aristotelikern und Piatonikern klar und deutlich war. Forderte man für die Mathematik einen höheren Rang, schrieb man ihr sogar einen realen Wert, eine führende Stellung in der Physik zu, war man Platoniker. Sah man hingegen in der Mathematik eine abstrakte Wissenschaft und schätzte sie aus diesem Grunde geringer ein als die Physik und Metaphysik, welche vom wirklichen Sein handeln, behauptete man insbesondere, die Physik bedürfe zu ihrer Grundlegung ausschließlich der Erfahrung und müsse sich ganz auf die Wahrnehmung verlassen, die Mathematik aber sich mit der Rolle

einer sekundären, einer Hilfswissenschaft begnügen, so war man Aristoteliker.

Es geht in dieser Diskussion nicht um Gewißheit - hat doch kein Aristoteliker je die Gewißheit geometrischer Lehrsätze oder Beweise bezweifelt -, sondern um das Sein; es geht auch nicht um die Verwendung der Mathematik in der physikalischen Wissenschaft - hat doch kein Aristoteliker je unser Recht abgestritten, zu messen, was meßbar, noch zu zählen, was zählbar ist. Es geht um die Struktur der Wissenschaft und somit um die Beschaffenheit des Seins selbst.

Dies sind die Dispute, auf die Galilei im Verlauf seines *Gesprächs* fortwährend anspielt. Simplicio, der Aristoteliker, betont daher gleich zu Beginn, »daß man in den Naturwissenschaften nicht immer Beweise von mathematischer Strenge zu erstreben braucht«.⁵⁴ Sagredo, der sich den Spaß erlaubt, ihn mißzuverstehen, antwortet: »Allerdings nicht, wenn diese unerreichbar ist - aber wenn sie möglich ist, warum nicht?« Natürlich. Wenn wir uns in Fragen, die die Natur betreffen, mathematisch notwendige Beweise verschaffen können, warum sollten wir's dann nicht versuchen? Aber - ist es möglich? Darum geht es. Und Galilei bringt am Seitenrand die wahre Meinung des Aristotelikers auf den Begriff: »Bei naturwissenschaftlichen Beweisen darf man nicht nach mathematischer Strenge streben.«

Man darf also nicht. Warum nicht? Weil es unmöglich ist. Weil die Natur der physikalischen Wirklichkeit qualitativ und unbestimmt ist und sich nicht mit der Härte und Präzision mathematischer Vorstellungen vereinbaren läßt. Daher erklärt der Aristoteliker Simplicio uns später, daß die Philosophie als Wissenschaft des Realen sich bei der Formulierung ihrer Theorien der Bewegung weder um Einzelheiten kümmern noch zu numerischen Bestimmungen Zuflucht nehmen müsse. Sie habe nichts weiter zu tun, als ihre Hauptkategorien zu entwickeln: natürlich, gewaltsam, geradlinig, kreisförmig, und ihre allgemeinen qualitativen und abstrakten Merkmale zu beschreiben.⁵⁵

Den heutigen Leser wird das kaum überzeugen. Warum sollte er

zugestehen, daß die Philosophie, was immer das auch sei, sich mit abstrakten und vagen Formulierungen begnügen müsse, statt den Versuch zu unternehmen, präzise und konkrete, allgemeingültige Gesetze aufzustellen? Warum soll dies so sein müssen? So unbekannt der Grund dieser Notwendigkeit für den Leser, so bekannt ist er Galileis Zeitgenossen gewesen. Qualität und Form galten ihnen als von Natur aus nichtmathematisch und daher mathematischer Behandlung unzugänglich; Physik ist keine angewandte Geometrie. Irdische Materie kann nie exakt mathematische Figuren aufweisen; die "Formen« »informieren« sie nie vollständig. Immer bleibt eine Lücke. Am Himmel sieht das anders aus, und deshalb ist mathematische Astronomie möglich. Aber Astronomie ist nicht Physik. Dies war Piaton entgangen, dies eben war sein und seiner Epigonen Irrtum. Schon der Versuch, eine mathematische Naturphilosophie zu entwickeln, ist nutzlos. Das Unternehmen ist zum Scheitern verurteilt, noch ehe es begonnen hat. Es führt nicht zur Wahrheit, es führt in die Irre.

«All diese mathematischen Spitzfindigkeiten«, erklärt Simplicio, »sind IM *abstracto* wahr. Wendet man sie aber auf wahrnehmbare und körperliche Dinge an, so gehen sie fehl.«⁵⁶ In der wirklichen Natur gibt es keine Kreise, keine Dreiecke, keine Geraden. Daher ist es nutzlos, die Sprache der mathematischen Zeichen zu erlernen: Piaton hin, Galilei her, das Buch der Natur ist so nicht geschrieben. Es ist nicht nur nutzlos, es ist sogar gefährlich: Je mehr sich der Geist an die Härte und Präzision des geometrischen Denkens gewöhnt, desto weniger wird er die bewegliche, veränderliche, qualitativ bestimmte Vielfalt des Seins erfassen können.

Das ist die aristotelische Haltung. Sie ist alles andere als lächerlich.⁵⁷ Ich zumindest halte sie für sehr sinnvoll. Du kannst nicht, hält Aristoteles Piaton entgegen, eine mathematische Theorie der Qualität begründen, nicht einmal eine der Bewegung. In den Zahlen bewegt sich nichts. Wer aber die Bewegung verkennt, verkennt die Natur: *igttorato motu igaoratur natum*. Und der Aristoteliker aus Galileis Tagen könnte hinzufügen, daß der größte unter den Nach-

folgen Piatons, der *divus* Archimedes selbst⁵⁸, nie mehr als eine Statik zu begründen vermochte. Keine Dynamik. Eine Theorie der Ruhe, nicht der Bewegung.

Der Aristoteliker hatte ganz recht. Eine mathematische Deduktion der Qualität ist unmöglich. Und wir wissen wohl, daß Galilei - und später aus denselben Gründen auch Descartes - gezwungen war, den Begriff der Qualität fallenzulassen, ihn für subjektiv zu erklären und aus dem Reich der Natur zu verbannen.⁵⁹ Damit war er zugleich gezwungen, die Sinneswahrnehmung als die Quelle der Erkenntnis fallenzulassen und die intellektuelle, ja die Erkenntnis *a priori* als einziges probates Mittel, um das Wesen des Wirklichen zu erfassen, auszugeben.

Das *posse* der Dynamik und der Bewegungsgesetze ist aber nur durchs *esse* zu beweisen.⁶⁰ Um zu zeigen, daß es möglich ist, mathematische Gesetze der Natur aufzustellen, muß man es tun. Einen anderen Weg gab es nicht, und Galilei war sich darüber völlig im klaren. Daher ist es die mathematische Lösung konkreter physikalischer Probleme, die den Simplicio endlich zu der Einsicht bringt, »daß das Studium der Probleme der Natur ohne die Mathematik ein unmögliches Unterfangen ist«.

Nunmehr sind wir wohl in der Lage zu verstehen, was Cavalieri meint, wenn er 1630 in einer signifikanten Passage seines *Specchio Ustorio* schreibt: »Wieviel die Kenntnis der mathematischen Wissenschaft beiträgt, die die berühmten Schulen der Pythagoräer und Platoniker zum Verständnis der physikalischen Dinge als höchst notwendig erachteten, das wird, so hoffe ich, in Kürze offenbar werden, wenn die neue Lehre von der Bewegung kund wird, die der vorzüglichste Prüfer der Natur angekündigt hat: Ich spreche von Herrn Galileo Galilei...«⁶¹

Verständlich ist jetzt auch der Stolz des Platonikers Galilei, der in seinen *Discorsi* ankündigt, er bringe »über einen sehr alten Gegenstand ... eine ganz neue Wissenschaft« und werde beweisen, was keiner zuvor bewiesen: daß die Fallbewegung dem Gesetz der Zahl un-

terworfen sei.⁶³ Bewegung gehorcht dem Gesetz der Zahl: Damit war der aristotelische Einwand widerlegt.

Offenkundig waren sich Vorgänger, Zeitgenossen und Schüler Galileis einig: Platonismus und Mathematik waren eins. Wenn daher Torricelli uns wissen läßt, »daß unter den freien Künsten *allein* die Geometrie den Geist übt und schärft und ihn in Friedenszeiten zur Zierde, im Kriege zum Schild des Staates werden läßt« und daß »*ceteris paribus* der geometrisch geschulte Geist mit einer ganz besonderen und *männlichen* Kraft ausgestattet sei«⁶⁴, so zeigt, ja bekennt und erklärt er sich damit als wahrer Schüler Platons. Darin folgt er getreu seinem Lehrer Galilei, der den Antonio Rocco in seiner schriftlichen Reaktion auf dessen *Philosophische Exerzitien* auffordert, den Wert der zwei rivalisierenden Methoden, der rein physikalischen, empirischen, und der mathematischen Methode selbst zu beurteilen »und zugleich zu entscheiden, wer logischer verfähre, Platon, für den ohne Mathematik die Philosophie nicht zu erlernen war, oder Aristoteles, der eben diesen Platon dafür tadelte, die Geometrie zu sehr studiert zu haben«⁶⁴.

Ich habe soeben Galilei als Platoniker bezeichnet. Niemand wird, so denke ich, daran zweifeln können, daß er einer ist.⁶⁵ Ja, er sagt es selbst. Ganz zu Anfang des *Dialogo* bemerkt Simplicio, daß Galilei, als Mathematiker, wohl zu den Zahlenspekulationen der Pythagoraer neige. Das gibt dem Angesprochenen die Gelegenheit, diese als für ihn völlig bedeutungslos zu erklären, zugleich aber zu bemerken: »Daß bei den Pythagoräern die Wissenschaft von den Zahlen im höchsten Ansehen stand, und sogar Platon den menschlichen Intellekt bloß darum bewunderte und ihn als gleichartig mit der göttlichen Vernunft betrachtete, weil er das Wesen der Zahlen begreife, ist mir wohlbekannt, ja, ich neige der nämlichen Ansicht zu.«⁶⁶

Wie hätte er anderer Meinung sein können? Glaubte er doch daran, daß im mathematischen Wissen der menschliche Geist zur Vollkommenheit göttlicher Erkenntnis gelangt! Sagt er doch: »*Extensive*, d. h., bezüglich der Menge der zu begreifenden Dinge, deren Zahl unendlich ist, ist der menschliche Verstand gleich Nichts, hätte er

auch tausend Wahrheiten erkannt; denn Tausend ist im Vergleich zur Unendlichkeit nicht mehr wie Null. Nimmt man aber das Verstehen *intensive*, insofern dieser Ausdruck die Intensität, Vollkommenheit in der Erkenntnis irgendeiner einzelnen Wahrheit bedeutet, so behaupte ich, daß der menschliche Intellekt einige Wahrheiten so vollkommen begreift und ihrer so unbedingt gewiß ist, wie es nur die Natur selbst sein kann. Dahin gehören die rein mathematischen Erkenntnisse, nämlich die Geometrie und die Arithmetik. Freilich erkennt der göttliche Geist sehr viel mehr mathematische Wahrheiten, denn er erkennt sie alle. Die Erkenntnis der wenigen aber, welche der menschliche Geist begriffen, kommt meiner Meinung nach an objektiver Gewißheit der göttlichen Erkenntnis gleich; denn sie gelangt bis zur Einsicht ihrer Notwendigkeit, und eine höhere Stufe der Gewißheit kann es wohl nicht geben.«⁶⁷

Der Menschenverstand ist, das könnte Galilei noch hinzugefügt haben, ein so gelungenes Gotteswerk, weil er *ab initio* im Besitz solcher klaren und einfachen Ideen ist, deren Einfachheit allein schon ihre Wahrheit garantiert. Der Verstand braucht nur in sich selbst zu gehen, um in der »Erinnerung« die wahren Grundlagen der Wissenschaft und der Erkenntnis zu finden, das Alphabet, d. h. die Elemente jener mathematischen Sprache, in denen die gottgeschaffene Natur sich ausspricht. Diese gilt es zu entdecken, den wahren Grund einer *realen* Wissenschaft, einer Wissenschaft der *wirklichen* Welt. Nicht einer solchen, die bloß formale Wahrheit besitzt, wie sie der mathematischen Beweisführung und Deduktion zu eigen ist. Die Nichtexistenz der untersuchten Objekte in der Natur würde eine solche Wahrheit gar nicht anfechten. Mit derartigem *Ersatz'* für reales Wissen hätte sich Galilei ebenso wenig wie Descartes jemals zufrieden gegeben.

Von dieser Wissenschaft, vom wahren »philosophischen« Wissen verkündet Galilei: »Ich sage Euch, wenn jemand die Wahrheit nicht aus sich heraus erkennt, so ist es unmöglich, daß ein anderer sie ihn

erkennen läßt. Ich kann Euch wohl Dinge lehren, die weder falsch noch wahr sind; die wahren oder notwendigen Dinge aber, d. h. solche, welche unmöglich anders sein können, weiß jeder halbwegs Vernünftige entweder von selbst, oder es ist unmöglich, daß er sie jemals wisse.«⁶⁸ So ist das. Ein Platoniker kann nicht anderer Meinung sein, denn Wissen ist für ihn nichts anderes als Verstehen.

Die im Werk Galileis so zahlreichen Anspielungen auf Piaton, auf die Methode der sokratischen Maieutik, auf die Lehre von der Wiedererinnerung, all das sind keine oberflächlichen Ornamente, die dem Wunsch entspringen, mit der literarischen Mode zu gehen, die dem intellektuellen Interesse der Renaissance an Piaton folgt. Hier soll nicht für die neue Wissenschaft um die Gunst des »Durchschnittslesers« gebuhlt werden, der von der trockenen aristotelischen Scholastik längst genug hat. Auch hängt sich Galilei gegenüber Aristoteles nicht den gewichtigen Mantel von dessen Lehrer und Rivalen um; vielmehr ist all das ernst zu nehmen, und zwar Wort für Wort. Keiner möge seinen philosophischen Standort im geringsten anzweifeln, darauf besteht Galilei:

»Salviati:

Die Widerlegung setzt die Bekanntschaft mit einigen Tatsachen voraus, die Ihr ebenso gut wißt und für richtig haltet wie ich. Ihr denkt aber nicht an sie, darum seht Ihr nicht, wie zu verfahren sei. Ohne daß ich sie Euch also erst lehre - Ihr wißt sie ja bereits -, werde ich sie Euch bloß in Erinnerung bringen und so bewirken, daß Ihr selbst den Einwand widerlegt.

Simplicio:

Ich habe mehrere Male auf Eure Weise zu diskutieren mein Augenmerk gerichtet und bin dadurch zu der Meinung veranlaßt, daß Ihr der platonischen Ansicht zuneigt, unser Wissen sei eine Art von Wiedererinnerung. Darum benehmt mir, bitte, diesen Zweifel und sagt mir, wie Ihr darüber denkt.

Salviati:

Was ich von der Ansicht Piatons denke, kann ich Euch einerseits mit Worten, andererseits aber auch durch Handlungen kund thun. Bei den bisher gepflogenen Diskussionen habe ich schon des öfteren meine Ansicht zu erkennen gegeben. Dieselbe Methode werde ich auch im vorliegenden Falle befolgen. Ihr werdet dann später an der Hand dieses Beispiels leichter verstehen können, wie ich mir die Aneignung von Erkenntnis denke.«⁶⁹

Das Beispiel »an der Hand« ist aber nichts anderes als die Deduktion der grundlegenden mechanischen Lehrsätze. So erfahren wir, daß Galilei sich nicht bloß als Nachfolger und Verfechter der platonischen Erkenntnislehre sieht. Außerdem glaubt er, ihre Wahrheit »durch Handlungen« bewiesen zu haben, durch ihre Anwendung, durch die Entdeckung der wahren physikalischen Gesetze, welche er von Sagredo und Simplicio und damit *vom Leser* selbst, von uns deduzieren läßt. *Dialogo* und *Discorsi* erzählen die Geschichte eines intellektuellen Experiments — das überzeugend wirkt, denn nachdenklich gesteht am Ende Simplicio die Notwendigkeit mathematischen Studiums und bereut, es in seiner Jugend nicht betrieben zu haben ...

In beiden Werken geht es um die Entdeckung oder besser: um die Wiederentdeckung der Sprache der Natur. Erklärt wird uns die Art, sie zu befragen, d.h. die Theorie jenes wissenschaftlichen Experimentierens, bei dem die Formulierung von Postulaten und die Ableitung ihrer Implikationen der Beobachtung vorangehen und sie anleiten. Auch das ist ein Beweis »durch Handlung«, jedenfalls für Galilei. Die neue Wissenschaft gilt ihm als experimenteller Beweis der platonischen Lehre.

ANMERKUNGEN

- 1 Vgl. dazu J. H. Randall Jr., *The Making of the Modern Mind*, Boston 1926, S. 220ff., 231ff., sowie A. N. Whitehead, *Science and the Modern World*, New York 1925.
- 2 Diese weitverbreitete Vorstellung ist nicht mit jener Bergsons zu verwechseln, dem alle Physik, die aristotelische wie die newtonsche, letztendlich das Werk des *komo faber* ist.
- 3 Vgl. L. Laberthonniere, *Etudes sur Descartes*, Paris 1935, Bd. II, S. 288ff., 297, 304: »physique de l'exploitation des choses«.
- 4 Bacon ist nicht Gründer, sondern Kunder, Herold, *buccinator* des neuen Wissens.
- 5 Natürlich war die cartesische und galileische Wissenschaft für Techniker und Ingenieure von größter Wichtigkeit; immerhin löste sie eine technologische Revolution aus. Doch erschaffen und entwickelt wurde sie weder von Ingenieuren noch von Technikern, sondern von Theoretikern und Philosophen.
- 6 "*Descartes artisan*«: Das ist die Auffassung, die Leroy in seinem Buch *Descartes social*, Paris 193], entwickelt hat. Und ganz absurd wird dieser Cartesianismus dann bei F. Borkenau, *Der Übergang vom feudalen zum bürgerlichen Weltbild*, Paris 1934, wo die cartesische Philosophie und Wissenschaft aus einer neuen ökonomischen Unternehmensform, nämlich der Manufaktur, abgeleitet wird. Weitaus interessanter und aufschlußreicher ist die Kritik dieses Buches: H. Grossmann, "Die gesellschaftlichen Grundlagen der mechanistischen Philosophie und die Manufaktur«, in: *Zeitschrift für Sozialforschung*, Paris 1935. Von L. Olschki, *Galileo und seine Zeit*, Halle 1927, und kürzlich erst wieder von E. Zilsel, »The Sociological Roots of Science«, in: *The American Journal of Sociology*, XLVII, 1942, wird Galilei in die Tradition der Handwerker, Baumeister und Mechaniker der Renaissance gestellt. Zilsel betont die Rolle, die die führenden Handwerker der Renaissance für die Prägung des neuen wissenschaftlichen Geistes gespielt haben. Natürlich ist die Kraft, die jene Künstler, Mechaniker und Baumeister in den Kampf gegen die aristotelische Tradition einbrachten, hoch einzuschätzen. Einige von ihnen, wie Leonardo da Vinci und Benedetti, versuchten gar, eine neue, antiaristotelische Bewegungslehre zu entwickeln. Diese Dynamik aber war, wie P. Duhem gezeigt hat, in ihren Hauptzügen jene der Pariser Nominalisten, die *impetus*-Dynamik von Johannes Buridan und Nicolaus von Oresme. Und wenn der bedeutendste dieser »Vorgänger« Galileis, Benedetti, zuweilen die Beschränktheit der »Pariser-Dynamik durchbricht, so nicht deshalb, weil er Mechaniker und Schütze gewesen war, sondern weil er den Archimedes gelesen und dessen Entschluß

- studiert hatte, die mathematische Philosophie« auf die Erforschung der Natur anzuwenden.
- 7 Ein wohlmeinender Kritiker wirft mir vor, diesen Aspekt der galileischen Lehre vernachlässigt zu haben; vgl. L. Olschki, »The Scientific Personality of Galileo«, in: *Bulletin of the History of Medicine*, XII, 1942. Ich glaube nicht so recht, diesen Tadel verdient zu haben, obgleich ich allerdings fest daran glaube, daß Wissenschaft im wesentlichen Theorie und keine Ansammlung von »Tatsachen« ist.
- 8 E. Meyerson, *Identite et realite*, Paris 1926, weist sehr überzeugend die mangelnde Übereinstimmung zwischen der »Erfahrung« und den Prinzipien der modernen Physik nach.
- 9 Vgl. Anm. 21, P. Dubem. S. mff.
- 10 Vgl. K. Lasswitz, *Geschichte der Atomistik*, Hamburg/Leipzig 1890, Bd. II, S. 23 ff.; E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, Leipzig ⁸1921, S. H7ff.; E. Wohlwill, »Die Entdeckung des Beharrungsgesetzes«, in: *Zeitschrift für Völkerpsychologie und Sprachwissenschaft*, Bd. XIV/XV, 1883/84, und E. Cassirer, *Das Erkenntnisproblem in der Philosophie und Wissenschaft der neueren Zeit*, Berlin ²1911, Bd. 1, 5.3 94 ff.
- 11 Vgl. E. Meyerson, *Identite...*, S. 124ff.
- 12 Das Wort bleibt uns natürlich erhalten: Noch Newton spricht vom Kosmos und seiner Ordnung (ebenso wie vom *Impetus*), meint aber etwas ganz anderes damit.
- 13 Wie ich schon in meinen *Etudes galileennes*, Teil III: »Galilee et la loi de l'inertie«, zu zeigen unternommen habe, resultiert die neuzeitliche Wissenschaft aus dieser Vereinheitlichung von Astronomie und Physik, die es ihr ermöglicht, die Methoden mathematischer Untersuchung, die zuvor nur dem Studium himmlischer Phänomene dienlich gewesen waren, auf das Studium der Phänomene der sublunaren Welt anzuwenden.
- 14 Vgl. E. Brethier, *Histoire de la philosophie*, Paris 1929, Bd. II, Heft i, S. 95.
- 15 Vgl. P. Tannery, »Galilee et les principes de la dynamique«, *a. a. O.*, S. 399.
- 16 Vgl. A. Koyré, *Etudes galileennes*, Teil II: »La loi de la chute des corps«.
- 17 Vgl. Caverni, *Storia del metodo sperimentale in Italia*, 5 Bde., Florenz 1891 — 1896, hier vor allem die Bde. IV und V; P. Duhem: *Le Mouvement absolu et le mouvement relatif*, Paris 1905; »De l'accélération produite par une force constante«, in: *Congres international de l'Histoire des Sciences*, III⁰ session, Genf 1906; *Etudes sur Leonard da Vinci: Ceux qu'il a tu et ceux qui l'ont tu*, 3 Bde., Paris 1909-1913, hier bes. Bd. III. Kürzlich erst hat auf brillante Weise J. H. Randall Jr. in dem Aufsatz »Scientific Method in the School of Padua«, in: *Journal of the History of Ideas*, I, 1940, die Kontinuitätsthese verfochten. Er legt die fortschreitende Entwicklung der Logik in der Renaissance dar, namentlich bei Zabarella, be-

merkt aber selbst, daß in dessen Formulierung seiner Methode »ein Element fehlt ...: er bestand nicht darauf, daß die Prinzipien der Naturwissenschaft mathematisch sein müßten« (S. 104), und daß Cremoninis *Tractatus de paedia* klingt »wie die feierliche Warnung der großen aristotelischen Tradition des rationalen Empirismus an die triumphierenden Mathematiker. Es ist aber gerade jenes »zur logischen Methodologie Zabarellas hinzugefügte Gewicht der Mathematik« (S. 205), das m.E. den Gehalt der wissenschaftlichen Revolution des 17. Jahrhunderts ausmacht. Die jeweilige Gewichtung der Mathematik machte für die zeitgenössische Meinung den Unterschied zwischen Aristotelikern und Piatonikern aus.

18 Vgl. A. Koyré, *Etudes galileennes*, Teil 1: »A l'aube de la science classique«.

19 Zumindest in der letzten Hälfte des 16. Jahrhunderts wird Archimedes rezipiert, studiert und allmählich begriffen.

20 Das verdanken wir vor allem den Arbeiten P. Duhems; zu den o. g. (Anm. 17) sind noch hinzuzufügen: *Les Origines de la statique*, 2 Bde., Paris 1905; *Le Systeme du monde*, 5 Bde., Paris 1913-1917. Weiter denen Lynn Thorndykes; vgl. seine monumentale *History of Magic and Experimente! Science*, 6 Bde., New York 1923-1941; sowie E.-J. Dijksterhuis, *Walen V/orp*, Groningen 1924.

21 Vgl. dazu P. Duhem, *De l'acceleration produite par une farce constante*, in: *Congres international de l'Histoire des Sciences*, III session, Genf 1906, S. 859. Dort präsentiert Duhem die aristotelische Physik als eine Theorie, die schlicht auf einer anderen mathematischen Formelsprache als der unseren beruhe. Das ist ein Irrtum: die aristotelische Physik ist ihrer Natur nach nichtmathematisch.

22 Der systematische Charakter der aristotelischen Physik wird vom modernen Wissenschaftshistoriker oftmals unterschätzt.

23 Vgl. dazu E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, Leipzig 1921, S. 124 ff.

24 Nur an »seinem- Ort gelangt ein Ding oder Wesen zu seiner Vollendung und kommt wirklich zu sich. Aus diesem Grunde strebt es danach, diesen Ort einzunehmen.

25 »Natürliche Orte«, »natürliche Bewegungen«: In diesen Vorstellungen steckt implizit diejenige eines endlichen Universums.

26 Aristoteles, *De Physica*, VIII, 8, 21 5 b.

27 Bewegung kann immer nur aus einer früheren Bewegung hervorgegangen sein. Jede gegenwärtige Bewegung impliziert demnach eine unendliche Reihe ihr vorgängiger Bewegungen.

28 Die einzige Bewegung, die in einem endlichen Universum unbegrenzt fort-dauern kann, ist eine kreisförmige.

29 Vgl. dazu Kurt Riezler, *Physics and Reality*, New Haven 1940.

30 Die Ortsbewegung ist nur eine, wenngleich besonders wichtige Form der »Be-wegung- (κίνησις), nämlich die im Räume - im Unterschied zur Selbstverän-

derung, zur qualitativen Bewegung und zu Zeugung und Verfall, der Bewegung im Bereich des Seins.

31 Aristoteles ist völlig im Recht: Kein Veränderungsprozeß, kein Werden kommt ohne eine Ursache aus. Wenn die heutige Physik der Bewegung Dauer zuzuschreiben vermag, so deshalb, weil dies kein Prozeß mehr ist.

32 Der Körper *strebt* an seinen natürlichen Ort, doch er wird nicht von ihm *angezogen*.

33 Vgl. Aristoteles, *De Physica*, IV, 8, 215 a; VII, 10, 267a; sowie *De Coelo*, III, 2, 310b. Vgl. auch E. Meyerson, *op. cit.*, S. 84.

34 Vgl. Aristoteles, *De Physica*, VI, 5, 249b, 250a; *De Coelo*, III, 2, 301 e.

35 Vgl. *De Physica*, IV, 8, 214b, 215b.

36 Wer mag, kann auch so formulieren: Im Vakuum sind alle Orte für jedwede Art von Körper natürlich.

37 Für Kant war der leere Raum ein »Unding«.

38 So dachten bekanntlich sowohl Descartes als auch Spinoza.

39 Zur mittelalterlichen Kritik an Aristoteles vgl. die in Anm. 17 genannten Werke, außerdem:

B. Jansen, »Olivi, der älteste scholastische Vertreter des heutigen Bewegungsbegriffs«, in: *Philosophisches Jahrbuch*, 1920; K. Michalsky, »La physique nouvelle et les différents courants philosophiques au XIV^e siècle«, in: *Bulletin International de l'Académie polonaise des sciences et des lettres*, Krakau 1927; S. Moser, *Grundbegriffe der Naturphilosophie bei Wilhelm von Occam*, Innsbruck 1932; E. Borchert, *Die Lehre von der Bewegung bei Nicolaus Oresme*, Münster 1934; R. Marcolongo, »La Meccanica di Leonardo da Vinci«, in: *Atti della reale accademia delle scienze fisiche e matematiche*, XLX, Neapel 1933.

40 Johannes Philoponos scheint der wirkliche Erfinder der Impetustheorie zu sein: vgl. dazu E. Wohlwill, »Ein Vorgänger Galileis im VI. Jahrhundert«, in: *Physicalische Zeitschrift*, VII, 1906; sowie P. Duhem, *Le Systeme du Monde*, I. Die Physik des Philoponos blieb, da nicht ins Lateinische übersetzt, der Scholastik unzugänglich, die nur über den kurzen Abriß des Simplicius verfügte. Die Araber aber kannten sie, und ihre Überlieferung scheint sowohl direkt als auch durch die Übersetzung Avicennas die »Pariser« Schule in bisher ungeahntem Maße beeinflußt zu haben. Vgl. dazu den sehr wichtigen Artikel von S. Pines, »Etudes sur Awhad al-Zahmān Abu'l Barakāt al-Baghdādī«, in: *Revue des Etudes Juives*, 1938.

41 Interessanterweise war dieser Glaube, den Aristoteles (*De Coelo*, II, 6) teilte und lehrte, so tief verwurzelt, so allgemein anerkannt, daß selbst Descartes ihn nicht rundweg abzustreiten wagte. Wie so oft, zog er es vor, ihn zu erklären. 1630 schreibt er an Mersenne:

»Je voudrais bien aussi savoir si vous n'avez point expérimenté si une

pierre jettee avec une fronde, ou la bale d'un mousquet, ou un traist d'arbaleste, vont plus viste et ont plus de force au milieu de leur mouvement qu'ils n'en ont au commencement, et s'ils fönt plus d'effet. Car c'est lä la creance du vulgaire, avec laquelle toutefois mes raisons ne s'accordent pas; et je trouve que les choses qui sont poussees et qui ne se meuvent pas d'elies meines, doivent avoir plus de force au commencement qu'incontinent apres.« (Adam-Tannery, Bd. I, S. 110) 1632 (*ibid.*, Bd. I, S. 259) und noch einmal im jähre 1640 (*ibid.*, Bd. II, S. 37ff.) erklärt er seinem Freund die Wahrheit seines Glaubens:

»i« *ttotu projectorum*, ie ne croie point que le Missile aille jamais moins vite au commencement qu'^T ä la fin, ä conter des le premier moment qu'il cesse d'etre pousse par la main ou la machine; mais je crois bien qu'un mousquet, n'estant eloigne que d'un pied et demi d'une muraille n'aura pas tant d'effet que s'il en etait eloigne de quinze ou de vingt pas, ä cause que la bale, en sortant du mousquet ne peut si aisement chasser l'air qui est entre lui et cette muraiüe et ainsi doit aller moins viste que si cette muraille estoit moins proche. Toutefois c'est ä l'experience de determiner si cette difference est sensible et je doute fort de toutes celles que je n'ai pas faites moi-meme.«

Descartes' Freund Beekmann hingegen leugnet schlicht die Möglichkeit einer Beschleunigung des Geschosses und schreibt am 30. April 1630 an Mersenne:

»Funditores vero ac pueri omnes qui existimant remotiora fortius ferire quem eadem propinquiora, certo certius falluntur.« Doch er gibt zu, daß etwas an diesem Glauben richtig sein muß, und versucht es zu erklären: «Non dixeram plenitudinem nimiam aeris impedire effectum tormentorii globi, sed puiverem pyrium extra bombardam jam existentem forsitan adhuc rarefieri, ideoque fieri posse ut globus tormentarius extra bombardam nova vi (simili tandem) propulsus velocitate aliquamdiu cresceret.» (*Correspondance du Pere Mersenne*, Paris 1936, Bd. II, S. 437).

42 Vgl. Galileo Galilei, De Mol» Gravi«»», in: *Opere*, Bd. I, S. 314 ff.

43 Galilei, *loc. cit.*, S. 300.

44 G. B. Benedetti, *Divenarum speculationum matkematicarum Über*, Taurini 1585, S. 168.

45 Auch bei Galilei und seinen Schülern, selbst bei Newton noch findet sich der Ausdruck. Doch das Beharrungsvermögen der Terminologie darf uns nicht darüber täuschen, daß die Idee des *impetus* verschwunden ist.

46 In der aristotelischen Physik ist die Bewegung ein Veränderungsprozeß und affiziert stets den sich bewegendenden Körper.

47 Ein gegebener Körper kann daher nicht mit einer beliebigen Anzahl verschiedener Bewegungen ausgestattet sein, ohne daß diese sich ins Gehege kom-

men. In der aristotelischen wie in der *impetus*-Physik überlagern und beeinflussen sich alle Bewegungen gegenseitig und verhindern einander mitunter auch.

- 48 Bewegung und Ruhe werden somit ontologisch gleichgestellt; dadurch wird die Dauer der *Bewegung* ebenso selbstverständlich und bedarf ebensowenig einer Erklärung wie zuvor die Dauer der *Ruhe*.

- 49 Modern gesprochen: In der aristotelischen oder der Pariser Dynamik produziert Kraft Bewegung, in der neuzeitlichen Dynamik hingegen Beschleunigung.

- 50 Das schließt die Unendlichkeit des Universums notwendig in sich.

- 51 Galileo Galilei, *Il Saggiatore*, in: *Opere*, Bd. IV, S. 232: -La filosofia è scritta in questo grandissimo libro, che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola.

Vgl. auch den *Brief an Liceti* vom 11. Januar 1641, *Opere*, Bd. XVII, S. 29?.

- 52 Das enorme Werk Bonamicis (1011 Seiten *in folio*) ist eine unschätzbare Quelle für das Studium mittelalterlicher Bewegungstheorien, von den Historikern des Galilei zwar oft *erwähnt*, aber nie genutzt. Das Buch ist sehr selten. Daher erlaube ich mir, des längeren daraus zu zitieren:

Francisci Bonamici, Florentini, e primo loco philosophiam ordinariam in Almo Gymnasio Pisano profitentis, *De Motu, libri X, quibus generalia naturae philosophiae principia summo Studio collecta continentur*, Florentiae 1591, lib. X, cap. XI. *jure mathematicae ex online scientiarum expurgantur*, S. 56: «... Itaque veluti ministri sunt mathematicae, nee honore dignae et habitae JtpoJiat-œia, id est apparatus quidam ad alias disciplinas. Ob eamque potissime causam, quod de bono mentionem facere non videntur. Etenim omne bonum est finis, is vero cuiusdam actus est. Omnis vero actus est cum motu. Mathematicae autem motum non respiciunt. Haec nostri addunt. Omnem scientiam ex propriis effici: propria vero sunt necessaria quae alicui [?] quatenus ipsum et per se insunt. Atqui talia principia mathematicae non habent. ... Nullum causae genus accipit ... propterea quod omnes causae definiuntur per motum: efficiens enim est principium motus, finis cuius gratia motus est, forma et materia sunt naturae; et motus igitur principia sint necesse est. At vero mathematica sunt immobilia. Et nullum igitur ibi causae genus existit.» *Op. cit.* lib. I, S. 54: »Mathematicae cum ex notis nobis et natura simul efficiant id quod cupiunt, sed caeteris demonstrationis perspicuitate praeponuntur, nam vis rerum quas ipsae tractant non est admodum nobilis; quippe quod sunt accidentia, id est habeant rationem substantiae quatenus subiiciuntur et deter-

minaCur quanto; eaque considerentur longe secus atque in natma existant. Attamen nonnullarum rerum ingenium tale esse comperimus ut ad certam materiam sese non applicant, neque motum consequantur, quia tamen in natura quicquid est, cum motu existit; opus est abstractione cuius beneficio quantum motu non comprehenso in eo munere contemplamur; et cum talis sit earum natura nihil absurdi exoritur. Quod item confirmatur, quod mens in omni habitu verum dicit; atqui verum est ex eo, quod res ita est. Huc accedit quod Aristoteles distinguit scientias non ex ratione notionum sed entium.«

- 53 Jacobi Mazzoni, Caesenatis, in Almo Gymnasio Pisano Aristotelem ordinarie Platonem vero extra ordinem profitentis, *In Universum Piatonis et Aristotelis Philosophiam Praeludia, sive de comparatione Plawnis et Aristotelis*, Venetiis 1597, S. 187ff.: »Disputatur utrūw HSMS mathematikamm inPhysica utilitatem vel detrimentum afferat, et in Uoe Piatonis et Aristoteles comparatio. Non est enim inter Platonem et Aristotelem quaestio, seu differentia, quae tot pulchris, et nobilissimis speculationibus scateat, ut cum ista, ne in minima quidem parte comparari possit. Est autem differentia, utrum usus mathematicarum in scientia Physica tanquam ratio probandi et medius terminus demonstrationum sit opportunus, vel inopportunus, id est, an utilitatem aliquem afferat, vel potius detrimentum et damnum. Creditur Plato Mathematicas ad speculationes physicas apprimere esse accommodatas. Quapropter passim eas adhibet in reserandis mysteriis physids. At Aristoteles omnino secus sentire videtur, erroresque Piatonis adscribit amoris Mathematicarum ... Sed si quis voluerit hanc rem diligentius considerare, forsitan, et Piatonis defensionem inveniet, videbit Aristotelem in nonnullos errorum scopulos impigisse, quod quibusdam in lods Mathematicas demonstrationes proprio consilio valde consentaneas, aut non intellexerit, aut certe non adhibuerit. Utramque conclusionem, quarum prima ad Piatonis tutelam attinet, secunda errores Aristotelis ob Mathematicas male rejectas profitetur, brevissime demonstrabo.«
- 54 Galileo Galilei, *Dialoge....* in: *Opere*, Bd. VII, S. 38; vgl. auch S. 256.
- 55 Galileo Galilei, *op. eh.*, S. 242.
- 56 *Op. rir.*, S. 229, 423.
- 57 Bekanntlich teilte sie Pascal und sogar noch Leibniz.
- 58 Es sei erwähnt, daß der gesamten doxographischen Tradition Archimedes als *philosophus platonieus* gegolten hat. (Die Doxographen waren griechische Gelehrte, die die Schriften der Alten nach Problemen geordnet sammelten; A. d. Ü.)
- 59 Vgl. dazu E. A. Burt, *The Metaphysical Foundations of Modern Physical Science*, London/New York 1925.
- 60 Anmerkung des Übersetzers: Mit *esse* ist hier nicht bloß die *mathematische Exi-*

stenz gemeint, die formal durch den sogenannten Existenzbeweis demonstriert wird, sondern die wirkliche *Existenz der Mathematik* im natürlichen Dasein. Diese Wirklichkeit der mathematischen Ideen muß im Dialog vermittelt der *dialektische techné* als *Wirksamkeit* offenbar werden, ist im praktischen Nachvollzug des physikalischen Denkens durch und am Gesprächspartner zu demonstrieren.

- ▷1 Bonaventura CavaÜeri, *Lo Specchio Ustorio overo imtato Delle Settoni Cottiche e alcuni loro mirabili effetti interna al Lume* etc., Bologna 1632. S. 152ff.: »Ma quanto vi aggiunga la cognitione delle scienze Mathematiche, giudicate da quelle famosissime scuole de' Pithogorici et de' >Platonici<, sommamente necessarie per intender le cose Fisiche, spero in breve sarà manifesto, per Ea nuova dottrina del moto promessaci dall'esquisitissimo Saggiatore della Natura, dico dal Sig. Galileo Galilei, ne' suoi Dialoghi...«
- 62 Galileo Galilei, *Discorsi edimostrazioni mathematiche ittorno a due nuove scienze*, in: *Opere*, Bd. VIII, S. 190: »... nullus enim, quod sdam, demonstravit. spatia a mobile descendente ex quiete peracta in temporibus aequalibus, eam inter se retinere rationem, quam habent numeri impares ab unitate consequentes.«
- 63 Evangelista Torricelli, *Opera Geometrien*, Florentiae 1644, Bd. II, S. 7: »Sola enim Geomctria inter liberales disciplinas acriter exaeuit ingenium, idoneumque reddit ad civitates adornandas in pace et in bello defendendas: caeteris enim paribus, ingenium quod exercitatum sit in Geometrica palestra, peculiare quoddam et virile robur habere solet: praestabitque semper et antecellet, circa studia Architecturae, rei bellicae, nauticaeque. etc.«
- 64 *Esercitazioni filosofiche di Antonio Rocco*, in: Galileo Galilei, *Opere*, Bd. VII, S. 744.
- 65 Einige Philosophie- und Wissenschaftshistoriker jüngerer Zeit haben den Piatonismus Galileis mehr oder weniger deutlich erkannt. So merkt der Autor der deutschen Übersetzung des *Dialoge* E. StTauss, den platonischen Einfluß (die Lehre von der Anamnesis) schon der ganzen Anlage des Werkes an (vgl. Galileo Galilei, *Dialogo* S. XLIX); E. Cassirer, *Das Erkenntnisproblem* S. 3 89 ff., besteht auf dem platonischen Charakter des galileischen Wissensideals; L. Olschki, *Galileo und seine Zeit*, spricht von Galileis "platonischer Sichtweise der Natur" usw. Die beste Beschreibung der metaphysischen Grundlage der neuzeitlichen Wissenschaft scheint mir von E. A. Burtt zu stammen (*The MetapUysical Foundations* ...). Leider entging Burtt Aufmerksamkeit die Existenz nicht nur einer, sondern *zweier* platonischer Traditionen: jene der mystischen Arithmologie und jene der Mathematik als Wissenschaft. Was in einem Fall noch eine läßliche Sünde, war im Fall seines Kritikers, E. W. Strong, *Procedures and Metaphysics*, Berkeley 1936, der den gleichen Irrtum beging, eine Todsünde. Zur Unterscheidung der beiden Pla-

tonismen vgl. L. Brunschvicg, *Les bñpes de la phiiosophie matkematique*, Paris 1922, S. 69ff.; ders., *Le progres de la comcimce dam la phiiosophieoccidentale*, Paris 1937, S. 37 ff.

- 66 Galileo Galilei, *Dialogo* ..., a.a.O., S. 11 (Genaugenommen ist es Salviati, der hier angesprochen ist und antwortet, der dritte, vermittelnde im Bunde des Gesprächs, der sich an dieser Stelle im Sinne Galileis zu Platon bekennt; A. d. Ü.).

67 *Op. Clf.*, S. 108.

68 *Op.cit.* S. 165.

69 *Op. Cil*, S. 201 i.

Das Experiment von Pisa

Fall-Studie einer Legende

Die Experimente von Pisa sind weithin bekannt. Viviani hat uns davon erzählt, und alle oder fast alle Historiker und Biographen Galileis haben seinen Bericht mehr oder weniger getreu weitergegeben. Für den durchschnittlich belesenen Menschen von heute ist Galileis Name fest mit dem Bild des schiefen Turms verbunden.¹

Die Biographen Galileis und darüber hinaus die Wissenschaftshistoriker messen den Experimenten von Pisa große Bedeutung bei. In der Regel sehen sie darin einen entscheidenden Augenblick im Leben Galileis: den Moment, da er sich *offen* gegen den Aristotelismus ausspricht und seinen *öffentlichen* Angriff auf die Scholastik startet. Außerdem sehen sie darin ein entscheidendes Moment in der Geschichte des wissenschaftlichen Denkens, nämlich das, da Galilei, kraft seiner von der Höhe des schiefen Turmes unternommenen Experimente zum Fall der Körper, der aristotelischen Physik den Todesstoß versetzt und die neue Dynamik begründet.

Hier nun einige Beispiele, die wir jüngsten Arbeiten entnehmen. Zitieren wir ganz zu Beginn einen italienischen Historiker, Angelo de Gubernatis. De Gubernatis sagt uns, daß es »in Pisa (war), wo Galilei seinen wissenschaftlichen Feldzug gegen Aristoteles beginnen sollte, zur großen Entrüstung seiner universitären Kollegen, insbesondere weil er, wie uns Nessi (Nessi, *Vita e Comwerão letterario di G. Galilei*, Lausanne 1793) berichtet, sich entschloß, öffentlich Experimente zum Fall und zur Abwärtsbewegung schwerer Körper durchzuführen, die er, in Gegenwart der Pisaner Professoren und Studenten, auf dem Glockenturm der Stadt mehrere Male wiederholte«.²

Eine ganz ähnliche Darstellung begegnet uns bei einem englischen

Historiker, J. J. Fahie. In seiner Darstellung der Arbeit des jungen Galilei an der Pisaner Universität schreibt Fahie: »An dieser Stelle müssen wir auf die berühmten Experimente zum Fall der Körper zu sprechen kommen, sind diese doch aufs engste verknüpft mit dem schiefen Turm von Pisa, einem der kuriosesten Baudenkmäler Italiens. Beinahe zweitausend Jahre zuvor hatte Aristoteles behauptet, daß im Falle zweier verschiedener Gewichte gleichen Materials, die aus gleicher Höhe fielen, das schwerere den Erdboden vor dem leichteren erreiche, und dies gemäß dem Verhältnis ihrer jeweiligen Schwere. Das Experiment ist gewiß nicht schwierig; nichtsdestoweniger war niemand auf die Idee gekommen, einen derartigen Beweis zu führen, weshalb diese Behauptung kraft des *ipse dixit* des Aristoteles unter die Axiome der Wissenschaft von der Bewegung aufgenommen worden war. Galilei nun forderte unter Berufung auf seine Sinneswahrnehmung die Autorität des Aristoteles heraus und behauptete, daß die Kugeln in gleicher Zeit fielen, abgesehen von einer unbedeutenden, auf dem unterschiedlichen Luftwiderstand beruhenden Differenz. Die Aristoteliker verspotteten diese Idee und verweigerten ihr das Gehör. Galilei aber ließ sich nicht einschüchtern und beschloß, seine Gegner dazu zu zwingen, gleich ihm der Tatsache ins Auge zu sehen. Daher bestieg er eines Morgens vor der versammelten Universität - Professoren und Studenten - den schiefen Turm, zwei Kugeln mit sich führend, eine zehn- und eine einpfündige. Er legte sie auf den Rand des Turms und ließ sie zugleich fallen. Und sie fielen gemeinsam und schlugen gemeinsam am Boden auf.«³

In einem achtzehn Jahre später veröffentlichten Artikel, der dem »wissenschaftlichen Werk Galileis« gewidmet war⁴, wiederholte Fahie den Bericht fast wortwörtlich. Hingegen fügte er, sowohl in Hinsicht auf Galilei selbst als auch auf die Naturwissenschaft im allgemeinen, eine genauere Erläuterung der Bedeutung dieses Experiments hinzu. In Hinsicht auf Galilei selbst: Nach dem glänzenden Erfolg seines Experiments «vernachlässigte» Galilei »den Luftwiderstand und verkündete kühn, daß alle Körper aus gleicher Höhe in

gleicher Zeit fielen ...« In Hinsicht auf die Naturwissenschaft im allgemeinen: »War auch Galilei... keineswegs der erste, der die Autorität des Aristoteles in Zweifel zog, so war er doch mit Sicherheit der erste, in dem der Zweifel eine tiefe und dauerhafte geistige Wirkung hervorrief. Der Grund dafür ist unschwer zu finden. Galilei kam im rechten Augenblick, vor allem aber kam er gerüstet mit einer neuartigen Waffe: dem Experiment.« Einen prächtigen, farbigen und lebhaften Bericht der Pisaner Experimente liefert uns auch jüngst der Historiker E. Namer: »Mit unglaublicher Kühnheit verwies Galilei den Aristoteles in die verstaubten Bücherregale der Bibliothek. Er schlug vor, das große Buch der Natur zu Öffnen und dessen Gesetze mit wachem Blick zu studieren ...« Nachdem Namer die Angriffe Galileis gegen Aristoteles und seine neuartigen, *auf dem Experiment* (mit Pendel, schiefer Ebene usw.) *beruhenden* Lehren dargestellt hat, fährt er fort: »Als Galilei erfuhr, daß alle anderen Professoren Zweifel an den Schlüssen des vermessenen Neuerers geäußert hatten, nahm er die Herausforderung an. Feierlich lud er die gelehrten Doktoren und die gesamte Studentenschaft, mit anderen Worten die gesamte Universität ein, um einem seiner Experimente beizuwohnen. Nicht aber im für diese üblichen Rahmen. Nein, das genügte ihm nicht. Draußen, auf dem weiträumigen Domplatz, unter offenem Himmel. Und der Lehrstuhl, der für diese Experimente angezeigt war, war der Campanüe, der berühmte schiefe Turm.

Die Pisaner Professorenschaft hatte wie die der anderen Städte gemäß der Lehre des Aristoteles stets behauptet, daß die Fallgeschwindigkeit eines gegebenen Objektes proportional zu dessen Gewicht sei.

So mußten etwa eine Eisenkugel von hundert Pfund Gewicht und eine andere, die nicht schwerer als ein Pfund wöge, so man sie im gleichen Augenblick aus gleicher Höhe fallen ließe, selbstverständlich den Erdboden zu verschiedenen Zeitpunkten berühren, und ganz eindeutig müsse die hundertpfündige den Erdboden als erste erreichen, eben weil sie schneller als die andere sei.

Galilei hingegen behauptete, daß die Gewichte nichts zur Sache

täten und daß alle beide den Erdboden im gleichen Augenblick erreichen würden.

Derartige Versicherungen inmitten einer so altherwürdigen, mit Weisheit gesegneten Stadt ausgesprochen zu hören war unerträglich, und man war der Ansicht, daß es nötig und dringlich sei, diesem jungen Professor, der eine so hohe Meinung von sich selbst hatte, einen öffentlichen Denkwort, eine Lektion in Selbstbescheidung zuteil werden zu lassen, deren er sich bis ans Ende seiner Tage erinnern würde.

Doktoren in langen Samtrocken und hohe Beamte, die sich wie beim Besuch einer Art Kirchweih auf dem Dorf vorkamen, hatten von ihren verschiedenen Tätigkeiten abgesehen, um sich unter die Vertreter der Universität zu mischen, bereit, sich über den Ausgang des Schauspiels zu mokieren, was immer dabei herauskäme.

Das vielleicht Eigenartigste an dieser ganzen Geschichte war, daß es keinem eingefallen war, das Experiment selbst anzustellen, bevor er diesen Schauplatz betrat. In den Augen der Studenten jener Zeit war das Wagnis, irgend etwas, das Aristoteles gesagt hatte, in Zweifel zu ziehen, nichts anderes als *Ketzerei*. Es war eine Beleidigung ihrer Lehrer wie ihrer selbst; sie wären in Ungnade gefallen und womöglich aus den Reihen der akademischen Elite ausgeschlossen worden. Diese Einstellung muß man sich ständig vor Augen führen, um das Genie des Galilei, seine denkerische Kühnheit, seinen praktischen Mut voll zu ermessen — und ebenso den tiefen Schlaf, aus dem das menschliche Bewußtsein zu erwecken war. Welche Mühe, welche Kämpfe waren nicht nötig, um einer exakten Wissenschaft zur Entstehung zu verhelfen!

Galilei stieg die Stufen zum schiefen Turm empor, ruhig und gefaßt, trotz des Gelächters und der Schreie aus der Menge. Er begriff die Bedeutung der Stunde wohl. Von der Höhe des Turms formulierte er noch einmal und ganz exakt die Frage. Wenn die fallenden Körper den Boden zu gleicher Zeit erreichten, so trüge er den Sieg davon; kämen sie aber zu verschiedenen Zeitpunkten an, so hätten seine Gegner Recht behalten.

Die strittigen Punkte waren nun allen vertraut. >Führe den Beweis!< hieß es.

Der Augenblick war gekommen. Galilei ließ die beiden Eisenkugeln los. Aller Augen sahen zu ihm auf. Stille. Und man sah die beiden Kugeln gemeinsam abgehen, gemeinsam fallen und gemeinsam den Boden berühren, am Fuße des Turms.«⁶

Diese Zitate und Beispiele könnten wir beliebig vermehren. Wir haben geglaubt, davon absehen zu können. Wozu sollten wir diese Darstellung unnötig beschweren?⁷ Überflüssig, denn überall fänden wir die gleichen Grundelemente wieder: den öffentlichen Angriff auf den Aristotelismus, das von der Höhe des schiefen Turmes öffentlich durchgeführte Experiment, den Erfolg dieses Experiments, der sich im gleich schnellen Fall der beiden Körper ausdrückt, die Verblüffung der Gegner, die jedoch allem Augenschein zum Trotz auf ihren traditionellen Ansichten beharren. Das Ganze »eingerahmt« oder, so man will, durch mehr oder weniger geglückte Federstriche ausgeschmückt, je nach Phantasie des Autors. Denn all diese Elemente, die den Bericht Fahies wie den Namen dramatisieren, sind schlicht und einfach von diesen erfunden, da die einzige Quelle, über die wir verfügen, der *Racconto istorko* von Vincenzo Viviani, kein Wort davon enthält.

Die »festen«, allen Autoren gemeinsamen Bestandteile, die wir soeben aufgeführt haben, stammen allesamt aus Vivianis Bericht. Allerdings hat schon Wohlwill gezeigt — und seinen Argumenten, die uns bereits vollkommen ausreichend erscheinen, werden wir noch weitere, entscheidende hinzufügen -, daß auch Vivianis Bericht über das Experiment von Pisa in der Luft hängt. *Die Experimente von Pisa sind ein Mythos...*

Und so lautet der Text Vivianis: »Zu jener Zeit (1589-1590) war er überzeugt, daß die Untersuchung der Kräfte in der Natur notwendig eine wahre Kenntnis der Natur der Bewegung erforderlich macht, getreu jenem zugleich philosophischen und ganz gewöhnlichen Grundsatz: *ignorato motu ignoratur natura*. Daher zeigte er — mit Hilfe von Experimenten, Beweisen und exakt begründeten Überlegungen

- zur großen Entrüstung aller Philosophen die Falschheit zahlreicher, die Natur der Bewegung betreffender Schlußfolgerungen des Aristoteles, Schlußfolgerungen, welche bis dahin für völlig klar und unbezweifelbar gehalten worden waren. So unter anderen die, daß bewegte Körper gleichen Stoffes, jedoch ungleichen Gewichts, die das gleiche Medium durchquerten, Geschwindigkeiten hätten, welche keineswegs proportional zu ihrer Schwere wären, wie Aristoteles behauptet hatte; sondern daß sich diese alle mit gleicher Geschwindigkeit bewegten. *Was er durch wiederholte Experimente demonstrierte, ausgeführt von der Höhe des Pisaner Glockenturms, in Gegenwart aller anderen Professoren und Philosophen sowie der gesamten Universität.* (Auch zeigte er,... daß ebensowenig die Geschwindigkeit eines einzelnen bewegten Körpers, der fallend verschiedene Medien durchquert, umgekehrt proportional zur Dichte dieser Medien seien; dies folgerte er ausgehend von offensichtlich absurden und der sinnlichen Erfahrung widersprechenden Konklusionen.«⁸

Es ist überflüssig, die Ausweitung zu monieren, die der nüchterne und kurze Text Vivianis von der Hand seiner Nachfolger erfahren hat. Und es wäre grausam, auf deren Irrtümern, deren Unverständnis zu insistieren.⁹ Die einfache Konfrontation genügt. Die Biographen Galileis haben Vivianis kurzen und nüchternen Bericht verschönert, »entwickelt«. Und niemand - mit Ausnahme erst Wohlwills - hat ihn in Zweifel gezogen.¹⁰ Dabei wäre man bei einigem Nachdenken, mit gesundem Menschenverstand, etwas historischem Wissen und einigen physikalischen Kenntnissen bald darauf gekommen, daß er unwahrscheinlich, mehr noch: daß er unmöglich ist. Wohlwill hat bereits hervorgehoben, daß man schon arg naiv und unwissend sein muß, was Sitten und Gebräuche der Universitäten und der Universitätslehrer angeht, um sich vorzustellen, die gesamte Professoren-schaft, gefolgt von der kompletten Studentenschaft, begäbe sich *im corpore* an einen Öffentlichen Platz, einzig und allein in der Absicht, einem lächerlichen Experiment beizuwohnen, zu dem der letzte, der jüngste, der rangniedrigste und schlechtestbezahlte Hilfsmagister von der letzten ihrer Fakultäten sie eingeladen hätte. Außerdem

reichte es nicht, die Lehren des Aristoteles anzuzweifeln, um »alle Philosophen« vor den Kopf zu stoßen. Seit hundert Jahren tat man doch nichts anderes! Auch die Argumente und Überlegungen, auf die Viviani anspielt, und mit deren Hilfe Galilei die »Schlüsse« des Aristoteles widerlegt haben soll¹¹, waren so unerhört nicht: Benedetti hatte sie seit langem vorgetragen und ausgeführt¹², und just zu Galileis Pisaner Professorenzeit legte ein »Philosoph«, Jacopo Mazzoni, sie, ohne Erstaunen oder etwa Aufruhr auszulösen, in aller Ruhe dar.¹³ Ein weiterer solcher Philosoph schließlich, Bonamici, ein guter Aristoteliker strenger Observanz, machte sich nichts daraus, seinen Zuhörern sämtliche Einwände, die er vermutlich anschließend widerlegte, vorzutragen, wie sie im Lauf der Jahrhunderte vor allem von den Pariser Nominalisten gegen die Lehre des Stagiriten ersonnen worden waren.¹⁴

Und wie kommt es denn, daß dieses so ungemein wichtige und entscheidende, mit so viel Aufwand inszenierte Experiment uns *einzig und allein* aus dem sechzig Jahre später entstandenen Bericht Vivianis bekannt ist? Weder die Freunde Galileis noch seine Gegner sprechen jemals davon. Nicht einmal er selbst. Nichts ist unwahrscheinlicher als ein solches Schweigen. Wir müßten ja annehmen, daß Galilei, der es sich nicht hat nehmen lassen, uns Experimente, die er sich bloß *erdacht* hatte, als *wirklich durchgeführte* zu schildern¹⁵ uns ein glanzvolles, wirklich angestelltes Experiment absichtlich verheimlicht hätte. Das ist zu unwahrscheinlich, als daß man es ernsthaft erwägen könnte. Die einzig mögliche Erklärung dieses Schweigens lautet: Daß Galilei das Experiment von Pisa nicht erwähnt, liegt daran, daß er es nicht gemacht hat, zu seinem Glück nicht — denn wenn er es angestellt hätte, und zwar mit der Beweisabsicht, die seine Biographen ihm unterstellen, wäre es ihm übel mißbraten.

In der Tat, was wäre geschehen, wenn? Wenn Galilei, wie dies seine Biographen seit Viviani wiederholen, wirklich von der Höhe des schiefen Turmes aus seine zwei Kugeln, die einpfündige und die zehn- oder hundertpfündige, hätte fallen lassen? Es ist schon merkwürdig, daß unseres Wissens keiner der Historiker, nicht einmal

Wohlwill, sich das je gefragt haben will. Aber begreiflich ist es schon. Die Historiker *glaubten* an die Erfahrung: Sie akzeptierten *en bloc* den gesamten Bericht Vivianis. Die Menschen des 17. Jahrhunderts waren skeptischer - und vielleicht nicht nur das. Wie dem auch sei - wenn Galilei das Pisaner Experiment nicht gemacht hat, so haben es doch andere getan. Mit Resultaten freilich, deren Kenntnis unsere Historiker in einiges Erstaunen versetzt hätte.

Wir brauchen nicht den *Raccovtto istorko* Vivianis abzuwarten, um belehrt zu werden, daß die Körper »beide mit gleicher Schnelligkeit fielen«. Hat nicht Galilei selbst im *Dialogo* geschrieben, daß »Kugeln von 1, 10, 100, 1000 Pfund Schwere« - im freien Fall - »die gleiche Strecke von 100 Ellen in gleicher Zeit zurücklegen«¹⁶? Und es fehlte nicht an solchen, die das für bare Münze nahmen: Baliani etwa, der 1639 in einem kleinen Werk des längeren ausführt, daß ihm dies Resultat lange vor Galilei bekannt gewesen sei (nie läßt er eine Gelegenheit für einen nicht nachprüfbaren Prioritätsanspruch aus) und daß er schon 1611 zu Rocca di Savona Experimente angestellt habe, bei denen er verschiedene Kugeln unterschiedlichen Gewichts und Stoffes, aus Wachs und aus Blei, habe fallen lassen, die gleich schnell niedergegangen seien und die Erde »im gleichen unteilbaren Augenblick« berührt hätten.¹⁷ Der Jesuit Niccolo Cabeo behauptet das nämliche.

Und gerade dessen Versicherungen waren es, die in Vincenzo Renieri, einem mathematischen Gelehrten der Pisaner Universität, den Wunsch nach der Probe aufs Exempel nährten. Der schiefe Turm bot sich dazu geradezu an. »Wir hatten die Gelegenheit«, so schreibt er Galilei, seinem Lehrer, »ein Experiment mit zwei schweren Körpern unterschiedlichen Stoffes zu machen, die aus gleicher Höhe fielen, einer aus Holz, der andere aus Blei, jedoch von gleicher Größe. Dies alles, da ein gewisser Jesuit geschrieben, daß sie in der gleichen Zeit fielen und mit gleicher Schnelligkeit zu Boden gingen ... Aber zum Ende entdeckten wir, daß es sich ganz anders verhielt. Von der Höhe des Glockenturms der Kathedrale bis zum Boden gewannen Bleikugel und Holzkugel voneinander schon beinahe drei

Ellen Abstand. Auch mit zwei Bleikugeln ward der Versuch gemacht, eine so groß wie eine gewöhnliche Artilleriekugel, eine andere von der Größe einer Musketenkugel; und als die dickere mit der kleineren von der Höhe desselben Glockenturms herabfiel, sah man diese größere der anderen um eine gute Handbreit voraus-eilen.«¹⁸

Cabeo indes läßt sich nicht beirren. Im Jahre 1646 bekräftigt er erneut, daß zwei Körper unterschiedlichen Gewichts, jetzt aber allemal gleichen Stoffes, mit gleicher Geschwindigkeit fielen und gleichzeitig aufschlugen. Was er durch zahlreiche und häufige Experimente ermittelt habe.¹⁹ Seinen Widersachern, die der Luft eine den Fall hemmende Kraft zuschreiben, entgegnet er, sie begriffen nicht, was sie sagten: Die Luft spiele überhaupt keine, weder die Schnelligkeit hemmende noch fördernde Rolle.²⁰ Solche Behauptungen konnten nicht unwidersprochen bleiben: Ein Mitbruder Cabeos, der Jesuit Giambattista Riccioli, machte sich ans Werk.

Nach hinlänglicher Darlegung der Schwierigkeiten, die im Falle einer so delikaten Materie wie jener des freien Falles schwerer Körper der Anstellung eines schlüssigen Experiments im Wege ständen²¹, berichtet Riccioli in seinem *Almagestum Novum* von den in Bologna, auf dem Torre degli Asinelli durchgeführten Versuchen.²² Dieser Turm, schief wie der Pisaner, war für jene Experimente besonders geeignet. Ja, unser Gelehrter versichert, er sei wie eigens für sie geschaffen gewesen. Viermal, im Mai 1640, im August 1645, im Oktober 1648, endlich im Januar 1650, ging man ans Werk und traf dabei alle erdenklichen Vorkehrungen. Fand aber heraus, daß zwei Tonkugeln, deren eine hohl war und nur zehn Unzen, deren andere, massive, aber zwanzig wog, zu verschiedenen Zeiten zu Boden gingen, obwohl sie gleichzeitig die Turmhöhe verlassen hatten. Und daß, *nota bene*, die leichtere fünfzehn Fuß zurückblieb.²³

Galilei aber braucht diese Resultate Renieris und Ricciolis nicht, um zu wissen, daß zwei Körper »gleichen Stoffs, aber unterschiedlicher Größe«, vom Turm »zusammen herabfallend«, sich nie »zusammen«

bewegen, nie »zusammen« zu Boden gehen werden. Denn das hatte er voraussehen können - ja, er hat es in der Tat vorausgesehen.

Seine Behauptung der gleichen Fallgeschwindigkeit aller Körper blieb von Baliani, Cabeo, Renieri und anderen unbegriffen. Sie gilt ihm nur für den *abstrakten*, aber *fundamentalen* Fall der Bewegung *im leeren Raum*.²⁴ Ganz anders verhält es sich bei der Bewegung im wirklichen, vollen Raum, also bei der Bewegung in der Luft, die nicht von absolut allen *impedimenta* frei verläuft, da sie den Luftwiderstand überwinden muß, welcher zwar klein, aber keineswegs zu vernachlässigen ist. In einer eigens diesem Problem gewidmeten längeren Darlegung in den *Discorsi*, die Renieri nicht gelesen oder nicht begriffen hatte²⁵, spricht sich Galilei mit wünschenswerter Klarheit aus.

Doch schon lange bevor er in den *Discorsi* seine Argumentation ausführte, wußte Galilei, daß der Luftwiderstand *grosso modo* der Oberfläche des Körpers proportional ist, also im Fall der Kugel sich mit dem Quadrat von deren Radius verändert, und daß die Schwere der Luft der Masse des Körpers proportional ist, sich also mit dem Kubus desselben Radius verändert, so daß für eine Musketenkugel der Luftwiderstand relativ größer ist als für eine Kanonenkugel. Schon in seinen Anfängen in Pisa hatte er es gewußt - und das ist keineswegs überraschend, hatte doch Benedetti längst alles erklärt.

Hätte Galilei seinerzeit mit dem Ergebnis rechnen können - und rechnen müssen —, daß unterschiedlich schwere Körper mit anderen Geschwindigkeiten fallen als jenen, die ihnen laut Aristoteles proportional zu ihrer Schwere zukämen, hätte er voraussehen müssen, daß die Musketenkugel, der leichtere Körper, viel schneller fällt, als sie eigentlich sollte - eins jedenfalls *konnte er nicht annehmen*: den gleichzeitigen Fall beider.

Das aber ist das letzte Argument gegen Galileis Pisaner Experiment: Diesen Versuch hat er nicht angestellt, ja er hat ihn sich nicht einmal vorgesellt. Damit sind wir am Schluß unserer kleinen Untersuchung angelangt. Die Moral aus ihr zu ziehen sei dem Leser überlassen.

ANMERKUNGEN

- 1 Die Geschichte des »Experiments von Pisa« ist mittlerweile unter das geistige Gemeineigentum geraten; man findet sie in Handbüchern und Reiseführern. So z.B. in A. CuviWiei, *Manuel de philosophie*, Bd. II, Paris 1932, S. 128.
- 2 A. de Gubernatis, *Galileo Galilei*, Florenz 1909, S. 9.
- 3 J. J. Fahie, *Galileo, His Life and Work*, London 1903, S. 24 f.
- 4 Ders., »The Scientific Work of Galileo«, in: *Studies in the History and Method of Science*, hrsg. von Charles Singer, Bd. II, Oxford 1921, S. 215.
- 5 Fahie, *op. cit.*, S. 216, § 8: »Public experiments on falling bodies«.
- 6 E. Namer, *Galileo, Searcher of the Heavens*, New York 1931, S. 28 f.
- 7 Noch erwähnt sei indes L. Olschki, *Galileo und seine Zeit*, Halle 1927.
- 8 Vincenzo Viviani, *Racconto istorico della vita di Galilei*, in: Galileo Galilei, *Opere*, Bd. XIX, S. 606.
- 9 So scheint auch niemand die Bedeutung der Tatsache begriffen zu haben, daß es sich um schwere Körper *gleicher Materie* handelt. Das aber ist der entscheidende Punkt; Denn in Pisa glaubt der junge Galilei noch - wie Benedetti -, daß schwere Körper unterschiedlicher Materie und spezifischen Gewichts mit *unterschiedlichen* Geschwindigkeiten fallen würden. Er hatte Recht!
- 10 Vgl. E. Wohlwill, »Die Pisaner Fallversuche«, in: *Mitteilungen zur Geschichte der Medizin und Naturwissenschaften*, Bd. IV, S. 229f.; ders., *Galileo Galilei und sein Kampf für die Kopernikanische Lehre*, Bd. II, Hamburg 1926, S. 260 ff. Die weiter oben zit. Werke sind alle erst nach Wohlwills Artikel erschienen.
- 11 Vincenzo Viviani spielt auf die Thesen an, die Galilei in seinen Aufsätzen über die Bewegung-De*Motu* -verficht, die in Pisa geschrieben und im ersten Band seiner Werke veröffentlicht wurden. Zu diesen Entwürfen vgl. P. Duhem, »De l'acceleration produite par une force constante«, in: *Congres international de l'histoire des Sciences*, III^e Session, Genf 1906, S. 807f.; E. Wohlwill, *Galileo Galilei...*, Bd. 1, S. 90- 9 5; A. Kovre, »A l'aurore de la science moderne«, in: *Annales de l'Universite de Paris*, 1935, Nr. 5, und 1936, Nr. i.
- 12 Vgl. G. B. Benedetti, *Diversarum speculationum mathematicarum Liber*, Taurini 1585. Vgl. die oben zit. Werke sowie P. Duhem, *Etudes sur Leonard de Vinci*, Bd. III, Paris 1919, S. 214 ff.
- 13 Vgl. J. Mazzoni, *In Universum Piatonis, et Aristotelis philosophiam praeludia*, Venetiis 1597, S. 192 f.
- 14 Vgl. F. Bonamici, *De motu*, Florentiae 1597, Buch IV, Kap. XXXVIII.
- 15 Zur Art der Experimente Galileis vgl. P. Tannery, »Galilee et les principes de la dynamique«, in: *Memoires scientifiques*, Bd. VI, S. 395 ff.; sowie bereits Caverni, *Storia del metodo sperimentale in italia*, Bd. IV, Florenz 1896, S. 290, 3 50; und E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, 1921, S. 12 5 ff.

- 16 Galileo Galilei, *Dialogo* ..., in: *Opere*, Bd. VII, S. 222. Galilei behauptet, den Versuch gemacht zu haben. Im übrigen ist es schwierig, ihn sich vorzustellen, wie er eine Kugel von 1000 (!) oder auch bloß 100 Pfund einen Turm hinaufträgt.
- 17 Giovanni Battista Baliani, *De motu gravium*, Genova 1639, Vorwort. Baliani gibt eine Erklärung, die nicht uninteressant ist. Er legt, wahrscheinlich in der Nachfolge Keplers, der bewegten Materie einen inneren Widerstand bei: *Gravia moveri huxta proportionem gravitatis ad materiam, et ubi sine impedimento naturaliter perpendiculari motu ferantur, moveri aequaliter, tñua ubi plus est gravitatis, plus pariter ut maxime*.
- 18 Vincenzo Renieri, Brief an Galilei vom 13. März 1641, in: Galileo Galilei, *Opere*, Bd. XVIII, S. 305.
- 19 Niccolo Cabeo, *Im libros metereologicos Aristotelis*, Romae 1646, Bd. I, S. 97.
- 20 *Op. dt.*, S. 68: "... aerem nihil efficere in isto motu nee pro nee contra velocitatem." Cabeo kann offenbar nicht begreifen, wie jene, die die Erklärung der Beschleunigung durch die Reaktion der Luft zurückweisen, dazu kommen können, ihrerseits einen Einfluß der Luft auf die Fallgeschwindigkeit geltend zu machen.
- 21 Zu Ricciolis Experimenten vgl. Cavemi, *Storia* ..., Bd. IV, S. 282, 312 319 et *passim*.
- 22 Riccioli erklärt, daß es beinahe unmöglich sei, so kleine Zeitdifferenzen direkt zu messen, und vermutet, daß Cabeo Fälle von zu kurzer Dauer beobachtet habe, also nicht habe bemerken können, was sich zugetragen; vgl. Giambattista Riccioli, *Almagestum NOVVM*, Bononiae 1651, Bd. II, S. 392.
- 23 Vgl. Riccioli. *op. cit.*, S. 387.
- 24 Andere haben es begriffen, so etwa Johannes Marcius, *De proportionem motus*, Pragae 1639, wenn er schreibt: »*Motum quatenus a gravitate procedit eisdem speciei seu gradus, eadem celeritate ferri in omnibus, quantumvis mole, figura, pondera a se differant*.« Er weiß wohl, daß dies nicht für die Bewegung gilt, die von jedem *impedimentum* frei vorgestellt wird, also diejenige in der Luftleere.
- 25 Vgl. Renieri, Brief an Galilei vom 20. März 1641; in: Galilei, *Opere*, Bd. XVIII, S. 310.

Kunst und Wissenschaft im Denken Galileis

Eine Antwort auf Panofsky

Panofsky wird es mir hoffentlich nicht übelnehmen - im großen und ganzen ist dies auch das einzige, was ich dem illustren Historiker anzukreiden habe —, wenn ich den Titel seiner Studie, *Galilei als Kritiker der Künste*¹, für verfehlt halte. Das ist zu eng gefaßt und läßt deren wirklichen Gegenstand nicht einmal errahnen, und damit auch nicht die Bedeutung dieser bemerkenswerten Arbeit. Er hätte besser daran getan, einen Untertitel folgen zu lassen: *Künstlerische Auffassung und wissenschaftliches Denken bei Galileo Galilei*.²

In der Tat beschränkt Panofsky sich nicht darauf, Galileis Verhältnis zur Literatur und zu den plastischen Künsten zu erörtern, uns über dessen Neigungen, Vorlieben und Urteile zu unterrichten. Er bietet uns nicht nur eine versierte Analyse der künstlerischen Auffassung Galileis, indem er die vollkommene Einheit und Kohärenz derselben nachweist. Er tut weitaus mehr: Er führt uns die vollständige Deckung von ästhetischer und wissenschaftlicher Grundhaltung vor Augen. Panofsky gelingt zweierlei: Er richtet ein gestochen scharfes Licht auf Persönlichkeit und Werk Galileis; darüber hinaus bringt er die *quaestio vexata* von dessen persönlichen und wissenschaftlichen Beziehungen zu Kepler ihrer Lösung ein Stück näher.

Galileis Ansichten zur Kunst und sein literarischer Geschmack sind nicht unbekannt. Man weiß z. B., daß er Ariost sehr bewunderte, wohingegen Torquato Tasso ihm zuwider war. Doch hat man seine Ideen nicht ernst genommen - wohl weil der Brief vom 26. Juni 1612 an Cigoli, in welchem er seine ästhetischen Ansichten darstellt, nach wie vor als apokryph gilt. Er ist uns nur als Kopie aus dem 17. Jahrhundert erhalten geblieben. Sieht man indes den Brief mit Panofsky

als authentisch an - woran, so denke ich, nach seiner einleuchtenden Beweisführung nicht mehr zu zweifeln ist -, berücksichtigt man fernerhin, daß Galilei nie von seinen Meinungen abgewichen, sondern seiner ästhetischen Stellungnahme treu geblieben ist, so kann man diese nicht mehr als bedeutungslos abtun. Die Untersuchung hat ihr also aufmerksam Rechnung zu tragen:

»Wir können seine *Considerazioni al Tusso* nicht als Produkt historischer Umstände erklären; denn viele ehrbare Zeitgenossen hegten ganz entgegengesetzte Ansichten. Auch können wir dies Werk nicht als >Jugendirrtum< abtun, »inspiriert durch den wuchernden Rationalismus einer naiven und einseitigen wissenschaftlichen Haltung-, Hier sei vielmehr der Versuch gemacht, diesen denkwürdigen Schluß wenn schon nicht umzukehren, so doch umzubilden: im Sinne einer Komplementarität. Soll Galileis wissenschaftliche Haltung sein ästhetisches Urteil inspiriert haben, dann gilt auch umgekehrt, daß seine ästhetische Einstellung Einfluß auf seine wissenschaftlichen Überzeugungen genommen hat. Genauer lautet die These: Sowohl als Wissenschaftler wie als Kritiker der Künste folgt Galilei denselben bestimmenden Tendenzen.«³

Diese »Tendenzen«, selbst soweit sie Galileis Persönlichkeit kennzeichnen, waren nicht rein individuellen Ursprungs. In ihnen reflektiert sich eine geistige Bewegung, die die Historiker vollkommen mißverstanden haben. Nennen wir gleich einen der größten und einflußreichsten : H. Wölfflin, der den Stil des 17. Jahrhunderts als scharfen Gegensatz zum Stil der Hochrenaissance darstellt.⁴ Dazu bemerkt Panofsky, daß sich zwischen 1590 und 1615 zwar eine Reaktion formiere, diese aber richte sich gegen den Manierismus der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts, nicht gegen die vorhergehende Hochrenaissance, der man sich weit stärker als die unmittelbar vorhergehende Generation verbunden fühle und deren Wert man wiederzufinden suche - »auf die man zurückblickte nach Art eines jungen Mannes, der im Streit mit seinem Vater liegt und von seinem Großvater Unterstützung erwartet.«⁵ Panofsky fährt fort: »Galilei, geboren 1564, am Todestag Michelangelos, war Augenzeuge der Bewegung

gegen den Manierismus, und auf welcher Seite er dabei stand, läßt sich erraten. Sein *fidus Achates*, Cigoli, spielte in Florenz die gleiche Rolle wie Domenichino und die Caracci in Rom. Mit einem guten Freund der letzteren, Giovanni Battista Agucchi, hatte sich Galilei selbst angefreundet, und eben jener war der Schöpfer einer kunst-historischen Theorie ... Ihr zufolge hatte Annibale Caracci, zurückgreifend auf die großen Meister der Hochrenaissance, die Malerei von plumpem Naturalismus ebenso wie von trügerischem Manierismus errettet und es vollbracht, Idee und Wirklichkeit zu einem *beau ideal* zu verschmelzen.«⁶

Ganz deutlich heißt es bei Panofsky: »Dieser große Physiker und Astronom wuchs eher in einer humanistisch-künstlerisch denn wissenschaftlich geprägten Umgebung auf. Als Sohn eines bekannten Musikers und Musiktheoretikers erhielt er eine ausgezeichnete künstlerisch-literarische Ausbildung. Die meisten lateinischen Klassiker kannte er auswendig. Er schrieb nicht nur selbst Gedichte, ernsthafte ebenso wie heiter-ausgelassene nach Art seines großen Freundes, des Satirikers Francesco Berni, sondern widmete >mehrere Monate oder gar Jahre< einem Kommentar zu Ariost - dem er nach eigenen Worten alle *chiarezza* und *evidenza* schuldete, die sein eigener Stil des Italienischen aufweisen mochte - und einem sorgfältigen Vergleich von Ariosts *Orlando furioso* und Tassos *Gerusalemme liberata*« - was ihm zur begeisterten Eloge des ersteren, zu einem grimmigen Verriß des letzteren geriet. »Selbst ein großartiger Zeichner, liebte und verstand er >alle der Zeichnung untergeordneten Künste< und begegnete ihnen >mit vollendetem Geschmack<. Wenn wir seinen Biographen« - N. Gherardini und V. Viviani - »Glauben schenken, so neigte er anfänglich viel mehr zum Studium der Malerei als zu dem der Mathematik ...«⁷

Was auch immer von diesem letzteren Zeugnis zu halten ist, fest steht, daß Galilei in Fragen der Kunst und Ästhetik keineswegs als Dilettant zu betrachten ist und auch seinen Zeitgenossen nicht als solcher gilt. Ganz im Gegenteil. Als sein Freund, der Maler Cigoli, sich in Rom in den ewigen Streit um den Vorrang der Malerei bzw. der

Skulptur verwickelt sieht, ist es Galilei, den er bittet, ihn mit den nötigen Argumenten zugunsten seiner Kunst zu versehen. Interessanterweise gleicht das, was Galilei geltend macht, völlig der früheren Argumentation Leonardo da Vincis, die ihm sicherlich unbekannt gewesen ist und zu der er gleichsam automatisch zurückfindet. Wie sein großer Vorläufer gründet er sein Urteil auf den Vorrang des Gesichts vor dem Tastsinn - und auf den Vorrang der malerischen *Versinnbildlichung* gegenüber der bloßen *Nachahmung* der Bildhauerei.

Nicht nur hierin erweist er sich als der klassischen Renaissance verpflichtet; auch innerhalb der Bildniskunst schätzt und verteidigt er Klarheit, Frische und die ausgewogene Komposition der Hochrenaissance; zuwider ist ihm das manieristisch Überladene und Übertriebene, das er bekämpft, die Verdrehungen, Allegorismen, die fließenden Übergänge zwischen den Genres. Diese Vorlieben und Abneigungen erhellen nun seine Kritik an Tasso, drückt er sich in ihr doch ständig in »Bildern, die den visuellen Künsten entlehnt sind«, aus: »... für Galilei war die Wahl zwischen den beiden Poeten nicht nur von vitalem persönlichen Interesse — ihre Bedeutung ging weit über eine rein literarische Kontroverse hinaus. Er sah in ihrem Gegensatz weniger zwei divergente Auffassungen von Poesie als vielmehr zwei antithetische Einstellungen zum Leben und zur Kunst schlechthin ...«⁸

»Nach seiner Meinung«, so Panofsky weiter, »zwingt das allegorische Gedicht ... den Leser dazu, alles und jedes als abgründige Anspielung auf anderes zu interpretieren, und erinnert so an jene perspektivistischen Trickbilder, die als >Anamorphosen< bekannt sind. Diese, sagt Galilei, >zeigen eine menschliche Gestalt aus der Seitenansicht, von einem eindeutig bestimmten Standort aus; sieht man sie aber von vorn an, so wie wir dies gewöhnlich und natürlich mit anderen Bildern tun, so zeigt sich nichts als ein Gewoge von Linien und Farben, in dem wir mit rechter Mühe Schemen von Flüssen, kahlen Stränden, Wolken oder seltsam zwittrige Gestalten ausmachen.- Gelänge es der allegorischen Poesie nicht, >auch nur den geringsten Anschein von Anstrengung zu vermeiden«, so zwänge sie nach Meinung

Galileis in ganz ähnlicher Weise -der geläufigen Erzählung, die von Natur aus offen einsichtig und direkt zugänglich ist... eine allegorische Bedeutung auf, die aus der Schräge sichtbar und zugänglich ist die uns also -in extravaganter Manier die Sicht versperrt durch lauter phantastische, chimärische und überflüssige Einbildungen«⁹

»Doch nicht nur aufgrund dieses Vergleichs der >allegorischen< Methode Tassos mit der perspektivischen Anamorphose sieht Galilei den *Orlando furioso* (beendet um 1515) ganz im Licht der klassischen Kunst der Hochrenaissance, Tassos Werk (vollendet um 1575) aber im Licht des Manierismus. Gleich zu Beginn der *Comidemiotti*«, behauptet Panofsky, »wird der Kontrast zwischen beiden in Begriffe gefaßt, die sich ohne weiteres wörtlich auf zwei Bilder übertragen ließen, Raffaels *Madonna di Foligno* und Vasaris *Unbefleckte Empfängnis*.«¹⁰ Doch könne man auch irgendeinen Giorgione oder Tizian mit irgendeinem Bild aus dem Œuvre Bronzinos oder des von Tasso favorisierten Francesco Salviati vergleichen. Galilei schreibt nämlich, daß Tassos Erzählweise »mehr an ein Intarsienbild erinnert als an ein Ölgemälde. Das Intarsienbild besteht aus kleinen verschiedenfarbigen Holzstückchen, die nie und nimmer so zart miteinander zu vereinen sind, daß deren Umrisse sich aus der Vielfalt der Farben nicht scharf und schneidend abheben: das muß die Formen und Gestalten trocken und hart machen, ohne Rundungen und ohne Tiefe. In der Ölmalerei jedoch löst man die Umrisse sanft auf, geht ohne Schroffheit von einer Farbe in die andere über, daher das Bild weiche Rundung und Kraft erhält und überall an Tiefe gewinnt... Ariost schattiert und modelliert runde Formen ... Tassos Arbeit ist trockenes Stückwerk ...«¹¹

Genau diese - vollkommen analoge - >klassische< Grundhaltung, das Bestehen auf Klarheit, Nüchternheit, Trennung der Genres, finden wir in Galileis wissenschaftlicher Arbeit wieder. Wir finden sie wieder in seiner Abneigung gegen die Zahlenspekulation, sei sie biblisch oder pythagoräisch, gegen die Symbolisierung, gegen ver menschlichende oder vergöttlichende Vergleiche in der Beschreibung des Kosmos. Diese wurden sowohl von seinen Gegnern ange-

strengt, die der Entdeckung der »mediceischen Planeten«¹² die eminente Bedeutung der Zahl *Sieben* entgegenhielten, als auch von seinen Anhängern, die die *Vier* im Schild führten und von ihr behaupteten, sie spiegele das vierfältige Wesen Gottes, der Welt und des Menschen wider (Geist, Seele, Natur und Materie oder Körperliches). Und ebensowenig hält Galilei von der Anwendung animistischer Vorstellungen in Astronomie oder Physik. Diese Abneigung läuft vollkommen parallel zu einer Gegnerschaft zum literarischen und bildnerischen Manierismus, deren Bedeutung und Tiefe Panofsky uns verdeutlicht. Und eben dieser >Klassizismus< Galileis scheint nun einiges Licht auf sein rätselhaftes Verhältnis zu Kepler zu werfen: »Nicht nur in seinen früheren Arbeiten hat Galilei die fundamentalen astronomischen Entdeckungen Johannes Keplers ignoriert, sondern auch im *Dialog über die zwei hauptsächlichsten Weltsysteme* von 1632, jenem Werk, das ihn zeit seines Lebens zum Opfer, den kommenden Zeitaltern aber zum Symbol intellektueller Freiheit werden ließ. Das ist bekannt und doch verblüffend - war dieser doch sein unerschrockener Waffenbruder im Kampf um die Anerkennung des kopernikanischen Systems, sein Kollege in der *Accademia dei Lincei*, unterhielten beide doch ein Verhältnis des Vertrauens und der gegenseitigen Wertschätzung.«¹³

Galileis angebliche Unkenntnis des Keplerschen Werks kann diese erstaunliche, ja verstörende Tatsache wirklich nicht erklären. Es ist schwerlich glaubhaft, daß Galilei von den Arbeiten des »kaiserlichen Mathematikers« keine Kenntnis hatte, zumal er ihm den Sieg in der Auseinandersetzung verdankte, die der Entdeckung der »mediceischen Planeten« folgte; es war in der Tat Keplers Unterstützung seines *Nuntius Sidereus*, vor allem aber auch die Aufstellung einer Theorie des Instruments - des Teleskops -, das Galilei in seiner Arbeit anwandte, was die Waage schließlich zu seinen Gunsten ausschlagen ließ. Außerdem steht die Kenntnis und Anerkennung der Keplerschen Entdeckungen von Seiten der Anhänger Galileis außer Zweifel. Bonaventura Cavalieri etwa bemerkt in seinem 1632 in Bologna erschienenen *Specchio Ustorio*, daß Kepler »die Kegelschnitte über die

Maßen geadelt hat, indem er klar bewiesen, daß die Planetenbahnen keine Kreise, sondern Ellipsen seien«. Und schon zwanzig Jahre früher, am 12. Juli 1612, schreibt niemand anders als der Gründer der *Accademia dei Lincei*, Francesco Cesi, an Galilei: »Mit Kepler glaube ich, daß die Planeten auf die strikten Kreisbewegungen zu verpflichtet hieße, sie an eine Treitmühle zu binden, sie gegen ihren Willen zu beschleifen ... Wie Ihr weiß auch ich, daß in bezug auf Erde oder Sonne viele Bewegungen nicht konzentrisch verlaufen... ja vielleicht gar keine, wenn deren Bahnen nach Keplers Willen elliptisch sind.«¹⁴ Und weiter bezeichnet Cesi in seinem Brief die Ellipse als allgemein bekannte, geeignete Antwort auf die Fragen, die in der ursprünglichen kopernikanischen Theorie ohne Lösung geblieben seien.

Panofsky besteht mit Recht auf der Bedeutung dieses Briefes; sie scheint der Aufmerksamkeit der Historiker und Biographen Galileis ganz entgangen zu sein. Sein Schluß scheint mir unwiderlegbar: »Zumindest seit 1612 - also nur drei Jahre nach der Veröffentlichung der Keplerschen *Astronomia nova* und zwanzig Jahre vor dem Erscheinen seines *Dialogo* - war Galilei mit dem ersten und zweiten Keplerschen Gesetz vertraut. Er war nicht in Unkenntnis dieser Gesetze - er ignorierte sie. Und wir haben zu fragen, warum.«¹⁵

Auf diese Frage hat Emil Wohlwill geantwortet, daß Galilei zwar um die Schwierigkeiten des kopernikanischen Systems gewußt habe, die aufzulösen waren, wollte man es in den Rang einer wahrhaften Astronomie des Sonnensystems erheben; daß er aber aller Wahrscheinlichkeit nach die Keplerschen Lösungen noch nicht für der Weisheit letzten Schluß gehalten habe. Ihm sei es auch nicht bloß darum gegangen, dies rein wissenschaftliche Ziel zu erreichen, sondern darum, »der überlieferten Weltanschauung gegenüber die unermessliche Überlegenheit der Vorstellung, die von der zweifachen Bewegung der Erde ausging, für jeden Denkenden zur Klarheit zu bringen«¹⁶.

In meinen *Etudes galileennes* habe ich selbst das Schweigen Galileis im *Dialogo* damit zu erklären versucht, daß dies in Italienisch und nicht in Latein abgefaßte Werk sich an den gebildeten Zeitgenossen

richtete, der für die kopernikanische Sache zu gewinnen war, nicht aber an den Fachmann; daß es sich also viel eher um eine Kampfschrift, eine *philosophische* Polemik, als um ein astronomisches Werk handelte. Im *Dialogo* ist, so führte ich an, weder das kopernikanische noch das ptolemäische System in seiner konkreten Realität dargestellt: Von der in bezug zur Sonne exzentrischen Erdbahn, von der Anzahl und Gestalt der Planetenbahnen usw. ist nicht die Rede. Das neuere System wird uns in einfachster Form vorgestellt: die Sonne im Zentrum, die um sie *kreisenden* Planeten (Galilei weiß genau, daß das falsch ist). Zudem ließe sich geltend machen: Hätte Galilei ein *astronomisches* - und nicht ein philosophisches - Werk schreiben wollen, dann hätte er gleich Kepler in der *Astronotnia nova* nicht *zwei*, sondern *drei* große Weltsysteme analysieren müssen. Unmöglich hätte er, wie er es tat, Tycho Brahe völlig vernachlässigen können.

Panofsky widerspricht Wohlwills und meiner Meinung, daß Galilei im *Dialogo* schon genug schwierige Sachverhalte untergebracht und gefürchtet habe, durch jeden zusätzlichen den Leser in Verlegenheit zu bringen. Allerdings erkennt nach meiner Ansicht Panofsky den unterschiedlichen Schwierigkeitsgrad in der Materie: zum einen die im *Dialogo* diskutierten Probleme, einschließlich des neuen Bewegungsbegriffs; zum anderen das, was er beiseite ließ, etwa die Keplerschen Gesetze, deren ungewöhnlicher Charakter hier etwas unterschätzt wird. Ich gebe aber zu, daß die von mir gegebene Antwort unzureichend ist; zwar vermag sie zur Not das Schweigen im Galileischen *Dialogo* zu erklären - nicht aber das des Galilei selbst.

Panofsky hat also recht, wenn er annimmt, daß das Problem tiefer liegt, und in diesem Zusammenhang Einstein zitiert: »Daß in Galileos Lebenswerk dieser entscheidende Fortschritt keine Spuren hinterlassen hat, ist ein groteskes Beispiel dafür, daß schöpferische Menschen oft nicht rezeptiv orientiert sind.«¹⁷ Wiederum zu Recht gibt Panofsky sich nicht mit einem bloßen Mangel an Rezeptivität zufrieden, sondern sieht in dieser Mißachtung die stillschweigende Verdrängung jener Entdeckungen: »Er scheint sie aus seinem Geist verbannt, gleichsam automatisch eliminiert zu haben, als unvereinbar

mit den Prinzipien, die nicht nur sein Denken, sondern seine Vorstellungskraft beherrschten.«¹⁸ Das aber hieße letztlich nichts anderes, als daß Galilei die Keplerschen Ellipsen bloß deshalb zurückgewiesen hätte, weil es Ellipsen, und nicht, wie sich's gehörte, Kreise gewesen wären...

Alle Historiker kennen die berühmte Passage ganz zu Anfang des *Dialogo*, in welcher Galilei die vollendete Natur der Kreisbewegung eines Körpers begründet: »Da er aber bei der Kreisbewegung sich stets von dem natürlichen Ziele und wieder zu ihm hin bewegt, so sind bei ihm Abneigung und Neigung gleich; aus dieser Gleichheit geht eine weder verzögerte noch beschleunigte Geschwindigkeit hervor, d.h. eine gleichförmige Bewegung.« Und diese könne nun unendlich fortauern. Anders dagegen, auch dies eine berühmte Passage, die geradlinige Bewegung: »... auf einer unbegrenzten Linie hingegen und bei einer fortwährend verzögerten oder beschleunigten Bewegung, ist von Natur aus eine solche Fortdauer unmöglich... Daraus schließe ich, daß nur die Kreisbewegung von Natur aus den das Weltall zusammensetzenden Naturkörpern zukommen kann, sobald diese sich in vollkommener Ordnung befinden; die geradlinige Bewegung jedenfalls kann höchstens dann von der Natur ihren Körpern und deren Teilen zugewiesen werden, sobald sie sich außerhalb der ihnen vorgeschriebenen Plätze in verkehrter Anordnung befinden...«¹⁹

Jeder kennt diese Stellen, und niemand liest sie ohne Unbehagen: Sie erscheinen geradezu antigalileisch. Wir glauben nicht, daß er sich ernsthaft zu solchen aristotelischen Platitüden bekennt. Er selbst, in seiner neuen Wissenschaft, negiert doch den »natürlichen Ort«, geometrisiert den Raum, zerstört den Kosmos! Wie anders denn scherzhaft oder aus dem Wunsch nach Mystifikation hätte Galilei in seinem *Dialogo* beispielsweise die Kreisform der Fallbewegung lehren können - hat er nicht selbst gezeigt, daß die Wurfbahn einem Kegelschnitt, nämlich der Parabel entspricht? Gewiß, die Besessenheit von der Kreisform war ein Machtfaktor im Denken Galileis... Und doch wollen wir uns damit nicht abfinden, versuchen wir, die Tragweite dieser

wunderlichen Behauptungen abzuschwächen, bemühen uns, sie zu »erklären«, sie zu »interpretieren«.

Es ist Panofskys großes Verdienst, mit diesen Irrtümern aufgeräumt zu haben: Indem er Galilei auf ungewöhnlichem Wege angeht, gelingt es ihm, wenn man so sagen darf, die Zwangsvorstellung des traditionellen Galileibildes abzuschütteln. Er nimmt die betreffenden Textstellen beim Wort, *at their face value*, und kann nun schreiben: »... es ist, glaube ich, dieselbe Zwangsvorstellung, die es ihm unmöglich machte, das Sonnensystem als eine Anordnung von Ellipsen zu betrachten. Wo wir den Kreis als Sonderfall der Ellipse ansehen, konnte Galilei die Ellipse nur als einen deformierten Kreis empfinden: eine Form, in der die »vollkommene Ordnung« durch eindringende Geradlinigkeit gestört wurde, die folglich nicht aus jener Bewegung hervorgehen kann, die er als die gleichförmige ansieht und die, wie wir noch hinzufügen können, die klassische Kunst der Renaissance ebenso nachdrücklich zurückwies, wie der Manierismus sie begrüßte.«²⁰

Man könnte also vielleicht sagen — auch wenn Panofsky es nicht sagt —, ja, man könnte auch ohne »vielleicht« sagen, daß Galilei gegen die Ellipse die gleiche unüberwindliche Abneigung gehegt hat wie gegen die Anamorphose und daß ihm die Keplersche Astronomie als manieristisch erschienen ist.

Aus guten Gründen, so denke ich, besteht Panofsky auf der bedeutenden Rolle, die die Zirkularität im Denken Galileis spielt; mit Recht auch erinnert Panofsky z.B. an eine weitere überraschende Übereinstimmung mit Leonardo da Vinci: Galilei sieht das Wesentliche der tierischen oder menschlichen Bewegungen in der *Rotation* der Glieder um ihre »konkave oder konvexe« Aufhängung und reduziert sie damit auf ein »System von Zyklen und Epizyklen«. Hingegen Kepler: »Ich verneine, daß von Gott irgendeine beständige, geistiger Herrschaft unterworfenen Bewegung erschaffen worden, die geradlinig ist... Alle Muskeln arbeiten nach dem Prinzip der geradlinigen Bewegung.. «²¹ Ich frage mich hingegen, ob Panofskys folgende Einschätzung Keplers ebenso richtig ist: »Im Gegensatz zu Galilei und im

Vorgriff auf die nachgalileische Physik sah er nicht die kreisförmige, sondern die geradlinige Bewegung als die in der physischen Welt vorherrschende an.«²² Gewiß ist die privilegierte Stellung der geradlinigen Bewegung *in der materiellen Welt* ein Grundprinzip der traditionellen, aristotelischen Physik: Daher ist ja gerade die Kreisbewegung die *natürliche* in den *himmlischen* Sphären. Denn diese ebenso wie die Himmelskörper sind nicht materieller Natur bzw. aus ganz anderem Stoff als dem der sublunaren Welt gemacht

Wenn also die neuzeitliche Physik, an deren Begründung beide zur Rede Stehenden ebenso wirksam wie verschiedenartig beteiligt waren - wenn also diese Wissenschaft der *geradlinigen* Bewegung ein absolutes Privileg einräumt, dann tut sie dies in einem ganz anderen Sinn als der kaiserliche Mathematiker. Für diesen stand die Auszeichnung der geradlinigen Bewegung ein für die Endlichkeit, die notwendige, relative Unvollkommenheit der Schöpfung, denn eine andauernde, gleichförmige und geradlinige Bewegung ist strenggenommen unmöglich. Für die spätere Wissenschaft aber besteht das Privileg dieser Bewegung gerade darin, daß sie in deren unendlichem Raum die immerwährend sich fortsetzende Bewegung *par excellence* ist.

Und vergessen wir nicht: Auch Kepler hat die »Zwangsvorstellung der Kreisform« nicht gänzlich überwinden können. Die Planetenbewegung, die zwar nicht mehr als »natürlich« noch als »tierisch« (oder »menschlich«) gilt, aber doch durch einen äußeren Beweger erzeugt, bringt weder Kepler noch Galilei zufolge Zentrifugalkräfte hervor. Zu guter Letzt: Wenn Kepler dahin kommt, die Kreisbahnen durch Ellipsen zu ersetzen, so tut er dies nicht nach Herzenslust oder aus irgendeiner Vorliebe für diese kuriose Kurve, sondern weil er nicht anders kann. Und der professionelle Astronom schreibt für Kollegen, nicht aber gleich Galilei für den gebildeten Zeitgenossen; er kann die sehr präzisen, von Tycho Brahe gelieferten empirischen Daten nicht vernachlässigen. Es bedarf einer Theorie, und zwar nicht einer allgemeinen, sondern einer konkreten Bewegungstheorie. Wohl hat sich Kepler mit unvergleichlicher intellektueller Kühnheit zur Einfüh-

rung einer nichtzirkulären Himmelsbewegung entschlossen²³, jedoch nicht, ohne vorher vergeblich den Versuch unternommen zu haben, sich der Tradition zu fügen. Im nachhinein gewahrt er freilich, welch wunderbare Vereinfachung im System der Planetenbewegungen die Einführung der Ellipse hervorbringt. Solch eine Umlaufbahn paßt ihm sehr gut in sein dynamisches Konzept, besser als eine aus Kreisbewegungen zusammengesetzte. Und gerade wegen ihrer Unvollkommenheit paßt eine solche Bahn sehr gut in die bewegliche, veränderliche, vergängliche Welt, besser als die vollkommene Kreisbewegung der himmlischen Sphären. Aber wie gesagt: im nachhinein. Denn im Grunde hat Kepler nie — noch weniger als Galilei — in der Ellipse etwas anderes sehen können als einen deformierten Kreis. Um die Planeten auf eine himmlische Kreisbahn zu verpflichten, sah er sich gar gezwungen, ihnen eine periodische »Schwankung« zuzuschreiben, also eine Schwankung der den Planeten eigenen Antriebskraft, die wiederum den radikalen Ortsvektor periodisch verändert. Wirkte allein die Antriebskraft der Sonne, so beschrieben die Planeten Kreise. Es ist die Wirkung der eigenen Antriebskräfte, die sie vom rechten Kreispfad abbringt.

All dies leugnet Panofsky gar nicht: »Kepler und seine Bundesgenossen standen nicht weniger als Galilei fest in ihrem Glauben an das höchste Formideal des Kreises und der Kugel. Beider Universum behielt eine endliche, sphärische, wohlzentrierte Gestalt, die Kepler gar als göttliches Abbild galt. Nach eigenen Worten empfand er einen •dunklen Schauer< (*horror oecultus*) beim bloßen Gedanken an Brunos »grenzenlose Unendlichkeit ohne Mittelpunkt.«²⁴ Hier wird aus Kepler kein »Moderner«, ganz im Gegenteil: »Wenn wir den Ausschluß der Seele aus der Materie, die Himmelskörper eingeschlossen, als >modern< auffassen, dann stand Kepler dem in der Renaissance so kräftigt wiederbelebten klassischen Animismus näher als Galilei. Wenn er der Wahrheit mitunter, und zwar in ganz entscheidenden Fällen, näherkam, so nicht, weil er vorurteilsloser gewesen wäre, sondern weil seine Vorurteile von anderer Art waren.«²⁵

Das ist gewiß richtig, aber noch nicht das letzte Wort: Kepler, so

scheint mir, hatte nicht nur andere »Vorurteile« als Galilei, er hatte deren in der Tat mehr. Anders gesagt: Er hat sich gewisse »Vorurteile«, die Galilei fallenließ, oder die ihm schlicht entfielen, bewahrt, hat sie sogar verstärkt- Galilei empfindet nicht diesen Horror vor der Unendlichkeit des Alls. Seine nach wie vor endliche Welt ist auch nicht wie die Keplersche durch ein Himmelsgewölbe begrenzt, das die Sterne trägt. Sie ist nicht mehr oder kaum noch kosmischer Natur und gewiß nicht mehr Ausdruck der schöpferischen Dreifaltigkeit. Kepler aber sieht in der Sonne das Abbild, wenn nicht die Inkarnation des Vaters, im Himmelsgewölbe die des Sohnes, in der Stufenordnung der planetaren Sphären die des Heiligen Geistes.

Doch zurück zum Problem des Verhältnisses Galilei - Kepler, zurück zur meisterhaften Analyse Panofskys. Es ist sehr wahrscheinlich, daß der Symbolismus Keplers und dessen kosmotheologische Argumentation in Galilei die gleiche Abneigung wie jene gegen Tassos Allegorismen provozierten. In animistischer Manier ging Kepler vor, wenn er die Antriebskraft der Sonne einer Seele zuschrieb, vermöge welcher sie sich um sich selbst dreht und dabei gleich einem ungeheuren Wirbel eine magnetische oder quasimagnetische Wirkung emittiert, die die Planeten erfaßt und um sie kreisen läßt. Für Galilei war das eine Rückkehr zu magischen Vorstellungen; das galt auch für den Begriff der Anziehungskraft (*attractio*), den Kepler wiederholt gebrauchte und den kein Anhänger Galileis jemals akzeptierte.

Unglücklicherweise vermochte Galilei nicht zwischen dem mathematischen Gehalt der keplerschen Doktrin und deren »physikalischer« Grundlage zu unterscheiden. Machen wir ihm daraus keinen großen Vorwurf: Inhalt und Form schienen miteinander fest verbunden. So ist Keplers Einführung der elliptischen Bahnen mit einer dynamischen Konzeption verknüpft, die ihrerseits auf einem astralen oder zumindest solaren Animismus beruht. Deshalb hat Panofsky ganz recht, wenn er sagt: »Es ist ein wirklich erstaunliches historisches Paradox: während Galileis »progressiver« Empirismus ihm die Unterscheidung zwischen idealer Form und mechanischer Wirkung vorenthält und somit seine Bewegungstheorie im -Banne der Zirkulari-

tät< gefangen hält, erlaubt ein >konservativer< Idealismus es Kepler, diese Unterscheidung zu treffen, und damit seiner Bewegungstheorie, diesem Bann zu entinnen.«²⁶

Meiner Ansicht nach reicht das Paradoxon noch tiefer. Kepler ersetzt die reine Himmelskinematik seiner Vorgänger durch eine Himmelsdynamik. Doch der grandiosen Idee der wissenschaftlichen Vereinheitlichung des Universums, in Keplers Begriffen: der Übereinstimmung der himmlischen mit der irdischen Physik, hat ohne jeden Zweifel Kopernikus den Boden bereitet, als er die Aufteilung der Welt in eine »astrale« und eine »sublunare« aus den Angeln hob. Nicht minder wichtig aber war Keplers Festhalten am traditionellen aristotelischen Bewegungsbegriff: Bewegung als Prozeß. Weil Kepler der aristotelischen Auffassung treu bleibt, der zufolge jede kontinuierliche Bewegung notwendig einen kontinuierlich wirkenden Beweggrund erfordert, deshalb zwingt die materielle Vereinheitlichung der Welt, d. h. die wechselseitige Gleichsetzung von Erde und Planeten ihn, Kepler, zu der Frage, die alles andere auslöst: *a quo moventur planetae*? Wer hat all das in Gang gebracht? Was läßt die Planeten kreisen? Galilei dagegen braucht sich diese Frage nicht zu stellen: Er verwirft das aristotelische Konzept der Bewegung und gelangt zu dem der Bewegung als Zustand und zur Entdeckung des Trägheitsprinzips. Dieses dehnt er aus auf die Kreisbewegung, genauer: Er schließt sie davon nicht aus. Und nachdem er lange genug über sein Problem: *a quo moventur projecta* 7 nachgegrübelt hat, gibt er sich zufrieden mit der Antwort, die er erhielt: *a nikio*. Nichts bewegt den geworfenen Körper.

Wunderbar, unvorhersehbar, unlogisch sind die Wege des menschlichen Denkens; der geraden Straße scheint es den Umweg vorzuziehen. Den Schluß, welchen Panofsky aus seiner bewundernswerten Arbeit zieht, können auch wir nur übernehmen: »Gerade weil Kepler von einer im wesentlichen mystischen Kosmologie ausging, doch die Kraft besaß, diese auf quantitative Aussagen zu reduzieren, war es ihm vielleicht möglich, als Astronom so >modern< zu werden, wie Galilei als Physiker. Dieser, der Vater der modernen Mechanik, war

frei von allem Mystizismus, doch in seiner Neigung zu Purismus und Klassizismus befangen und im Bereich der Astronomie eher Forscher denn Weltenschöpfer.«²⁷

Purismus ist eine gefährliche Sache. Galileis Beispiel, das keineswegs einzig ist in seiner Art, zeigt deutlich, daß man nichts übertreiben soll. Nicht einmal das Verlangen nach Klarheit.

ANMERKUNGEN

- 1 Erwin Panofsky, *Galileo as a Critic of the Arts*, Den Haag 1954 (alle Panofsky-Zitate Koyrés wurden nach dieser engl. Ausgabe übersetzt, A. d. Ü.).
- 2 ETWUI Panofsky hat den Vorschlag Koyrés angenommen; eine spätere gekürzte Fassung seines Galilei-Aufsatzes trägt den Untertitel *Aesthetic Attitude and Scientific Thought* (in: *Isis*, 47. Jg., 1 /1956); A. d. Ü.
- 3 E. Panofsky, *op. cit.*, S. 20. Das »denkwürdige Urteil* stammt von U. Leo, *Torquato Tasso, Studien zur Vorgeschichte des Seicentismo*, Bern 1951, S. 26.
- 4 H. Wölfflin, *Grundbegriffe der Kunstgeschichte*, München 1915. (Vgl. dazu E. Panofsky, *op. cit.*, S. 15; A. d. Ü.)
- 5 E. Panofsky, *op. cit.*, S. 15.
- 6 *Ibid.*, S. 16.
- 7 *Ibid.*, S. 4f.
- 8 *Ibid.*, S. 17.
- 9 *Ibid.*, S. 13; Galileo Galilei, *Opere*, Bd. IX., S. 129 (zit. und übers. nach Panofsky).
- 10 Bei Panofsky finden sich Reproduktionen beider Bilder.
- 11 Galileo Galilei, *Opere*, Bd. IX, S. 63, zit. und übers. nach Panofsky, *op. cit.*, S. 17f.
- 12 Die vier Jupitermonde; A. d. Ü.
- 13 Panofsky, *op. cit.*, S. 20.
- 14 Galileo Galilei, *Opere*, Bd. IX, S. 365 f.; zit. und übers. nach Panofsky, *op. cit.*, S. 23.
- 15 *Ibid.*
- 16 E. Wohlwill, *Galileo Galilei und sein Kampf für die kopernikanische Lehre*, Bd. II, Leipzig 1926, S. 88.
- 17 A. Einstein, Vorwort zu Galileo Galilei, *Dialogue Concerning the Two Chief World Systems*, Berkeley 1953; zit. nach Panofsky, *op. cit.*, S. 24.
- 18 E. Panofsky, *op. cit.*, S. 24.

- 19 Galileo Galilei, *Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme*, Darmstadt 1982, S. 34.
- 20 E. Panofsky, *op. cit.*, S. 25.
- 21 Interessanterweise zeigt sich, daß dort, wo Galilei kinematisch argumentiert, von den Bewegungen der *Glieder* des animalischen Körpers spricht, Kepler jene der *Muskel*» ins Auge faßt, also dynamisch argumentiert; genau dasselbe findet statt im Bereich der Astronomie.
- 22 E. Panofsky, *op. cit.*, S. 26.
- 23 Tatsächlich hatte Tycho Brahe dies schon vor ihm getan, allerdings nur im Fall eines Kometen.
- 24 Panofsky, *op. cit.*, S. 28.
- 25 *Ibid.*
- 26 Panofsky, *op. cit.*, S. 29.
- 27 Panofsky, *op. cit.*, S. 31.

Ein Meßversuch

Wenn die Historiker der modernen Naturwissenschaft¹ deren Wesen und Struktur zu bestimmen versuchen, so betonen sie den empirischen und konkreten Charakter im Gegensatz zum abstrakten Bücherwissen der antiken und mittelalterlichen Naturwissenschaft. Beobachtung und Erfahrung im kraftvollen und siegreichen Angriff gegen Tradition und Autorität: So sieht das - ebenfalls traditionelle - Bild aus, das man uns gewöhnlich von der geistigen Revolution des siebzehnten Jahrhunderts zeichnet, deren Wurzel und deren Frucht zugleich die moderne Naturwissenschaft ist.

Dieses Bild ist keineswegs falsch. Ganz im Gegenteil: Es ist völlig evident, daß die moderne Wissenschaft unsere Kenntnis der Welt unermesslich — und sogar über jedes Maß hinaus - erweitert und die Zahl der »Tatsachen« - aller Arten von Tatsachen -, die sie entdeckt, beobachtet und angehäuft hat, vermehrt hat. Außerdem haben einige der Begründer der modernen Wissenschaft sich und ihr Werk gerade so gesehen und verstanden. Gilbert und Kepler, Harvey und Galilei — sie alle rühmen die wunderbare Fruchtbarkeit der Erfahrung und der direkten Beobachtung, die sie der Sterilität abstrakten und spekulativen Denkens gegenüberstellen.²

Wie bedeutend aber auch immer die neuen, von den *venatores* (Jägern) entdeckten und zusammengebrachten »Tatsachen« sein mögen, die schlichte Anhäufung von »Tatsachen«, das heißt, ein bloßes Sammeln von Beobachtungs- und Erfahrungsdaten schafft noch keine Wissenschaft; sie müssen geordnet, gedeutet und erklärt werden. Mit anderen Worten, erst durch das theoretische Bearbeiten wird Faktenkenntnis zur Wissenschaft.

Andererseits spielten Beobachtung und Erfahrung - das heißt die rohe Beobachtung und Erfahrung, die des gesunden Menschenverstandes - nur eine geringe Rolle beim Aufbau der modernen Wissenschaft. Man könnte sogar sagen, daß sie die mächtigsten Hindernisse bildeten, denen die Wissenschaft auf ihrem Weg begegnete. Nicht die *Erfahrung* war es, sondern der *Versuch*, der sie wachsen ließ und ihren Sieg entschied; der Empirismus der modernen Wissenschaft beruht nicht auf Erfahrung, sondern auf dem Experiment.

Gewiß brauche ich hier nicht den Unterschied von Erfahrung (engl. experience) und Experiment zu betonen. Ich möchte jedoch die enge Verbindung zwischen dem Experiment und dem Ausarbeiten einer Theorie unterstreichen. Weit davon entfernt, einander entgegengesetzt zu sein, sind Experiment und Theorie verbunden und voneinander abhängig, und nur mit wachsender Genauigkeit und Vervollkommenung der Theorie werden auch die Versuche genauer und vollkommener. In der Tat ist ein Versuch - wie Galilei es so schön sagte - eine an die Natur gestellte Frage, und es ist völlig klar, daß die Tätigkeit, deren Ergebnis das Stellen dieser Frage ist, eine Funktion der Entwicklung der Sprache ist, in der sie formuliert wird. Experimentieren ist ein teleologischer Prozeß, dessen Ziel durch die Theorie bestimmt wird. Der von Francis Bacon so gut bemerkte und so schlecht gedeutete »Aktivismus« der modernen Wissenschaft - *scientia activa, operative*. - ist nur das Gegenstück ihrer theoretischen Entwicklung.

Weiter müssen wir hinzufügen - und das bestimmt die charakteristischen Züge moderner Wissenschaft -, daß ihre theoretische Arbeit sich die mathematische Denkweise zu eigen macht und entfaltet. Deshalb unterscheidet sich ihr »Empirismus« *toto coelo* von dem der aristotelischen Tradition.⁴ »Das Buch der Natur ist mit geometrischen Zeichen geschrieben«, erklärte Galilei. Das bedeutet, daß die moderne Wissenschaft, um ihr Ziel zu erreichen, genötigt ist, das System der flexiblen und halb-qualitativen Begriffe der aristotelischen Wissenschaft durch ein System starrer und strikt quantitativer Begriffe zu ersetzen. Die moderne Wissenschaft konstituiert sich



Christian Huygens (1629-1691)

also, indem sie die qualitative, oder genauer *gemischte* Welt des gesunden Menschenverstandes (und der aristotelischen Wissenschaft) durch eine archimedische Welt zur Realität gewordener Geometrie ersetzt. Oder — was das gleiche ist — die Welt des Mehr oder Weniger unseres Alltags wird ersetzt durch ein Universum der Maße und der

Präzision. In der Tat impliziert dieses Ersetzen, daß alles, was nicht genau gemessen werden kann, von diesem Universum ausgeschlossen oder relativiert wird.⁵

Dieses Streben nach quantitativer Präzision, nach dem Entdecken exakter numerischer Daten, nach diesen »Zahlen, Maßen und Gewichten«, mit denen Gott die Welt gebaut hat, bildet das Ziel und bestimmt die Struktur der Versuche der modernen Wissenschaft selbst. Mit dem Versuch in weiterem Sinne aber stimmt dieses Verfahren nicht überein: Weder die Alchemie noch Cardano oder Giambattista Porta - und nicht einmal Gilbert - suchen numerisch genaue Ergebnisse. Sie sehen die Welt vielmehr als ein Ensemble von Qualitäten, denn als ein Ensemble von Größen an. Qualität verträgt sich eben nicht mit der Genauigkeit der Messung.⁶ Nichts ist in dieser Hinsicht aufschlußreicher als die Tatsache, daß Boyle und Hooke, beide Experimentatoren ersten Ranges, die den Wert genauer Messung kennen, eine rein qualitative Untersuchung der Spektralfarben anstellen. Nichts zeigt die unvergleichliche Größe Newtons besser als seine Fähigkeit, den Bereich des Qualitativen zu überschreiten und in den Bereich der physikalischen, das heißt der quantitativ bestimmten Wirklichkeit vorzudringen. Aber neben den theoretischen (konzeptuellen) und psychologischen Schwierigkeiten, die der Anwendung der Idee mathematischer Strenge in einer Welt des Wahrnehmens und Handelns entgegenstehen, hat das tatsächliche Ausführen genauer Messungen im siebzehnten Jahrhundert mit technischen Schwierigkeiten zu ringen, von denen wir uns heute in einer von Präzisionsinstrumenten überladenen und beherrschten Welt, wie ich fürchte, nur eine sehr schwache Vorstellung machen können. Sogar Historiker präsentieren uns - wie I. Bernard Cohen zeigte - viel zu oft die entscheidenden Versuche der Vergangenheit nicht so, wie sie *damals* wirklich ausgeführt wurden, sondern so, wie *sie jetzt* in unseren Labors und Klassenzimmern angeordnet werden, weil sie die wirklichen Bedingungen und damit die wirkliche Bedeutung des Experiments in der heroischen Epoche moderner Wissenschaft nicht kennen.⁷ Deshalb möchte ich hier, um zur Geschichte der Konstitu-

ierung experimenteller Methoden der Wissenschaft beizutragen, die Geschichte des ersten bewußten und zusammenhängenden Versuchs einer experimentellen Messung erzählen. Die Messung einer universellen Konstante, der Konstante der Beschleunigung der Körper im freien Fall.

Jedermann kennt die historische Bedeutung des Fallgesetzes, des ersten mathematischen Gesetzes der von Galilei entwickelten neuen Dynamik, das Gesetz, das ein für allemal festlegte, daß »die Bewegung dem Gesetz der Zahl unterworfen ist«.⁸ Dieses Gesetz bestimmt, daß die Schwere, obwohl keineswegs eine wesentliche Eigenschaft der Körper (wir kennen ihr Wesen gar nicht), doch nichtsdestoweniger ihre universelle Eigenschaft ist (alle Körper sind »schwer«, und es gibt keine »leichten«), und darüber hinaus ist sie für alle Körper eine invariable und konstante Eigenschaft. Nur unter diesen Bedingungen ist Galileis Gesetz (im Vakuum) gültig.

Doch trotz der mathematischen Eleganz und der physikalischen Plausibilität von Galileis Gesetz ist es offensichtlich, daß es nicht das einzig Mögliche ist.⁹ Außerdem befinden wir uns nicht im Vakuum, sondern in der Luft, und nicht im abstrakten Raum, sondern auf der Erde, und vielleicht sogar auf einer Erde, die sich bewegt. Es ist völlig klar, daß eine experimentelle Bestätigung des Gesetzes und seiner Gültigkeit für Körper, die in unserem Raum fallen, *in hoc vero aere* unabdingbar ist. Ebenso unabdingbar ist die Bestimmung des konkreten Wertes der Beschleunigung (g).

Es ist bekannt, mit welcher außerordentlichen Genialität Galilei, da er ja keine direkten Messungen anstellen konnte, den freien Fall durch die Bewegung auf der schiefen Ebene einerseits und durch die Pendelbewegung andererseits ersetzt. Es ist nur gerecht, sein großes Verdienst und seine geniale Einsicht anzuerkennen, die nicht durch die Tatsache verringert werden, daß sie auf zwei falschen Annahmen beruhen.¹⁰ Aber die Gerechtigkeit verlangt auch, daß wir unsere Aufmerksamkeit auf die überraschende und jämmerliche Armut der ihm zur Verfügung stehenden experimentellen Mittel richten.

Lassen wir ihn selbst in seinem *modus procedendi* berichten:¹¹

»Auf einer Leiste oder eher einem hölzernen Sparren von ungefähr 12 Ellen Länge, einer halben Elle Breite und drei Fingern Dicke wurde auf der schmalen Seite eine kleine Rinne von etwas mehr als Fingerbreite ausgehöhlt. Diese Höhlung wurde sehr gerade, glatt und fein poliert gemacht und mit einem fein gegerbten und geglätteten Pergament ausgekleidet, worin wir eine harte, glatte und ganz runde Bronzekugel rollten. Nachdem wir dieses Brett schräg legten, ein Ende ein oder zwei Ellen hoher als das andere, rollten wir die Kugel, wie gesagt, in der Rinne und stellten auf eine Weise, die ich gleich beschreiben will, die für das Herunterrollen benötigte Zeit fest. Wir wiederholten diesen Versuch mehr als einmal, um die Zeit mit einer solchen Genauigkeit zu messen, daß die Abweichung zwischen zwei Beobachtungen nie den zehnten Teil eines Pulsschlags überschritt. Nachdem wir diese Operation ausgeführt und uns von ihrer Verlässlichkeit überzeugt hatten, ließen wir die Kugel nur ein Viertel der Länge der Rinne hinunterrollen; und als wir die Zeit der Talfahrt maßen, fanden wir, daß es genau die Hälfte der ersteren war.

Dann versuchten wir andere Entfernungen und verglichen die Zeit für die ganze Länge mit der für zwei Drittel und mit jedem anderen Bruchteil. Bei diesen, volle hundertmal wiederholten Versuchen fanden wir stets, daß die durchlaufenen Räume sich unter sich wie die Quadrate der Zeit verhielten, und das bei allen Neigungswinkeln der schiefen Ebene, d. h. der Rinne, in der die Kugel rollte. Wir beobachteten auch, daß sich die Zeiten der Talfahrt bei verschiedenen Neigungswinkeln der Ebene genau so verhielten wie, worauf wir zurückkommen, der Verfasser es vorhergesagt und für sie bewiesen hatte.¹²

Für die Zeitmessung benutzten wir ein großes Wassergefäß, das in einer gewissen Höhe angebracht war; an den Boden des Gefäßes war ein feines Rohr gelötet, das einen feinen Strahl Wasser laufen ließ, den wir während *der Zeit* jeder Fallzeit in ein kleines Glas einfingen, sowohl bei der ganzen Länge wie bei ihren Bruchteilen; das so gesammelte Wasser wurde nach jeder Fallzeit auf einer sehr genauen Waage gewogen; die Unterschiede und die Verhältnisse dieser Gewichte er-

gaben die Unterschiede und Verhältnisse der Zeiten, und das mit einer solchen Genauigkeit, daß sich bei all den vielen Wiederholungen des Verfahrens kein bemerkbarer Unterschied in den Ergebnissen fand.«

Eine Bronzekugel, die in einer »glatten und polierten« Rinne in einem Holzbrett läuft! Ein Gefäß mit Wasser, das durch eine kleine Öffnung rinnt und das man in ein kleines Glas einfängt, um es danach zu wiegen und so die Fallzeiten zu messen (die römische Wasseruhr, die von Ktesibios, war schon ein sehr viel besseres Instrument): was für eine Häufung von Quellen des Irrtums und der Ungenauigkeit! Es ist offensichtlich, daß die Versuche Galileis völlig wertlos sind. Gerade die Perfektion ihrer Ergebnisse ist ein strikter Beweis ihrer Ungenauigkeit.¹³

Kein Wunder, daß Galilei, der sich all dessen ohne Zweifel völlig bewußt ist, so weit wie möglich (z. B. in den *Discorsi*) vermeidet, einen konkreten Wert für die Beschleunigung anzugeben; und wenn er es tut (wie im *Dialogo*), so ist er jedesmal völlig falsch. So falsch, daß der Pater Mersenne außerstande war, seine Überraschung zu verbergen: »Er nimmt an, daß eine Kugel in 5 Sekunden einhundert Faden tief fällt; daraus leitet er ab, daß die Kugel in einer Sekunde nur 4 Faden tief fällt, obwohl ich überzeugt bin, daß sie weiter fällt.«¹⁴

In der Tat, 4 Ellen - nicht einmal 7 Fuß¹⁵ - ist weniger als die Hälfte des richtigen Wertes, und etwa die Hälfte des Wertes, den Pater Mersenne selbst aufstellt. Und doch ist es keineswegs überraschend, daß Galileis Zahlen so grob ungenau sind; ganz im Gegenteil, es wäre überraschend und grenzte an ein Wunder, wenn sie es nicht wären. Was überrascht, ist die Tatsache, daß Mersenne, dessen experimentelle Mittel nicht viel reicher als die Galileis waren, so viel bessere Ergebnisse erzielte.

So befindet sich die moderne Naturwissenschaft in ihren Anfängen in einer ziemlich seltsamen und sogar paradoxen Lage: Ihr Prinzip ist die Genauigkeit, sie behauptet, daß die Wirklichkeit in ihrem Wesen geometrisch und folglich Gegenstand strenger Determination und Messung ist (umgekehrt sehen Mathematiker wie Newton und

Barrow in der Geometrie selbst eine Wissenschaft des Messens)¹⁶; sie entdeckt und formuliert (mathematisch) Gesetze, welche es erlauben, die Lage und die Geschwindigkeit eines Körpers an jedem Punkt seiner Flugbahn und in jedem Augenblick seiner Bewegung abzuleiten und zu berechnen, und ist außerstande, sie zu benutzen, weil sie keine Mittel hat, eine Zeitdauer zu bestimmen oder eine Geschwindigkeit zu messen. Aber ohne diese Messungen bleiben die Gesetze der neuen Dynamik abstrakt und leer. Um ihnen einen wirklichen Inhalt zu geben, ist es unerlässlich, die Mittel zur Zeitmessung zu besitzen (der Raum ist leicht zu messen, *organa chronou, horologia*, wie Galilei sie nannte), mit anderen Worten: verlässliche Uhren.¹⁷

Die Zeit kann natürlich nicht unmittelbar gemessen werden, sondern nur durch etwas anderes, worin wir sie verkörpert finden. Das ist entweder

- a) ein konstanter und gleichförmiger Prozeß, wie z. B. die konstante und gleichmäßige Bewegung der Himmelsphäre oder der konstante und gleichförmige Ausfluß des Wassers bei der Wasseruhr des Ktesibios¹⁸, oder
- b) ein Prozeß, der, wenn auch nicht selbst gleichförmig, doch automatisch wiederholt werden kann oder sich selbst wiederholt, oder schließlich
- c) ein Prozeß, der, obwohl er sich nicht völlig identisch wiederholt, zu seiner Ausführung doch die gleiche Zeit benötigt und uns damit sozusagen ein Zeiatom oder eine Zeiteinheit, ein Stück Dauer, bietet.

In der Pendelbewegung fand Galilei einen derartigen Prozeß. Tatsächlich wurde ein Pendel, vorausgesetzt, alle äußeren und inneren Widerstände, wie zum Beispiel die Reibung und der Luftwiderstand, ließen sich eliminieren, seine Schwingungen auf völlig identische Weise bis ans Ende der Zeit fortsetzen. Darüber hinaus bleibt die Periode der Pendelschwingungen sogar in unserer Atmosphäre, in *hoc vero aere*, wo ihre Bewegung ständig verzögert wird und keine zwei Schwingungen völlig identisch sind, doch konstant.

Oder, um es mit Galileis eigenen Worten zu sagen¹⁹: »Zuerst muß

man bemerken, daß jedes Pendel seine eigene Schwingungszeit hat, so bestimmt und festgelegt, daß es unmöglich ist, es in einer anderen Periode schwingen zu lassen als in der, die die Natur ihr gegeben hat«, und die weder vom Gewicht des Perpendikels noch von der Schwingungsweite abhängt, sondern einzig und allein von der Länge des Pendels.

Die große Entdeckung Galileis wurde übrigens nicht - wie es in der Folge von Viviani immer noch in den Handbüchern steht - beim Betrachten der Schwingungen des großen Leuchters im Dom von Pisa gemacht und dadurch, daß er den Isochronismus im Vergleich mit seinen Pulsschlägen gemessen hätte²⁰, sondern durch äußerst geniale Versuche, bei denen er die Schwingungen von Pendeln gleicher Länge, aber mit Perpendikeln von unterschiedlichem Stoff und mit hin von verschiedenem Gewicht (Kork und Blei) miteinander verglich²¹, und zuerst und vor allem durch intensives mathematisches Denken.

So beschreibt Salviati²²: »Und was erstens die Frage betrifft, ob ein und dasselbe Pedel wirklich alle seine großen, mittleren und kleinen Schwingungen in genau der gleichen Zeit ausführt, so beziehe ich mich auf das, was ich schon von unserem Platoniker gehört habe. Er hat deutlich gezeigt, daß die Schwingungszeit für alle Kreissehnen die gleiche ist, ob nun die umfaßten Bogen 180 Grad (d. h. den vollen Durchmesser) betragen oder 100, 60, 10, 2, $\frac{1}{2}$ Grad oder 4 Minuten. Alle diese Bogen enden, wohlverstanden, am untersten Punkt des Kreises, wo er die Horizontale tangiert.

Betrachten wir jetzt die Schwingung nach den Bogen statt nach den Sehnen, vorausgesetzt, diese überschreiten nicht 90 Grad, so zeigt das Experiment, daß sie alle in gleichen Zeiten durchlaufen werden. Aber diese Zeiten sind länger bei längerer Schnur und nicht bei längerem Bogen, ein um so bemerkenswerteres Ergebnis, weil man auf den ersten Blick genau das Gegenteil für wahr halten würde. Denn da die Endpunkte beider Bewegungen die gleichen sind und da die Gerade zwischen diesen beiden Punkten der kürzeste Abstand zwischen ihnen ist, so schiene es vernünftig, daß die Bewegung längs

dieser Linie in der kürzesten Zeit ausgeführt würde. Das ist aber nicht der Fall, denn die kürzeste Zeit - und mithin die schnellste Bewegung - ist die längs des Bogens, dessen Gerade die Kreissehne ist.

Was das Verhältnis der Schwingungszeiten von Körpern betrifft, die an Drähten verschiedener Länge hängen, so sind sie proportional den Quadratwurzeln der Länge der Drähte. Oder man könnte sagen, die Längen verhalten sich zueinander wie die Quadrate der Zeiten. Wenn man die Schwingungszeit eines Pendels doppelt so lang haben will wie die eines anderen, so muß man also seine Aufhängung viermal so lange machen. Hat ein Pendel eine neunmal so lange Aufhängung wie das andere, so wird dieses drei Schwingungen ausführen, während das andere einmal schwingt, woraus folgt, daß die Längen der Pendeldrähte zueinander im (umgekehrten) Verhältnis der Quadrate der in der gleichen Zeit vollzogenen Schwingungszahl stehen.«

Man kann die Tiefe von Galileis Denken, die sich selbst noch bei seinem Irrtum zeigt, nur bewundern. Die Pendelschwingungen sind natürlich nicht isochron, und der Kreis ist nicht die Linie der schnellsten Schwingungsbewegung. Aber, um die Begriffe des achtzehnten Jahrhunderts zu benutzen, so hat Galilei erkannt, daß die »brachistochrone« Kurve und die Kurve, auf der die Schwingungen in der gleichen Zeit ausgeführt werden, die »tautochrone«, die gleiche Linie sind.²³

Es ist ziemlich merkwürdig, daß Galilei, der die Isochrone des Pendels - die eigentliche Grundlage aller modernen Zeitmessung - entdeckt hat, zwar mit ihrer Hilfe einen Chronometer zu schaffen und sogar eine mechanische Pendeluhr zu konstruieren versuchte²⁴, sie aber nie bei seinen eigenen Experimenten benutzte. Es scheint Pater Merenne gewesen zu sein, der zuerst diese Idee hatte.

Merenne sagt uns in der Tat nicht *expressis verbis*, daß er das Pendel als Mittel zur Zeitmessung bei der Fallbewegung schwerer Körper bei den Versuchen benutzte, über die er in der *Harmonie Universelle*²⁵ berichtet. Aber da er im gleichen Werk eine sorgfältige Beschreibung des halbkreisförmigen Pendels gibt und dessen unterschiedliche Ver-

wendungen in der Medizin (zur Bestimmung verschiedener Pulsgeschwindigkeiten), in der Astronomie (zur Beobachtung der Mond- und Sonnenfinsternisse) usw. unterstreicht²⁶, ist es praktisch gewiß und darüber hinaus durch eine andere Stelle der *Harmonie Universelle* bestätigt, nicht nur, daß er ein Pendel benutzte, sondern sogar, daß es drei und einen halben Fuß lang war.²⁷ Zweifellos ist es ein Pendel, dessen Periode laut Mersenne genau einer Sekunde des *Primum Mobile* gleich ist.²⁸ Die Ergebnisse von Mersennes Versuchen, »mehr als fünfzigmal durchgeführt«, sind völlig konstant. Der fallende Körper durchquert 3 Fuß in einer halben Sekunde, 12 in einer Sekunde, 48 in zwei, 108 in drei und 147 in drei und einer halben Sekunde. Das ist nahezu doppelt soviel (80%), als es nach Galileis Zahlen sein sollte.

Daher schreibt Mersenne: »Was Galileis Versuche betrifft, so kann ich mir nicht vorstellen, woher der große Unterschied kommt, den man hier in Paris und Umgebung hinsichtlich der Fallzeiten findet, die uns immer viel kleiner als die seinen erschienen; nicht daß ich einem so großen Mann geringe Sorgfalt vorwerfen möchte, aber wir haben die unseren viele Male von unterschiedlichen Höhen aus in der Gegenwart zahlreicher urteilsfähiger Personen durchgeführt, und sie brachten stets das gleiche Ergebnis. Wenn die Elle, deren sich Galilei bediente, nur $\frac{1}{4}$ Fuß lang ist, das heißt 20 Zoll des in Paris verwendeten königlichen Fußes, so ist es gewiß, daß die Kugel mehr als hundert Ellen in 5 Sekunden fällt.«²⁹

»Die hundert Ellen Galileis«, erklärt Mersenne, sind in der Tat gleich $166\frac{2}{3}$ Fuß nach »unserem« Maß.³⁰ Aber Mersennes eigenes, »mehr als fünfzigmal wiederholtes« Experiment erbrachte ganz verschiedene Ergebnisse. Demgemäß legt ein schwerer Körper in 5 Sekunden nicht 100, sondern 180 Ellen oder 300 Fuß zurück.

Mersenne sagt uns nicht, daß er wirklich schwere Körper von einer Höhe von 300 Fuß fallen ließ. Es ist eine Folgerung, die er in Anwendung der »doppelten Proportion« auf die ihm zur Verfügung stehenden Daten zieht. Da aber diese Daten »beweisen«, daß ein schwerer Körper 3 Fuß in einer halben Sekunde, 12 in einer Sekunde, 48 in zwei, 108 in drei und 147 in drei und einer halben Sekunden fallen³¹

- Zahlen, die vollkommen mit der Proportion im Quadrat übereinstimmen -, fühlt Mersenne sich berechtigt und sogar genötigt zu der Behauptung, ein schwerer Körper falle $166\frac{2}{3}$ Fuß in nur $3\frac{18}{25}$ Sekunden, und nicht in fünf. Zudem, so fügt er hinzu, würde aus Galileis Zahlen folgen, daß ein schwerer Körper nur eine Elle in einer halben Sekunde und vier Ellen, das sind etwa $16\frac{2}{3}$ Fuß, in einer Sekunde falle, statt der zwölf Fuß, die er tatsächlich fällt.

Die Ergebnisse von Mersennes Experimenten - die von ihm gewonnenen Zahlen, auf die er sehr stolz ist und die er benutzt, um die Fallzeiten von Körpern aus allen möglichen Höhen bis hin zum Mond und den Sternen³², und die Länge aller Arten von Pendeln mit Perioden bis hin zu 30 Winkelsekunden zu berechnen - stellen zweifellos im Vergleich zu denen Galileis einen Fortschritt dar. Sie implizieren jedoch eine ziemlich lästige Schlußfolgerung, die nicht nur dem gesunden Menschenverstand und den grundlegenden Lehren der Mechanik zuwiderlaufen, sondern auch Mersennes eigenen Berechnungen: daß nämlich die Geschwindigkeit an der Peripherie des Kreises größer ist als in der Senkrechten.³³

Mersenne scheint diese Konsequenz zumindest einige Jahre lang nicht bemerkt zu haben (und übrigens auch sonst niemand). Auf jeden Fall erwähnt er sie nicht vor den *Cogitata Physico-Mathematica* von 1644, wo er die Diskussion des Fallgesetzes und der Eigenschaften des Pendels erneut aufnimmt und sie, wenn auch in etwas vager Form, erwähnt, zusammen mit der Nicht-Isochronie der großen und der kleinen Schwingungen.³⁴

Nachdem er so erklärt hat, wie befremdlich es ist, daß ein Pendel von drei Fuß Länge (das er jetzt anstatt des früher von ihm verwendeten dreieinhalb Fuß langen Pendels benutzt) seine halbe Schwingung in genau einer halben Sekunde vollzieht (d. h. drei Fuß fällt), wenn freifallende Körper zwölf Fuß in einer Sekunde durchlaufen (das entspricht drei Fuß in einer halben Sekunde), während es gemäß den schon in der *Harmonie Universelle* gemachten Berechnungen in der Zeit einer halben Schwingung $\frac{11}{7}$ des Halbmessers (d.h. $\frac{33}{7}$ oder 5 Fuß) sein sollten³⁵, fährt er fort: »... das enthält eine sehr große

Schwierigkeit, denn beide Tatsachen wurden durch zahlreiche Beobachtungen bestätigt, nämlich daß fallende Körper auf der Senkrechten nur zwölf Fuß zurücklegen und daß das drei Fuß lange Pendel von C nach B in einer halben Sekunde schwingt. Das kann nur geschehen, wenn die Kugel des Pendels in der gleichen Zeit von C nach B auf der Kreislinie schwingt, in welcher ein gleicher Körper auf der Senkrechten AB fällt. Da dieser 5 Fuß fallen sollte in der Zeit, in welcher die Kugel von C nach D schwingt, sehe ich keine Lösung.«

Natürlich könnte man vermuten, daß die Körper schneller als angenommen fallen, aber das wäre gegen alle Beobachtungen. Wir müssen deshalb entweder akzeptieren, präzisiert Mersenne, daß Körper auf der Senkrechten mit der gleichen Geschwindigkeit fallen, mit der sie im Kreisbogen schwingen, oder daß der Luftwiderstand beim senkrechten Fall größer ist als beim schrägen, oder schließlich, daß Körper im freien Fall mehr als 12 Fuß in einer Sekunde zurücklegen und mehr als 48 in zwei. Aber bei der Schwierigkeit, den Ton des Aufschlagens des Körpers auf dem Boden festzustellen und mithin den genauen Zeitpunkt des Aufpralls exakt zu bestimmen, sind alle unsere Beobachtungen in dieser Frage völlig falsch.³⁶

Zuzugestehen, daß seine so sorgfältig angestellten Versuche falsch sind und die auf diesen Versuchen beruhenden langen Berechnungen und Tabellen wertlos, muß Mersenne ziemlich schwergefallen sein. Aber es war unvermeidlich. Wieder einmal mußte er erkennen, daß in der Wissenschaft keine Genauigkeit zu erreichen war und daß seine Ergebnisse nur einen annähernden Wert hatten. So überrascht es nicht, daß er in seinen *Reflexiones Physko-Mathematicae* von 1647 zugleich versucht, seine experimentellen Methoden zu vervollkommen - so hält er die Pendelkugel und den fallenden Körper (ähnliche Bleikugeln) in einer Hand, um den gleichzeitigen Beginn ihrer Bewegungen zu garantieren³⁷, und befestigt sein Pendel an einer Wand, um ein gleichzeitiges Enden beider Bewegungen dadurch zu erreichen, daß die beiden Töne des Anschlagens des Pendels an der Wand und des fallenden Körpers auf dem Boden zusammenfallen - und, in einiger Ausführlichkeit, die mangelnde Zuverläs-

sigkeit der Ergebnisse zu erklären³⁸, die übrigens die seiner früheren Untersuchungen bestätigen: Der Körper scheint 48 Fuß in etwa 2 Sekunden zu fallen, und 12 in einer. Es ist jedoch unmöglich, betont Mersenne, die Länge des Pendels genau zu bestimmen, dessen Periode präzise eine Sekunde dauert, und ebenso unmöglich, die genaue Koinzidenz der beiden Anschlagtöne mit dem Gehör wahrzunehmen. Ein oder zwei Zoll oder sogar Fuß mehr oder weniger ergeben keinerlei Unterschied. Daher, schließt er, müssen wir uns mit Annäherungen zufriedengeben und dürfen nicht mehr verlangen.

Ungefähr zu der Zeit, als Mersenne seine Versuche anstellte, wurde eine andere experimentelle Erforschung der Fallgesetze in Verbindung mit der experimentellen Bestimmung des Wertes g in Italien von einer von dem berühmten Verfasser des *Almagestum HOVUM*, dem Pater Giambattista Riccioli³⁹, geleiteten Gruppe gelehrter Jesuiten durchgeführt, die merkwürdigerweise von Mersennes Arbeiten überhaupt nichts wußten und völlig unabhängig davon zu ihren Ergebnissen kamen.

Riccioli hat einen ziemlich schlechten Ruf bei den Wissenschaftshistorikern.⁴⁰ Man muß jedoch gestehen, daß er als Experimentator nicht nur sehr viel besser ist als Mersenne, sondern auch sehr viel intelligenter, und daß er ein unendlich tieferes Verständnis des Wertes und der Bedeutung der Genauigkeit hat als der Freund von Descartes und Pascal.

Im Jahre 1640, als er Professor der Philosophie am *Studium* in Bologna war, begann er eine Reihe von Untersuchungen, von denen ich hier kurz berichten will⁴¹, wobei ich hervorheben möchte, wie sorgfältig durchdacht und methodisch er bei seiner Arbeit vorging. Er will nichts als gesichert annehmen, und obwohl er vom Wert von Galileis Deduktionen als einer Tatsache fest überzeugt ist, versucht er zuerst zu begründen oder, besser gesagt, zu verifizieren, ob die Behauptung der Isochronie von Pendelschwingungen richtig ist; dann, ob das von Galilei aufgestellte Verhältnis der Länge des Pendels zur Schwingungsperiode (die Periode ist proportional zur Quadratwurzel der

Länge) sich experimentell bestätigt; und schließlich versucht er die Periode eines gegebenen Pendels so genau wie möglich zu bestimmen, um auf diesem Wege ein Zeitmeßinstrument zu erhalten, das zur experimentellen Erforschung der Fallgeschwindigkeit benutzt werden kann.

Riccioli beginnt damit, ein geeignetes Pendel vorzubereiten: eine Metallkugel an einer Kette⁴², die an einem Metallzylinder befestigt ist, der frei in zwei gleichfalls metallenen Höhlungen dreht. Eine erste Versuchsreihe zielt darauf ab, Galileis Behauptung der Konstanz der Pendelperiode dadurch zu verifizieren, daß man die Zahl seiner Schwingungen in einer gegebenen Zeit zählt. Die Zeit wird mittels einer Wasseruhr gemessen, und Riccioli, der ein tiefes Verständnis der empirischen Bedingungen der Versuche und der Messung bezeugt, erklärt, daß der doppelte Vorgang des Auslaufens und Auffüllens der Wasseruhr als Zeiteinheit zu nehmen ist. Die Ergebnisse dieser ersten Reihe bestätigen Galileis Behauptung.

Eine zweite Versuchsreihe, für die Riccioli zwei Pendel von gleichem Gewicht, aber verschiedener Länge (»Höhe«) benutzt, nämlich ein bzw. zwei Fuß, bestätigt das von Galilei aufgestellte Verhältnis der Quadratwurzel: die Zahl der Schwingungen in der Zeiteinheit ist entsprechend 85 und 60.⁴³

Mersenne hätte hier wohl aufgehört. Nicht so Riccioli. Er versteht sehr wohl, daß man, selbst wenn man seine Methode benutzt, die Wasseruhr umzudrehen, noch sehr weit von wirklicher Genauigkeit entfernt ist: Ihretwegen müssen wir immer noch anderswohin schauen, d.h. an den Himmel, das einzig wirklich genaue *horologium* dieser Welt, die von der Natur gegebenen *Organa chronou*, die Bewegungen der Himmelskörper und -Sphären.

Riccioli ist sich über die ungeheure Bedeutung von Galileis Entdeckung völlig im klaren: Der Isochronismus des Pendels verschafft uns die Möglichkeit, einen *genauen* Zeitmesser zu entwickeln. Die Tatsache, daß große und kleine Schwingungen in derselben Zeit ausgeführt werden, hat wirklich zur Folge, daß wir seine Bewegung fortsetzen können, so lange wir wollen, indem wir seiner normalen und

spontanen Verlangsamung entgegenwirken, zum Beispiel, indem wir ihr nach einer Anzahl von Schlägen einen neuen Anstoß geben.⁴⁴ Auf diese Weise kann jede beliebige Zahl von Zeitatomen akkumuliert und addiert werden.

Es ist jedoch klar, daß wir den Wert der Schwingungsperiode *exakt* bestimmen müssen, um das Pendel als *präzises* Instrument der Zeitmessung benutzen zu können. Dieser Aufgabe hat Riccioli sich mit nicht nachlassender Geduld gewidmet. Sein Ziel ist es, ein Pendel herzustellen, dessen Periode genau eine Sekunde dauert.⁴⁵ Leider ist er trotz all seiner Bemühungen nicht in der Lage, dieses Ziel zu erreichen.

Zunächst nimmt er ein Pendel, das ungefähr ein Pfund wiegt und drei Fuß, vier Zoll (römischen Maßes)⁴⁶ »hoch« ist. Der Vergleich mit der Wasseruhr war zufriedenstellend: 900 Schwingungen in einer Viertelstunde. Riccioli macht sich dann an die Verifikation mittels einer Sonnenuhr. Während sechs aufeinanderfolgenden Stunden von neun Uhr morgens bis nachmittags um drei zählt er (mit Hilfe von Pater Francesco Maria Grimaldi) die Schwingungen. Das Ergebnis ist niederschmetternd: 21706 Schwingungen statt 21660. Zudem erkennt Riccioli, daß für seine Absicht die Sonnenuhr nicht genau genug ist. Ein anderes Pendel wird vorbereitet und »mit der Hilfe von neun Jesuitenpatern«⁴⁷ beginnt er noch einmal zu zählen. Diesmal - am 2. April 1642 —während 24 aufeinanderfolgenden Stunden, von neun bis neun. Das Ergebnis sind 87998 Schwingungen, während der Sonnentag nur 86640 Sekunden zählt.

Riccioli konstruiert nun ein drittes Pendel, bei dem er die Aufhängungskette auf 3 Fuß, 4,2 Zoll verlängert. Und um die Präzision noch mehr zu erhöhen, nimmt er als Zeiteinheit nicht den Sonnentag, sondern den Sternentag. Die Zählung beginnt beim Passieren der Meridianlinie über den Schwanz des Löwen (am 12. Mai 1642) bis zu seinem nächsten Passieren am 13. Mai. Wieder ein Fehlschlag: 86 999 statt der berechneten 86400.

Enttäuscht, aber nicht geschlagen, entscheidet Riccioli sich zu einem vierten Versuch mit einem vierten Pendel, das dieses Mal etwas kürzer ist, nur 3 Fuß, 2,67 Zoll.⁴⁸ Aber es gelingt ihm nicht, seine neun

Gefährten zu der eintönigen und ermüdenden Aufgabe zu bewegen, die Schwingungen zu zählen. Schließlich bleiben ihm nur Pater Zeno und Pater F. M. Grimaldi treu ergeben. Dreimal, in drei Nächten, am 19. und 28. Mai und am 2. Juni 1645 zählen sie die Schwingungen vom Passieren der Meridianlinie von der Spica (der Jungfrau) bis zu dem des Arcturus. Die Zahlen sind zweimal 3212 und ein drittes Mal 3214 für 3192 Sekunden.⁴⁹

An diesem Punkt scheint Riccioli genug davon zu haben. Immerhin ist sein Pendel, dessen Periode 59,36" beträgt, ein vollkommen brauchbares Instrument. Die Umwandlung der Schwingungszahlen in Sekunden ist einfach. Sie kann übrigens durch vorausberechnete Tabellen erleichtert werden.⁵⁰

Indessen ist Riccioli über seinen mangelnden Erfolg beunruhigt. Er versucht deshalb, die »Höhe« eines Pendels zu berechnen, dessen Schwingungen genau eine Sekunde betragen würde, und kommt zu dem Ergebnis, daß sie 3 Fuß, 3,27 Zoll sein müßte.⁵¹ Er gesteht jedoch, daß er es nicht wirklich konstruiert hat. Andererseits hat er gewiß viel kürzere Pendel gebaut, um in der Messung von Zeitintervallen größere Vollkommenheit zu erlangen: eines von 9,76 Zoll mit einer Periode von 30", ein anderes, noch kürzer, von 1,15 Zoll, dessen Periode nur 10" beträgt.

»Ein Pendel dieser Art benutzte ich«, sagt Riccioli, »um die Geschwindigkeit des natürlichen Falles schwerer Körper zu messen«, bei den im gleichen Jahr 1645 an der Torre degli Asinelli in Bologna durchgeführten Versuchen.⁵²

Nun ist es offensichtlich unmöglich, ein so rasches Pendel einfach dadurch zu benutzen, daß man seine Schwingungen zählt. Man muß ein Mittel finden, sie zu addieren. Mit anderen Worten, man muß eine Uhr konstruieren. Tatsächlich hat Riccioli für seine Experimente eine Uhr, die erste Pendeluhr, konstruiert, jedoch kann man ihn schwerlich als großen Uhrmacher, als Vorläufer von Huygens und Hooke ansehen. Seine Uhr hat tatsächlich weder Gewicht noch Feder und nicht einmal Zeiger oder Zifferblatt. Es war in der Tat keine mechanische Uhr, sondern eine menschliche.

Um die Schläge seines Pendels zusammenzuzählen, dachte sich Riccioli ein sehr einfaches und sehr elegantes Mittel aus: Er trainierte zwei seiner Mitarbeiter und Freunde, »die nicht nur für die Physik, sondern auch für die Musik begabt waren, *un, de, tre* ... zu zählen (in Bologneser Dialekt, in dem diese Wörter kürzer sind als im Italienischen), auf eine völlig regelmäßige und gleichförmige Weise, wie es die tun müssen, die eine musikalische Aufführung dirigieren, so daß das Aussprechen jeder Zahl einer Pendelschwingung entspricht«⁵³. Mit dieser »Uhr« führte er seine Beobachtungen und Versuche durch.

Die erste Frage, die Riccioli untersuchte, betraf das Verhalten »leichter« und »schwerer« Körper.⁵⁴ Fallen sie mit gleicher oder mit verschiedener Geschwindigkeit? Eine wichtige und sehr strittige Frage, auf die bekanntlich die antike und die moderne Physik verschiedene Antworten gaben. Während die Aristoteliker behaupteten, daß Körper um so schneller fallen, je schwerer sie sind, hatte Benedetti gelehrt, daß alle Körper, zumindest alle Körper identischer Natur, das heißt spezifischer Schwere, mit der gleichen Geschwindigkeit fallen. Was die Modernen betrifft, Galilei und Baliano, gefolgt von den Jesuiten Vendelinus und N. Cabeo, so behaupteten sie, daß alle Körper, unabhängig von ihrer Beschaffenheit und ihrem Gewicht, immer mit der gleichen Geschwindigkeit (im *Vakuum*) fallen.⁵⁵

Riccioli möchte das Problem ein für allemal lösen. So macht er sich am 4. August 1645 an die Arbeit. Kugeln von gleicher Größe, aber von verschiedenem Gewicht, aus Lehm bzw. aus Papier geformt und mit Kreide überzogen (um ihre Bewegung längs der Wand und ihren Aufprall auf dem Boden leichter beobachten zu können), ließ man von der Spitze der Torre degli Asinelli fallen, die dafür besonders geeignet ist⁵⁶ und hoch genug - 312 römische Fuß -, um derartige Geschwindigkeitsdifferenzen sichtbar zu machen. Die Ergebnisse der Versuche, die Riccioli fünfzehnmal wiederholt, sind nicht zu bezweifeln: schwere Körper fallen schneller als leichte. Die Fall Verzögerung, die vom Gewicht und Umfang der Kugeln abhängt, beträgt zwischen 12 und 40 Fuß und widerspricht nicht Galileis Theorie: Sie erklärt sich durch den Luftwiderstand und wurde von ihm vorausgesehen. Ande-

rerseits sind die beobachteten Tatsachen mit den Lehren des Aristoteles völlig unverträglich.⁵⁷

Riccioli ist sich der Originalität und des Wertes seiner Arbeit völlig bewußt. Daher spottet er auch über die »Semi-Empiriker«, die nicht wissen, wie man ein schlüssiges Experiment durchführt, und zum Beispiel behaupten - oder leugnen -, daß Körper mit der gleichen Geschwindigkeit fallen, weil sie nicht in der Lage sind, den genauen Zeitpunkt des Aufpralls zu bestimmen.⁵⁸

Das zweite von Riccioli untersuchte Problem ist noch bedeutender. Er möchte das Verhältnis bestimmen, in dem der fallende Körper seine Bewegung beschleunigt. Ist es wie Galilei lehrt, eine »gleichförmig unförmige« (gleichförmig beschleunigte) Bewegung, das heißt eine Bewegung, bei der sich die durchlaufenen Räume verhalten *ut numeri impares ab unitate*, oder, wie Baliani will, eine Bewegung, bei der diese Räume eine Reihe natürlicher Zahlen darstellten? Ist die Geschwindigkeit proportional zur Dauer des Falles oder zu dem durchlaufenen Raum?⁵⁹

Mit Pater Grimaldis Hilfe stellt Riccioli eine Anzahl von Kugeln gleicher Größe und gleichen Gewichts aus Kreide her, und nachdem er durch unmittelbare Messung der Zeiten ihres Falls von verschiedenen Stockwerken der Torre degli Asinelli bewiesen hat, daß sie Galileis Gesetz folgen⁶⁰, macht er sich an die Verifikation dieses Ergebnisses (und nichts ist bezeichnender als die Umkehrung des Verfahrens), indem er diese Kugeln von zuvor berechneten, bestimmten Höhen fallen läßt, wofür er alle Kirchen und Türme Bolognas benutzt, deren Höhen passend sind, nämlich die von S. Pietro, S. Petronio, S. Iacobbe und S. Francesco.⁶¹

Die Ergebnisse stimmen in allen Einzelheiten miteinander überein. Tatsächlich ist ihre Übereinstimmung so vollkommen, die von den Kugeln durchlaufenen Räume (15, 60, 135, 240 Fuß) bestätigen Galileis Gesetz so rigoros, daß die Experimentatoren ganz offensichtlich schon zuvor von dessen Richtigkeit überzeugt waren. Und das ist schließlich nicht überraschend, da die Pendelversuche es schon voll bestätigt haben.

Jedoch selbst wenn wir zugestehen - was wir tun müssen -, daß die guten Patres die wirklichen Ergebnisse ihrer Messungen etwas korrigiert haben, müssen wir nichtsdestoweniger anerkennen, daß diese Ergebnisse von einer überraschenden Genauigkeit sind. Verglichen mit den groben Annäherungswerten Galileis und sogar mit denen Mersennes, stellen sie einen entscheidenden Fortschritt dar. Es sind sicher die besten, die sich durch unmittelbare Beobachtung und Messung erlangen ließen, und man kann die Geduld, die Gewissenhaftigkeit, die Energie und die Leidenschaft für die Wahrheit der Patres Zeno, Grimaldi und Riccioli (wie auch die ihrer Mitarbeiter) nur bewundern, die ohne ein anderes Zeitmeßinstrument als die menschliche Uhr, in die sie sich selbst verwandelten, den Wert der Beschleunigung oder, genauer, die Länge des von einem schweren Körper in der ersten Sekunde seines freien Falls durch die Luft durchlaufenen Raumes mit 15 (römischen) Fuß bestimmen konnten. Ein Wert, den allein Huygens mittels einer von ihm erfundenen mechanischen Uhr oder, besser, durch die Anwendung indirekter Methoden, die sein mathematisches Genie ihn gerade bei der Konstruktion seiner Uhr zu entdecken und zu benutzen in die Lage versetzte, zu verbessern imstande sein wird.

Es ist hochinteressant und lehrreich, die *modi procedendi* des großen holländischen Wissenschaftlers zu studieren, dem wir unsere Uhren und Chronometer verdanken. Ihre Analyse erlaubt uns, die Verwandlung der noch empirischen oder halbempirischen Versuche von Mersenne und Riccioli in ein wirklich wissenschaftliches Experiment zu verfolgen. Sie vermittelt uns zudem eine sehr wichtige Lektion, daß nämlich bei wissenschaftlichen Untersuchungen der unmittelbare Zugang keineswegs der beste oder einfachste ist und daß empirische Fakten nur im Rekurs auf die Theorie zu erlangen sind.

Huygens beginnt seine Arbeit damit, daß er am 21. Oktober 1659 die (letzten) Versuche Mersennes wiederholt, wie dieser sie in seinen *Reflexiones* von 1647 beschrieben hat. Und wieder einmal sind wir genötigt, die erschreckende Armseligkeit der ihm zur Verfügung ste-

henden Mittel zu betonen: ein an der Wand befestigtes Fadenpendel. Sein Gewicht, eine Bleikugel, und eine andere ähnliche Bleikugel werden in der einen Hand gehalten. Die Simultaneität des Aufschlags beider Kugeln an der Wand bzw. auf dem Boden wird durch die Koinzidenz der beiden dabei hervorgebrachten Töne bestimmt. Bemerkenswerterweise erreicht Huygens, der genau das gleiche Verfahren wie Mersenne anwendet, bessere Ergebnisse. Der Körper fällt, nach ihm, 14 Fuß.⁶²

Am 23. Oktober 1659 wiederholt Huygens den Versuch und benutzt diesmal ein Pendel, dessen halbe Schwingung nicht einer halben Sekunde entspricht, sondern drei Vierteln. Während dieser Zeit fällt die Bleikugel 7 Fuß, 8 Zoll. Folglich würde sie in einer Sekunde etwa 13 Fuß, 7½ Zoll fallen.⁶³

Am 15. November 1659 unternimmt Huygens einen dritten Versuch. Dieses Mal verbessert er sein Verfahren etwas, indem er sowohl das Gewicht wie die Bleikugel an einem Draht befestigt (anstatt sie in derselben Hand zu halten), bei dessen Durchschneiden sie frei werden. Zudem befestigt er Pergament an Wand und Boden, um die Wahrnehmung der Klänge deutlicher zu machen. Das Ergebnis ist etwa 8 Fuß, 9½ Zoll. Huygens ist jedoch wie Mersenne zu dem Eingeständnis genötigt, daß sein Ergebnis nur als Näherungswert gelten kann, da mit den von ihm verwendeten Mitteln drei oder sogar vier Zoll mehr oder weniger an Höhe nicht unterschieden werden können: Die Klänge scheinen zusammenzufallen. Daraus folgt, daß auf diese Weise keine exakte Messung gelingt. Aber er zieht daraus keineswegs die gleiche Folgerung. Ganz im Gegenteil. Während Mersenne auf die Idee wissenschaftlicher Genauigkeit selbst verzichtet, reduziert Huygens die Rolle des Experiments auf die Verifikation theoretisch bereits erreichter Ergebnisse. Es genügt, wenn es ihnen nicht widerspricht, wie in diesem Fall, wo die abgelesenen Zahlen mit den aus der Analyse der Bewegung des Kreispendels deduzierten Zahlen vollkommen kompatibel sind, d h. etwa 15 Fuß, 7 $\frac{1}{h}$ Zoll pro Sekunde.⁶⁴

Tatsächlich ergibt die Analyse der Pendelbewegung, wie wir sehen werden, sogar bessere Resultate.

Ich habe die paradoxe Situation der modernen Naturwissenschaft zur Zeit ihrer Entstehung bereits erwähnt: Besitz exakter mathematischer Gesetze, verbunden mit der Unmöglichkeit, sie anzuwenden, weil man außerstande war, eine präzise Messung der grundlegenden Größe der Dynamik, d. h. der Zeit, durchzuführen.

Niemand scheint das stärker empfunden zu haben als Huygens, und es ist gewiß aus diesem Grunde und nicht aus praktischen Erwägungen wie dem Bedarf guter Uhren für die Seefahrt - obwohl er die praktischen Aspekte der Frage keineswegs vernachlässigte⁶⁵ -, daß er sich ganz zu Beginn seiner wissenschaftlichen Laufbahn an die Lösung dieses grundlegenden und voranstehenden Problems der Vervollkommenung oder, besser, der Konstruktion eines vollkommenen Zeitmessers begibt.

Im Jahr 1659, dem gleichen Jahr, in dem er die soeben erwähnten Messungen anstellte, erreichte er sein Ziel mit der Konstruktion einer verbesserten Pendeluhr⁶⁶; einer Uhr, die er zur Bestimmung des genauen Wertes der Schwingung des bei seinen Versuchen verwendeten Pendels benutzte.

In der Geschichte wissenschaftlicher Instrumente nimmt Huygens' Uhr eine sehr bedeutende Stelle ein: Sie ist das erste Gerät, das in seiner Konstruktion die Gesetze der neuen Dynamik verkörpert. Sie ist das Ergebnis nicht von empirischem Versuch und Irrtum, sondern von sorgfältiger und subtiler theoretischer Untersuchung der mathematischen Struktur der Kreis- und Schwingbewegungen. Daher bietet gerade die Geschichte der Pendeluhr ein gutes Beispiel für den Wert von Umwegen, die dem direkten Weg vorzuziehen sind.

Huygens war sich in der Tat vollkommen darüber im klaren, daß geringe und weite Schwingungen des Pendels, wie es Mersenne schon entdeckt hatte, nicht in der gleichen Zeit vollzogen werden. Um einen vollkommenen Zeitmesser zu konstruieren, muß man daher a) die wirklich isochrone Kurve bestimmen und b) das Mittel herausfinden, wie man das Pendelgewicht dazu bringt, auf dieser Linie und nicht in der Peripherie des Kreises zu schwingen. Bekanntlich gelang es Huygens, beide Probleme zu lösen (obwohl er dafür eine völlig

neue geometrische Theorie entwickeln mußte)⁶⁷, und eine vollkommen isochrone Bewegung zu erreichen, die Bewegung auf der Kurve des Zykloids. Und schließlich gelang es ihm, sein Zykloidentpendel in eine Uhr einzupassen.⁶⁸

Er war jetzt in der Lage, mit einer unendlich viel besseren Ausrüstung - einer mechanischen Uhr statt einer menschlichen - und daher einer besseren Chance, Genauigkeit zu erreichen, auf der Linie der von Riccioli angestellten Versuche fortzuschreiten. Aber er versuchte nie, sie durchzuführen, denn die Konstruktion der Pendeluhr hatte ihm ein viel besseres Verfahren in die Hände gelegt.

Er hatte tatsächlich nicht nur den Isochronismus der Bewegung auf dem Zykloiden entdeckt, sondern auch - was Mersenne versucht hatte (aber erfolglos), für den Kreis herauszufinden - das Verhältnis der Schwingungszeit eines Körpers auf der zyklidalen Linie zu dem seines Falls auf dem Durchmesser des ihn erzeugenden Kreises: Diese Zeiten verhalten sich zueinander wie der halbe Umfang zu seinem Durchmesser.⁶⁹

Wenn wir ein (zyklidales) Pendel herstellen könnten, das in genau einer Sekunde schwingt, so würden wir deshalb in der Lage sein, die genaue Zeit zu bestimmen, in der ein schwerer Körper auf seinem Durchmesser fallen würde, und daraus - da die durchlaufenen Räume proportional zu den Quadraten der Zeit sind - die Strecke seines Falls in einer Sekunde zu berechnen.

Die Länge eines derartigen Pendels - das, nebenbei, kein zyklidales sein muß, da kleine Schwingungen eines gewöhnlichen (perpendikularen) Pendels, wie Huygens es Moray erläutert⁷⁰, praktisch in der gleichen Zeit ausgeführt werden wie die des zyklidalen Pendels - kann leicht berechnet werden, sobald es uns gelungen ist, die Periode eines gegebenen zyklidalen Pendels zu bestimmen.

Aber tatsächlich müssen wir uns nicht mit der Herstellung eines wirklichen Pendels plagen, denn die von Huygens aufgestellte Formel:

$$g = (4 \pi^2 r l) / 3600 \text{ oder } T = \pi \sqrt{l/g}$$

gilt allgemein und bestimmt den Wert von g als Funktion der Länge

und der Geschwindigkeit eines jeden beliebigen Pendels. In der Tat ist es ein ziemlich kurzes und rasches Pendel, das Huygens benutzte, ein nur 6,18 Zoll langes Pendel, das 4464 Doppelschwingungen in der Stunde macht. Demgemäß schloß Huygens, daß der Wert von g 31,25 Fuß beträgt (das sind 981 cm), und dieser Wert wurde seither stets anerkannt.⁷¹

Die Moral von dieser Geschichte der Bestimmung der konstanten Beschleunigung ist einigermmaßen merkwürdig. Wir haben gesehen, wie Galilei, Mersenne und Riccioli sich bemühen, einen Chronometer zu konstruieren, um eine experimentelle Messung der Fallgeschwindigkeit vornehmen zu können. Wir haben gesehen, daß Huygens da Erfolg hat, wo seine Vorgänger gescheitert waren, und eben durch diesen Erfolg erübrigt es sich für ihn, die wirkliche Messung vorzunehmen, denn sein Chronometer ist sozusagen selbst eine Messung, und die Bestimmung seiner Periode ist schon ein sehr viel genaueres und feineres Experiment als alle diejenigen, die Mersenne und Riccioli sich vorstellen konnten. Jetzt verstehen wir die Bedeutung und den Wert des von Huygens zurückgelegten Weges — der sich schließlich als Abkürzung herausstellt: Nicht nur gültige Experimente beruhen auf Theorie, sogar die Mittel, um sie durchzuführen, sind nichts anderes als leibhaftige Theorie.

ANMERKUNGEN

- 1 Ich gebrauche hier den Begriff »moderne Naturwissenschaft« für die Wissenschaft des siebzehnten und achtzehnten Jahrhunderts, das heißt für die Zeit, die grob gesprochen von Galilei bis zu Einstein reicht. Diese Naturwissenschaft wird manchmal »klassisch« genannt im Gegensatz zur zeitgenössischen; ich folge dem nicht und behalte den Begriff »klassische Naturwissenschaft« der Naturwissenschaft der klassischen, vor allem der griechischen, Antike vor.
- 2 Siehe z.B. W. Whewell, *History of the inductive Sciences*, 3 Bde. (London, T.W. Parker, 1837); E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung, historisch-kritisch dargestellt* (Leipzig, F. A. Brockhaus, 1883; 9. Aufl. ebd. 1933).

- 3 Wie bereits Tannery und Duhem erkannten, befindet sich die aristotelische Wissenschaft in viel besserer Übereinstimmung mit der gewöhnlichen Erfahrung als die von Galilei und Descartes. Siehe P. Tannery, »Galilee et les principes de la dynamique«, in: *Memoires Săentifiques*, VI, S. 400ff. (Toulouse, E. Privat 1920f); P. Duhem, *Le Systeme du Monde* (Paris, Hermann 1931), Bd. 1, S. 194 f.
- 4 Die aristotelische Tradition setzt dem abstrakten mathematischen Denken der Dynamik Galileis einen Empirismus entgegen. Zum Empirismus der Aristoteliker siehe J. H. Randall Jr., »Scientific method in the School of Padua«, in: *Journal of the History of Ideas*, I, S. 177-206 (1940).
- 5 Dies gilt natürlich nur von den sogenannten »exakten« (physikalisch-chemischen) Wissenschaften im Gegensatz zu den angewandten Naturwissenschaften oder der Geschichte (Wissenschaften, die sich mit der »natürlichen« Welt unserer Wahrnehmung und unseres Lebens beschäftigen), die nicht von Qualität absehen - es vielleicht nicht können - und die Welt des »mehr oder weniger« nicht durch eine Welt exakter Messungen ersetzen. Jedenfalls spielen weder in der Botanik noch in der Zoologie und nicht einmal in der Physiologie und Biologie genaue Messungen eine Rolle; ihre Begriffe sind noch die nichtmathematischen Begriffe der aristotelischen Logik.
- 6 Qualität kann verlangt, aber nicht gemessen werden. Das »mehr oder weniger«, das wir hinsichtlich der Qualität gebrauchen, setzt uns in die Lage, eine Skala aufzustellen, aber nicht in die, genaue Messungen durchzuführen.
- 7 Siehe I. Bernard Cohen, »A sense of history in science«, in: *American Journal of Physics*, XVIII (6), S. 343 (1950).
- 8 *Discorsi e Dimostrazioni matematiche in due nuove scienze*, in: *Le Opere di Galileo Galilei*, Bd. VIII (Florenz, Edizione Nazionale, 1898), S. 190.
- 9 So schlägt G. B. Baliano ein Gesetz vor, demgemäß durchlaufene Räume *ut mtrneri* und nicht *ut mtrneri impares* sind; Descartes und Torricelli erörtern die Möglichkeit von Räumen in kubischer und nicht in quadratischer Proportion zur Zeit; in Newtons Physik ist die Beschleunigung eine Funktion der Anziehungskraft und mithin nicht konstant. Darüber hinaus ist, wie Newton selbst zu bemerken nicht versäumt, das Gesetz der Anziehung im umgekehrten Quadrat keineswegs das einzig mögliche.
- 10 Galileis Versuch beruht auf der Annahme, (a) daß die Bewegung einer hin- und herabrollenden Kugel auf der schiefen Ebene äquivalent ist zu der eines (ohne Reibung) herabgleitenden Körpers auf dieser Ebene und (b) daß die Pendelbewegung völlig gleichmäßig ist. Da diese Isochronie eine Konsequenz seines Fallgesetzes ist, würde deren experimentelle Bestätigung auch dieses Gesetz bestätigen. Unglücklicherweise ist jedoch keine unmittelbare Messung aufeinanderfolgender Schwingungsperioden möglich, eben weil es noch keine

Uhren gibt, die sie messen könnten. Deshalb ersetzt Galilei - und man kann sein experimentelles Genie nur bewundern - die unmittelbare Messung durch den Vergleich der Bewegung zweier verschiedener Pendel (gleicher Länge), deren Gewichte, obwohl sie Schwingungen von unterschiedlicher Weite vollziehen, nichtsdestoweniger im gleichen Moment in ihre Gleichgewichtsstellung zurückkehren (den untersten Punkt der Kurve). Der gleiche Versuch mit Pendeln von unterschiedlichem Gewicht beweist experimentell, daß schwere und leichte Körper (individuell sowohl wie spezifisch) mit der gleichen Geschwindigkeit fallen. Siehe *Discorsi*, S. 12 8 ff.

- 11 Siehe *Discorsi*, S. 212 ff.
- 12 Die Geschwindigkeit des Falls ist proportional zum Sinus des Neigungswinkels. Siehe ebd., S. 215, 219.
- 13 Moderne Historiker, die gewohnt sind, Galileis Versuche zum Nutzen der Studenten in unseren Labors ausgeführt zu sehen, akzeptieren zweifellos diesen erstaunlichen Bericht als offenbarte Wahrheit und rühmen Galilei sogar dafür, somit nicht nur die empirische Gültigkeit des Fallgesetzes, sondern dieses Gesetz selbst experimentell begründet zu haben. (Siehe unter zahllosen anderen N. Bourbaki, *Elements de matkematique* IX, premiere partie, livre IV, chap. I-III, Note bistorique, S. 150 (Paris, Hermann 1949). Siehe Anhang, I.
- 14 F. M. Marin Mersenne, *Lettreä Peyresc* vom 15. Januar 163 5; siehe Tamizey de Larroque, *La Correspondance de Peyresc*, XIX, 112 (Paris, A. Picard 1892); siehe *Harmonie universelle*, I (2), S. 85, 95, 108, 112, 144, 156, 221 (Paris 1631).
- 15 Die Florentiner Elle, die Galilei zweifellos verwendete, hat 20 Zoll, d. h. 1 Fuß, 8 Zoll, und der Florentiner Fuß entspricht dem römischen, nämlich 29,57 cm.
- 16 Siehe *haacBarrow*, *LectionesMathewaticae* von \bb4/ b6 (*TheMathematkal Works ofhaac Barrow*, D. B., hg. v. W. Whewell [Cambridge 1860]), S. 216ff.; Isaac Newton, *Phihsophiac natumlis prineipia matkematica*, Vorwort London 1687).
- 17 Die Unzuverlässigkeit der Uhren des sechzehnten und siebzehnten Jahrhunderts ist wohlbekannt; Präzisionsuhren sind Nebenprodukte der wissenschaftlichen Entwicklung (siehe Willis I. Milham, *Time and timekeepers* [New York, Macmillan 1923]; L. Defossez, *Les savants du XVIIle siecle et la mesure du temps* [Lausanne, *Journal Suisse d'horlogerie* 1946, ihre Konstruktion wird jedoch gewöhnlich erklärt aus dem Bedürfnis, das Problem der Längengrade zu lösen, d. h. aus dem Druck praktischer Bedürfnisse der Navigation, deren ökonomische Bedeutung seit der Umseglung Afrikas und der Entdeckung Amerikas beträchtlich gestiegen war (siehe z. B. Lancelot Hogben, *Science for the Citizen*, London 1946, S. 235 ff.). Ohne die Bedeutung praktischer Bedürfnisse oder ökonomischer Faktoren für die Entwicklung der Wissenschaft zu leugnen, halte ich diese Erklärung, die Baconsche und Marxistische Vorurteile für die *Praxis* gegen die *Theorie* verbindet, für zumindest 50prozentig falsch: Die

- Beweggründe zur Konstruktion exakter Zeitmeßinstrumente waren und sind immer noch der wissenschaftlichen Entwicklung immanent. Siehe meinen Aufsatz, »Du monde de l'à peu près à l'univers de la precision«, in: *Critique*, Nr. 28 (1946).
- 18 Siehe ihre Beschreibung in H. Diels, *Antike Technik* (Leipzig, Teubner 1924).
 - 19 Siehe *Discorsi e Dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, in: *Le Opere di Galileo Galilei* (Florenz, Edizione Nazionale 1898), Bd. VIII, S. 141.
 - 20 Der berühmte Kronleuchter wurde in der Kathedrale in Pisa drei Jahre nach Galileis Abreise aus dieser Stadt angebracht; zu der Zeit, die Viviani für die Entdeckung angibt, war die Kuppel der Kathedrale leer. Siehe E. Wohlwill, »Über einen Grundfehler aller neueren Galilei-Biographien«, in: *Müncheuer medizinische Wochenschrift* (1903), und *Galilei und sein Kampf für die Copernicanische Lehre*, I (Hamburg und Leipzig, L. Voss, 1909); R. Giacomelli, »Galileo Galilei Giovane e il suo De Motu«, in: *Quaderni di storia e critica della scienza*, I (Pisa 1949).
 - 21 Siehe oben, Anm. 10.
 - 22 Siehe *Discorsi e Dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, in: *Le Opere di Galileo Galilei*, I. c. S. 139.
 - 23 Da die Zeiten des Fallens längs allen Kreissehnen gleich sind und die Bewegung längs des Kreisbogens schneller ist als längs der Sehne, war die Annahme für Galilei vernünftig, daß der Fall längs des Bogens der schnellstmögliche und die Pendelbewegung daher isochron sei. Daß dies nicht der Fall ist, entdeckte Merenne experimentell 1644 (siehe *Cogitata Physico-Mathematica, Phenomena Ballistica* [Paris 1644], Propositio XV, septimo, S. 42) und Huygens theoretisch, der 1659 bewies, daß die »tautochrone« Fallinie zyklod und nicht kreisförmig ist (die gleiche Entdeckung machte unabhängig davon Lord Brouncker 1662). Daß die zyklode Linie zugleich die Kurve des schnellsten Falles ist (»brachistochron«), bewiesen J. Bernoulli 1696 und, unabhängig davon - auf Bernoullis Herausforderung antwortend —, Leibnitz, L'Hôpital und Newton.
 - 24 Diese Uhr, oder genauer: ihren zentralen Regulationsmechanismus, konstruierte Viviani; siehe *Lettere di Vincenzo Vi via Mi al Principe Leopoldo de' Medici intorno all' applicazione de' pendolo all' orologio*, in: *Le Opere di Galileo Galilei* (Florenz, Edizione Nazionale 1907), Bd. XIX, S. 647ff.; siehe ebenso E. Gerland, F. Trautmüller, *Geschichte der physikalischen Experimentierkunst* (Leipzig, W. Engelmann 1899), S. 120ff.; L. Defosse, *Les savants du XVI^e siècle et la mesure du temps* (Lausanne, *Journal Suisse de l'horlogerie* 1946), S. 113 ff.
 - 25 Siehe *Harmonie Universelle* LS. 132 ff. (Paris 1636).
 - 26 Ebd., S. 136: »Quoy qu'il en soit, cette maniere d'Horloge peut servir aux observations des Eclipses de Soleil, & de la Lune, car l'on peut conter les secondes minutes par les tours de la chorde, tandis que l'autre fera les observa-

tions, & marquer combien il y aura de secondes, de la premiere à la troisieme observation, etc.

»Les Medecins pourront semblablement user de cette methode pour reconnoître de combien le poux de leur malades sera plus viste ou plus tardif à diverses heures, et divers jours, et combien les passions de choleie, et les autres le hastent ou le retardent; par exemple qu'il faut une chorde de trois pieds de long pour marquer la duree du poux d'aujourd'hui par Tun de ses tours, et qu'il en faille deux, c'est à dire un tour et un retour pour le marquer demain, ou qu'il ne faille plus qu'une chorde longue de 1/2 de pied pour faire un tour en mesme temps que le poux bat une fois, il est certain que le poux bat trois fois plus viste."

- 27 Ebd. S. 220, Corollaire 9: "Lorsque j'ay dit que la chorde de 3 pieds & demy marque les secondes par les tours ou retours, je n'empesche nullement que Ion n'accourcisse la chorde, si l'on trouve quelle soit trop longue, et chacun de ses tours dure un peu trop pour une seconde, comme j'ay quelquefois remarque, suivant les differentes horologes communes ou faibles expez: par exemplele mesme horloge cominun, dont j'ay souvent mesurer heure entiere avec 3600 tours de la chorde de 3 pieds & demy, n'a pas fait d'autresfois son heure si longue: car il a fallu seulement faire la chorde de 3 pieds pour avoir trois retours dans l'ui des quarts d'heure dudit horologe: et i'ay experimente sur une monstre à roue faite expez pour marquer les seules secondes minutes; que la chorde de 2 pieds & demi ou environ faisoit les tours esgaulx ausdites secondes. Ce qui n'empesche nullement la verite ny la iustesse de nos observations, à raison qu'il suffit de scavoir que les secondes dont ie parle, sont esgales à la duree de tours de ma chorde de 3 pieds & demy: de sorte que si quelqu'un peut diviser le jour en 24 parties esgales, il verra aisement si ma seconde dure trop, et de combien est trop longue."

Für die folgenden, in den *Cogitata physico-mathematica. Phoenicetia Ballistka*, S. 38 ff., beschriebenen Versuche benutzte Mersenne ein Pendel von nur 3 Fuß. Er hatte tatsächlich bemerkt, daß das mit 3 1/2 Fuß etwas zu lang war, obwohl der Unterschied praktisch nicht wahrnehmbar war; siehe *Cogitata*, S. 44.

- 28 "Eine Sekunde des Primum Mobile« ist die Zeit, in welcher das »Primum Mobile«, das heißt der Himmel oder die Erde, die Rotation einer Sekunde beschreibt.
- 29 Siehe *Harmonie Universelle*, I, S. 138 (Paris 1636).
- 30 Tatsächlich ist der von Galilei verwendete Fuß kürzer - 29,57 cm - als der »königliche« Fuß, den Mersenne gebraucht: 32,87 cm. Der Unterschied ihrer entsprechenden Daten ist daher noch größer, als Mersenne annahm.
- 31 Tatsächlich erhielt Mersenne 110 und nicht 108 Fuß einerseits und anderer-

- seits 146½. Aber Mersenne glaubt nicht an die Möglichkeit, beim Versuch Genauigkeit zu erreichen - und in Anbetracht der ihm zur Verfügung stehenden Mittel hat er völlig recht -, und hält sich deshalb für berechtigt, die experimentellen Daten zu berichtigen, damit sie zur Theorie passen. Auch da hat er völlig recht, solange er diesseits der Linie experimenteller Irrtümer bleibt (und das tut er). Es ist unnötig zu erwähnen, daß die Wissenschaft seither stets Mersennes Verfahren gefolgt ist. Siehe Anhang, 2.
- 32 Siehe ebd., S. 140. Bei seinen Berechnungen nimmt Mersenne - wie Galilei - an, daß der Wert der Beschleunigung eine universelle Konstante ist.
- 33 Die Geschwindigkeit der Kugel ist auf dem Quadranten des Kreises ebenso schnell wie auf dem Radius, wenn dieser 3 Fuß beträgt, oder sogar schneller, wenn er 3½ Fuß beträgt.
- 34 Siehe *Cogitata physico-mathematika, Phenomena Bailistica*, S. 38 und 39; siehe Anhang, 3.
- 35 Ebd., S. 41.
- 36 Es ist interessant zu bemerken, daß Mersenne bei seinen Versuchen den Zeitpunkt der Ankunft des fallenden Körpers auf der Erde nicht mit dem Auge, sondern mit dem Gehör bestimmt; Huygens wird, zweifellos unter Mersennes Einfluß, die gleiche Methode anwenden.
- 37 Siehe *Reflexionen Physiico-Mathematicae*, XVIII (Paris 1647), S. 152 ff.
- 38 Ebd., XIX, S. 155: *De variis difficultatibus ad fupendulum et casum gravium pertinentibus*.
- 39 Der Bericht über diese Versuche findet sich in dem *Almagestum Novum, Astro-Homiati veterem novamque compktens observationibus aliorum et propriis, Novisque Tkeorematibus, Problentatibus ac Tabulis promotam ... auctore P. Johanne Baptista Ricäoti Societatis Jesu ...* (Bologna 1651). Das Werk sollte drei Bände umfassen, aber nur der erste wurde in zwei Teilen veröffentlicht. Dieser »erste Band" ist allerdings 1504 Seiten stark (in Folio).
- 40 Riccioli ist natürlich ein Antikopernikaner und häuft in seinen großen Werken - *Almagestum Novum*, 1651, und *Astronomia Reformata*, 1665 - Argumente auf Argumente, um Kopernikus zu widerlegen, was man bedauern mag, was aber für einen Jesuiten doch eher natürlich ist. Andererseits verhehlt er nicht seine große Bewunderung für Kopernikus und Kepler und gibt eine überraschend genaue und ehrliche Darstellung der astronomischen Theorien, die er kritisiert. Er ist unermesslich gelehrt, und seine Werke, vor allem das *Almagestum Novum*, sind eine unschätzbare Quelle der Belehrung. Das macht seine Unkenntnis von Mersennes Werken um so überraschender.
- 41 Siehe *Almagestum Novum*, I (i), Buch II, Kap. XX und XXI, S. 84ff. und I (2). Buch IX, *Ah. IV*, 2 S. 384ff. Ich habe bei dem XXII. *Congres international de Philosophie des Sciences* 1949 in Paris über Ricciolis Versuche berichtet.

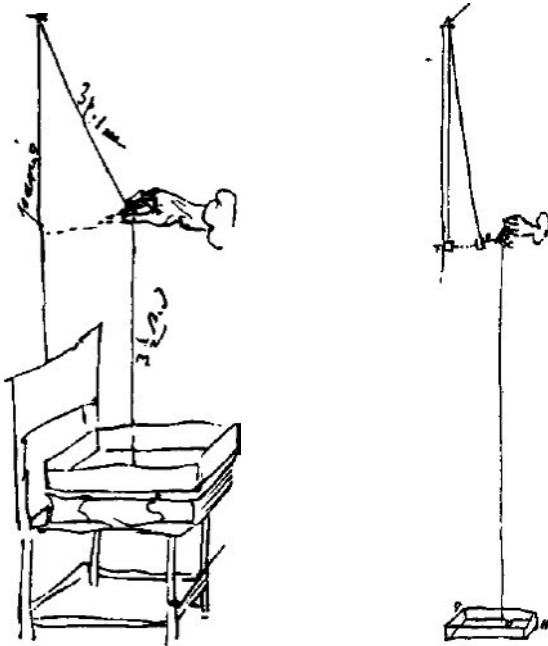
- 42 Siehe *Almagestum Novum*, I (1), Buch II, Kap. XX, S. 84.
- 43 Ebd., Kap. XXI, Prop. VIII, S. 86.
- 44 Dieses Anstoßen des Pendels ist keineswegs einfach und setzt ein langes Training voraus.
- 45 Riccioli ist, wie wir sehen werden, nicht so leicht wie Mersenne befriedigt.
- 46 Ein römischer Fuß beträgt 29,57 cm.
- 47 Siehe *Almagestum Novum*, loc. cit., S. 86. Die Namen dieser Patres sollten als Beispiele der Hingabe an die Wissenschaft aufbewahrt werden; hier sind sie ([2], S. 386): Stephanus Ghisonus, Camillus Rodengus, Jacobus Maria Palavacinus, Franciscus Maria Grimaldus, Vicentus Maria Grimaldus, Franciscus Zenus, Paulus Casarus, Franciscus Adurnus, Octavius Rubens.
- 48 Ebd., S. 87.
- 49 Ebd., S. 85. Da die Pendelbewegung nicht isochron ist, kann die hervorragende Übereinstimmung der Ergebnisse von Ricciolis Versuchen nur durch die Annahme erklärt werden, daß er seine Pendel praktisch gleiche und *kleine* Schwingungen ausführen ließ.
- 50 Riccioli liefert diese Tabellen im *Almagestum Novum*, I (2), Buch 2, Kap. XX, Prop. XI, S. 387.
- 51 Ebd., und I(2), S. 384.
- 52 Ebd., KD, S. 87.
- 53 Ebd., I (2), S. 384.
- 54 Riccioli ist seiner Zeit um hundert Jahre hinterher und glaubt immer noch an »Leichtigkeit« als eine unabhängige und der »Schwere« entgegengesetzte Qualität.
- 55 Ebd., S. 387.
- 56 Die Torre degli Asinelli hat vertikale Wände und steht auf einer ziemlich großen und flachen Plattform.
- 57 Ebd., S. 388.
- 58 Ebd., und I(1), S. 87.
- 59 Ebd. Es ist interessant zu bemerken, daß Riccioli die alten scholastischen Begriffe benutzt und die »gleichförmig unförmige« (*uniformiter difformis*) Bewegung mit der gleichförmigbeschleunigten (oder verzögerten) Bewegung identifiziert.
- 60 Er sagt uns allerdings, daß er seit 1629 über das Problem nachdachte und das Verhältnis 1, 3, 9, 27 annahm, ehe er 1634 Galilei gelesen hatte, als dies seine Oberen gestatteten. Es ist aufschlußreich zu bemerken, daß der sehr gelehrte Riccioli vor der Lektüre Galileis die *uniformiter-diffortis-Rewegung* nicht mit dem Fall identifizierte.
- 61 Ebd., S. 387. Die Versuche wurden von 1640 bis 1650 fortgesetzt.
- 62 Siehe Huygens, *CEuvres*, Bd. XVII, S. 278 (Den Haag, M. Nijhof 1932): »II D. I.

Expertus 21 Oct. 1659. Semisecundo minuto cadit plumbum ex altitudine pedum et dimidij vel 7 pollicum ciTeiter. Ergo unius secundi spatium ex 14 pedem altitudine."

- 63 Siehe Huygens, (*Favres*, XVII, S. 278: "II d. 2. Expertus denuo 23 Oct. 1659. Penduium adhibui cujus singulae vibrationes $\frac{3}{i}$ secundi unius, unde semivibratio qua usus sura erat V4.« Erat penduli longitudo circiter 6 p. 11 unc. Sed vibrationes non ex hac longitudine sed conferendo eas cum pendulo horologij colligebam. Illius itaque semivibratione cadebat aliud plumbum simul e digitis demissum, ex altitudine 7 pedum s unc. Ergo colligitur hinc uno secundo casunim ex altitudine 13 ped. 7 $\frac{1}{i}$ unc, fere.
Ergo in priori experimento debuissent fuisse non toti 3 ped. ? poll.«
"Sumam autem uno secundo descendere plumbum pedibus 13. unc. s. Mersenne 12 ped, paris, uno secundo confici scribit. 12 ped. paris. conficiunt circiter 12 ped. 8 unc Rhijnland. Ergo Mersenni spatium justo brevius est uno pede Rhijnl.«

Ein Rheinischer Fuß beträgt 11,39 cm.

- 64 Siehe ebd., S. 281: »II D. 4. 15. Nov. 1659. Penduium AB semivibrationi impendebat $\frac{1}{4}$ unius secundi; filum idem BDC plumbum B et glandem C retinebat, deinde forficibus filum incidebatur, unde necessario eodem temporis articulo globulus C et penduium moveri incipiebant. plumbum B in F palimsesto impingebatur, ut darum sonum exdtaret, giobulus in fundum capsae GH decidebat. simul autem sonabant, cum CE altitudo erat 8 pedum et $\frac{9}{i}$; unciarum circiter. Sed etsi 3 quatuorve uncijs augeretur vel diminueretur altitudo CE nihilo minus simul sonare videbantur. adeo ut exacta mensura hoc pacto obtineri nequeat. At ex motu conico penduli debebant esse ipsi 8 pedes et $\frac{9}{i}$ uniciae. unde uno secundo debebunt peragi a plumbo cadente pedes 15. unc 7 $\frac{1}{i}$ Vi proxime. Sufficit quod experientia huic mensurae non repugnet, sed quatenus potest eam comprobet. Si plumbum B et globulum C inter digitos simul contineas ijsque apertis simul dimittere coneris, nequaquam hoc assequeris, ideoque tali experimento ne credas. Mihi semper hac ratione minus inveniebatur spatium CE, adeo ut totius interdum pedis differentia esset. At cum Blum secatur nullus potest error esse, dummodo forfices ante Sectionem immotae teneantur. Penduli AB oscillationes ante exploraveram quanti temporis essent ope horologij nostri. Experimentum crebro repetebam. Ricciolus Almag. 1. 9 secundo scrupulo 15 pedes transire gravia statuit ex suis experimentis. Romanos nimirum antiquos a Rhenolandicis non differre Snellius probat.«
- 65 Als Angehöriger einer seefahrenden Nation war Huygens sich des Wertes und der Bedeutung guter Zeitmesser für die Schifffahrt ebenso wie der finanziellen Möglichkeiten der Erfindung einer Navigationsuhr völlig bewußt. Es ist be-



Skizzen aus Huygens' Handschriften

(links zu dem Zitat in Aiiim. 63, rechts zu dem Zitat in Anm.

64, aus den *CEuvres completes*, Bd. 17, 19 32, S. 278 und 280).

kannt, daß er seine Uhr in England patentieren zu lassen versuchte. Vgl. L Defossez, op. cit., S. 115 ff.

66 Huygens konstruierte 1657 die erste Pendeluhr; sie enthält schon gekrümmte Backen, um die Isochrone des (beweglichen) Pendels zu gewährleisten. Diese Backen waren jedoch noch nicht mathematisch bestimmt, sondern nur auf der Grundlage eines empirischen Versuch- und Irrtum-Verfahrens geformt. Erst 1659 entdeckte Huygens die Isochronie des Zykloiden und die Mittel, das Pendelgewicht längs eines Zykloiden laufen zu lassen.

67 Die der Evoluten geometrischer Kurven.

68 Vgl. L Defossez, op. cit., S. 65; über Hookeszeitgenössische Bemühungen vgl. Louise D. Patterson, "Pendulums of Wren and Hooke", in: Osirris, X, S. 277-322 (1952).

- 69 Siehe Chr. Huygens, *De vi cewrifuga*, 1659, in: CEnvrcs, Bd. XIV, S. 276 (Den Haag, M. Nijhoff 1929).
- 70 Siehe Christian Huygens, Brief an R. Moray vom 30. Dezember 1661, in: *CEuvres completes*, hg. von der Holländischen Gesellschaft der Wissenschaften, Bd. (II, S. 438 (Den Haag, M. Nijhoff 1890):
- Je ne trouve pas qu'il soit necessaire d'egaler le mouvement du pendule par les portions de la Cycloide pour determiner cette mesure, mais qu'il suffit de lc faire mouvoir par des vibrations fort petites, lesquelles gardent assez pres l'egalite des temps, et chercher ainsi quelle longueur il faut pour marquer, par exemple, une demie seconde par le moyen d'une horologe qui soit desia en train de bien aller, et ajustee avec la Cyloide.»
- 71 Siehe Huygens, *CEuvres*, XVII, p. 100: »Het gefal van de dobbele slaegen die het pendulum in een uyr doen moet, gegeven sijnde, quadreert het selve, en met het quadTaat divideert daer mede 12 312000000. ende de quotiens sal aenwijzen de lenghde van het pendulum. fe weten als men de twee laetste cijffers daer af snij, soo is het resterende het getal der duijmen die het pendulum moet hebben; de 2 afgesnede cijffers beteykenen, het een, de tienden deelen van een duym die daer noch bij moeten gedaen werden, het ander, de ;iOO^{ste} deelen van een duym van gelijcken daer bijte doen. Rhylandse maet.
- »bij exempel Een horologe to maeken sijnde diens pendeulum 4464 dobbele slagen in een uijr doen sal, het quadraet van 4464 is 19927296, waer mede gedeelt sijnde 12 312 000ooo, komt ^e/is ontrent. dat is 6 duym ¹/w en Vi<> van een duym. Indien het getal van de heele duijmen meer is als 12 soo moet het dooT 12 gedeelt werden om te weten hoe veel heele voeten daer in sijn.«

I. M. Mersenne, *Harmonie Universelle* (Paris 1636), S. III ff.:

Or il faut icy mettre les experiences que nous avons faites tres exactement sur ce suiet, afin que l'on puisse suivre ce qu'elles donnent. Ayant donc choisi une hauteur de cinq pieds de Roy, et ayant fait creuser, et polir un plan, nous luy avons donne plusieurs sortes d'inclinations, afin de laisser rouler une boule de plomb, et de bois fort ronde tout au long du plan: ce que nous avons fait de plusieurs endroits differents suivant les differentes inclinations, tandis qu'une autre boule de mesme figure, et pesanteur tombait de cinq pieds de haut dans l'air; et nous avons trouve que tandis qu'elle tombe perpendiculairement de cinq pieds de haut, eile tombe seulement dun pied sur le plan incline de quinze degrez, au lieu qu'elle devroit tomber seize poulces.

Sur le plan incline de vingt cinq degrez le boulet tombe un pied 5 demi, il devroit tomber deux pieds, un pouce un tiers: sur celuy de trente degrez il tombe deux pieds: il devroit tomber deux pieds et 'Ai car il feroit six pieds dans l'air, tandis qu'il tombe deux pieds ¹/_h sur le plan, au lieu qu'il ne devroit tomber que cinq pieds. Sur le plan incline de 40 degrez, il devroit tomber trois pieds deux poulces ¹/_h: et l'experience tres exacte ne donne que deux pieds, neuf poulces, car lorsqu'on met le boulet à deux pieds dix poulces loin de l'extremite du plan le boulet qui se meut perpendiculairement chet le premier; et quand on l'eloigne de deux pieds huit poulces sur le plan, il tombe le dernier: et lorsqu'on l'eloigne de deux pieds neuf poulces, ils tombent instement en mesme temps, sans que l'on puisse distinguer leur bruits.

Sur le plan de quarante cinq degrez il devroit tomber trois pieds et

¹/_h un peu davantage, mais il ne tombe que trois pieds, et ne tombera point trois pieds VJ, si l'autre ne tombe cinq pieds ¹/_A par l'air.

Sur le plan de cinquante degrez il devrait faire trois pieds dix pouces, il n'en fait que deux et neuf pouces: ce que nous avons repete plusieurs fois tres exactement, de peur d'avoir failly, à raison qu'il tombe en mesme temps de 3 pieds, c'est à dire de 3 pouces davantage sur le plan incline de 45 degrez: ce qui semble fort estrange, puisqu'il doit tomber d'autant plus viste que le plan est plus incline: Et neanmoins il ne va pas plus viste sur le plan de 50 degrez que sur celui de 40: où il faut remarquer que ces deux inclinations sont egalement eloignees de celle de 45 degrez, laquelle tient le milieu entre les deux extremes, à scavoir entre l'inclination infinie faite dans la ligne perpendiculaire et celle de l'horizontale: toutefois si l'on considere cet effet prodigieux, l'on peut dire qu'il arrive à cause que le mouvement du boulet estant trop violent dans l'inclination de 50 degrez, ne peut rouler et couler sur le plan, qui le fait sauter plusieurs fois: dont il s'ensuit autant de repos que de sauts, pendant lesquels le boulet qui chet perpendiculairement, avance toujours son chemin: mais ces sauts n'arrivent pas dans l'inclination de 40, et ne commencent qu'apres celle de 45, iusques à laquelle la vitesse du boulet s'augmente toujours de teile sorte qu'il peut toujours rouler sans sauter: or tandis qu'il fait trois pieds dix pouces sur le plan incline de cinquante degrez, il en fait six ¹/_h dans l'air au lieu qu'il n'en devrait faire que cinq.

Nous avons aussi experimente que tandis que la boule fait 3 pieds 10 pouces sur le plan incline de 50 degrez, eile fait 6 pieds ³/_h par l'air, combien qu'elle ne deust faire que cinq pieds. A l'inclination de 40, eile fait quasi 7 pieds dans l'air, pendant qu'elle fait 3 pieds 2 pouces Tb sur le plan; mais l'experience reiteree à l'inclination de 50, eile fait 3 pieds sur le pian, quoy que la mesme chose arrive à 2 pieds 9 pouces: ce qui monstre la grande difficulte des experiences: car il est tres difficile d'appercevoir lequel tombe le premier des deux boulets dont l'un tombe perpendiculairement, et l'autre sur le plan incline. J'ajoüte neanmoins le reste de nos experiences sur le plan inclinez de 60 et de 65 degrez: le boulet eloigne de l'extremite du plan de 2 pieds, 9 pou-

ces, ou de 3 pieds, tombe en mesme temps que celuy qui chet de cinq pieds de haut perpendiculairement, et neanmoins il devroit cheoir 4 pieds 'A sur le plan de 60, et 4 pieds $\frac{1}{h}$ sur celuy de 65. Sur le plan de 75 il devroit fair 4 pieds 10 pouces, et l'experience ne donne que 3 pieds $\frac{1}{h}$.

Peut estre que si les plans ne donnoient point plus d'empeschement aux mobiles que l'air, qu'ils ne tomberoient suivant les proportions que nous avons explique: mais les experiences ne nous donnent rien d'asseure, particulièrement aux inclinations qui passent 45 degrez, parce que le chemin que fait le boulet à cette inclination, est quasi egal à celuy qu'il fait sur les plans de 50, 60, et 65; et sur celuy de 75 il ne fait que demi pied davantage.

Pater Mersenne gestattet sich sogar, an der wirklichen Durchführung Galileis von einigen der von ihm erwähnten Versuche zu zweifeln. So schreibt er mit Bezug auf die Versuche mit der schiefen Ebene, die Galilei in seinem *Dialogo* beschreibt (nicht auf die er in den *Discorsi*, die ich erwähnt habe), *Harmonie Universelle*, 112, Corr. I:

Je doute que le sieur Galilee ayt fait les experiences des cheutes sur le plan puisqu'il n'en parle nullement, et que la proportion qui donne contredit souvent l'experience: et desire que plusieurs esprouvent la mesme chose sur des plans differens avec toutes les precautions dont ils pourront s'aviser, afin qu'ils voyent si leurs experiences respondront aux notres, et si l'on en pourra tirer assez de lumiere pour faire un Theoreme en faveur de la vitesse de ces cheutes obliques, dont les vitesses pourroient estre mesurees par les differens effets du poids, qui frappera dautant plus fort que le plan sera moins incline sur l'horizon, et qu'il approchera davantage de la ligne perpendiculaire.

2. Ebd., S. 128:

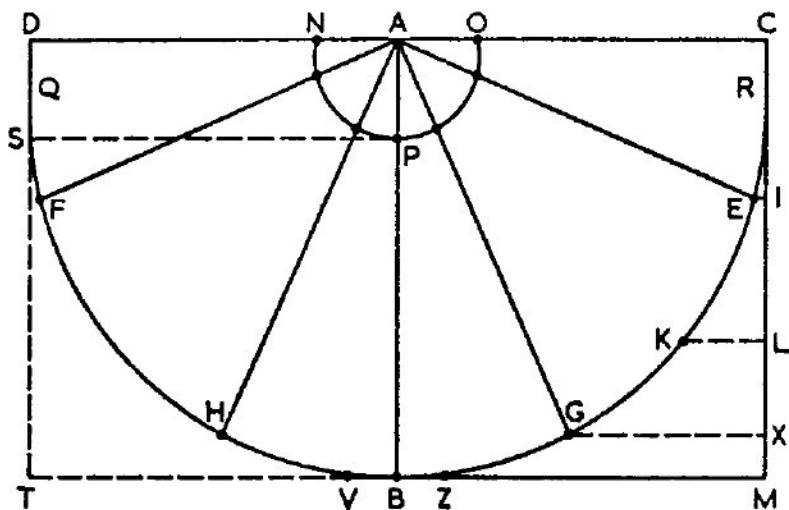
Mais quant à l'experience de Galilee, on ne peut ni imaginer d'oü vient la grande difference qui se trouve icy à Paris et aux environs, touchant le tems des cheutes, qui nous a toujours paru beaucoup moindre que le sien: ce n'est pas que je veuille reprendre un si grand

homme de peu de soin en ses experiences, mais on les a faites plusieurs fois de differentes hauteurs, en presence de plusieurs personnes, et elles ont toujours succede de la mesme sorte. C'est pourquoy si la brasse dont Galilee s'est servy n'a qu'un pied et deux tiers, c'est à dire vingt poulces de pied du Roy dont on use à Paris, il est certain que le boulet descend plus de cent brasses en 5 5" ...

Cecy etant pose, les cent brasses de Galilee fönt $166^2 h$ de nos pieds, mais nos experiences repetees plus de cinquante fois, jointes à la raison doublee, nous contraignent de dire que le boulet fait 300 pieds en 5", c'est à dire 180 brasses, ou quasi deux fois davantage qu'il ne met: de sorte qu'il doit faire les cent brasses, ou 166 pieds $^2 A$ en 3" et $^n hs$, qui fönt 3", 43"', 20" ", et non pas 5"; car nous avons prouve qu'un globe de plomb pesant environ une demie livre, et que celuy de bois pesant environ une once tombent de 48 pieds en 2", de 108 en 3", et de 147 pieds en 3" et $^{\ddot{A}}$. Or les 147 pieds reviennent à 88 et $^1 A$ brasses; et s'il se trouve du mesconte, il vient plutôt de ce que nous donnons trop peu d'escape aux dits temps, qu'au contraire, car ayant laisse cheoir le poids de 110 pieds, il est iustement tombe en 3", mais nous prenons 108 pour regler la proportion; et les hommes ne peuvent observer la difference du temps auquel il tombe de 110, ou de 108 pieds. Quant à la hauteur de 147 pieds, il s'en fallait un demi-pied, ce qui rend la raison double tres-iuste, d'autant que le poids doit faire 3 pieds en une demie seconde, suivant cette vistesse, 12 pieds dans une seconde minute; et consequemment, 27 pieds en 1" et Vi , 48 pieds en 2", 75 en 2" et Vi , 108 pieds en 3" et 147 pieds en 3" et $^1 h$, ce qui revient fort bien à nos experiences, suivant lesquelles il tombera 192 pieds en 4" et 300 en 5", pendant lequel Galilee ne met que 166 pieds ou 100 brasses, selon lesquelles il doit faire une brasse en une demie seconde, 4 en 1", ce qui fönt pres de 6 pieds $^2 h$, au Heu de 12 que le poids descent en effet.

3. F. M. Mersennus, *Cogitata physico-mathematica, Phenomena ballistica* (Paris 1644). Proposito XV: Grauium cadentium velocitatem in ratione duplicata temporum augeri probatur ex pendulis circulariter motis, ipsorumque pendulorum multifarius usus explicatur, 38-44:

Certum est secundö Blum ä puncto C ad B cadens temporis insu-
mere tantundem in illo casu, quantum insumit in ascensu ä B ad D
percircumferentiamBHFD; sitenim Blum AB 12 pedum, docetexpe-
rientia globum B tractum ad C, inde ad B spatio secundi minuti reci-
dere, & alterius secundi spatio ä B versus D ascendere. Si verö AB
trium pedum fuerit, hoc est praecedentis subquadruplum, spatio di-
midij secundi ä C descendet ad B, Sc aequali tempore ä B ad D vel S
perueniet; ad D si Blum & aer nullum afferant impedimentum, cüm
impetus ex casu C in B impressus sufficiat ad promouendum globum
pendulum ad D punctum.



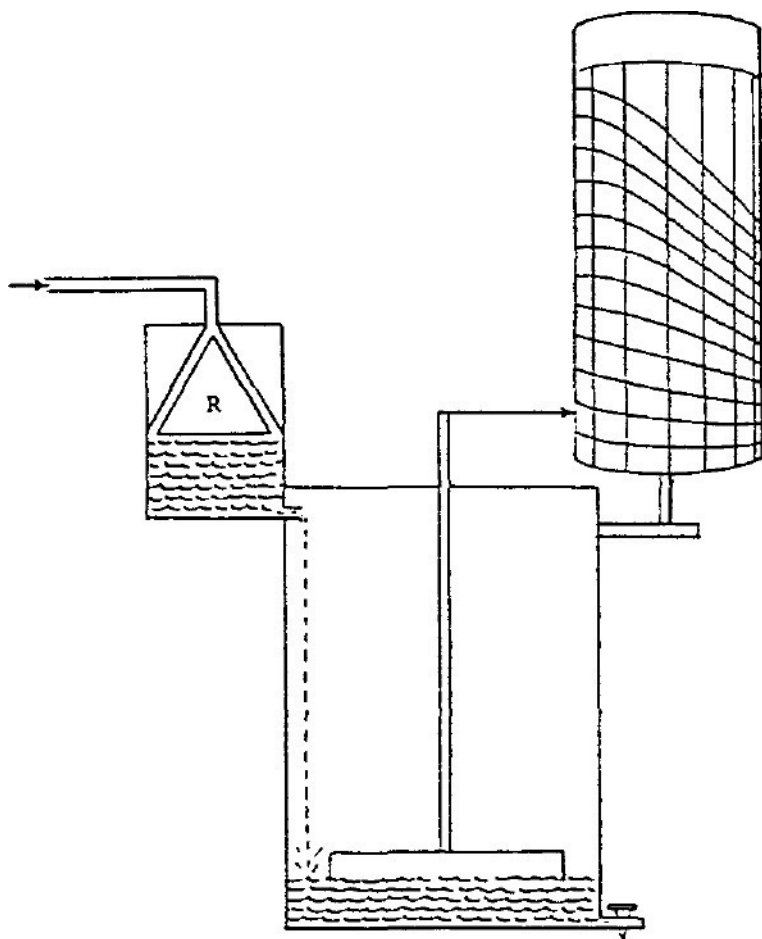
Globus igitur spatio secundi percurret dimidiam circumferentiam
CBD, & aequali tempore ä D per B versus C recurret; donec hinc inde
vibratus tandem in puncto B quiescat, siue ab aeris & fili resistentiam
vnique cursui & recursui aliquid detrahentem, siue ob ipsius impe-
tus naturam, quae sensim minuatur, qua de re postea. Nota verö
globum plumbeum vnus vnicae filo tripedali appensum, non priüs
quiescere postquam ex puncto C moueri coepit, quam trecenties sex-

agies per illam semidrcumferentiam ierit; cuius postremae vibrationes ä B ad V sunt adeo insensibiles, vt illis nullus ad obseruationes vti debeat, sed alijs maioribus, quales sunt ab F, vel ab H ad B ...

Certum est tertiö filum AP fili AB subquadruplum vibrationes suas habere celeriores vibrationibus fili BA; esseque filum AB ad PA in ratione duplicata temporum quibus illorum vibrationes perficiuntur, atque adeo tempora habere se ad filorum longitudines vt radices ad quadrata; quapropter ipsae vibrationes sunt in eadem ac tempora ratione...

Sextö, filum tripedale potest aiicui iustö videri longius ad secundum minutum qualibet vibratione notandum, cum enim in linea perpendiculari AB graue cadens citius ad punctum B perueniat, quam vbi ex C vel D per circumferentiae quadrantem mouetur, quandoquidem AB linea breuissime ducit ad centrum grauium, & tarnen ex observationibus grauia cadentia tripedale duntaxat interuallum ab A ad B semisecundo, & 12 pedes secundo conficiant, illud filum tripedale minus esse debere videtur: Iamque lib. 2. de causis sonorum, corollario 3. prop. 27, monueram eo tempore quo pendulum descendit ab A, vel C ad B per CGB, posita perpendiculari AB 7 partium, graue per planum horizonti perpendicularare partes vndecim descendere.

Quod quidem difficultatem insignem continet, cum vtrümque multis observationibus comprobatum fuerit, nempe grauia perpendiculari motu duodecim solummodo pedes spatio secundi, globum etiam circumferentiae quadrantem, cuius radius tripedalis, ä D ad B semisecundo percurrere; quae fieri tarnen nequeunt nisi globus ä C ad B per circumferentiae quadrantem descendat eodem tempore quo globus aequalis per AB: qui cum pedes 5 perpendiculariter descendat eo tempore quo globus ä C ad D peruenit, nulla mihi solutio videtur; nisi maius spatium ä graui perpendiculariter cadente percurri dicatur quam illud quod hactenus notaueram, quod cum ab vnoquöque possit obseruari, nee vlla velim mentis antieipatione veritati praeiudicare, nolui dissimulare nodum, quetn alius, si potis est, soluat. Vt vt sit obseruatio pluries iterata docet tripedale filum nongentesies spatio



Wasseruhr des Ktesibios (Ingenieur in Alexandria, *i. Jh. v. Chr.*). Das durch eine Präzisionsdüse gleichmäßig in ein Reservoir einlaufende Wasser hebt einen Schwimmer. Dieser bewegt einen Zeiger, der auf einem -Analemma' die ungleichen Stunden anzeigt.

quadrantis horae vibrari, ac consequenter horac spatio 3600: quapropter si per lineam perpendicularem graue 48 pedes spatio 2 secundorum exacte percurrat, vel fatendum est graue aequali tempore ab eandem altitudine per circuli quadrantem, ac per ipsam perpendicularem cadere, vel aerem magis obsistere grauibus perpendiculariter, quam oblique per circumferentiae quadrantem descendentibus, vel graue plures quam 12 pedes secundi spatio, aut plusquam 48 duobus secundi descendere, in eo fefellisse obseruationes, quöd allisio grauium ad pauimentum aut solum ex audito sono indicata fuerit, qui cum tempus aliquod in percurrentis 48 pedibus insumat, quo tamen graue non ampiius descendit, augendum videtur spatium ä grauibus perpendiculariter confectum ...

Septimö, globus B ex C in B cadens paulö plus temporis quam ab E, & ab E quam ä G insumit, adeout fila duo aequalia, quorum vnum ä C, aliud ä G suas vibrationes incipiat, quod ä G incipit, 36 propemodum uibretur, dum quod ä C incipit 3 5 duntaxat vibratur, hoc est vnam vibrationem lucretur quod ä G cadit, ä quo si quamlibet vibrationem inciperet, & aliud suam quamlibet a puncto C, longe citiüs illam vibrationem lucraretur. Quantö verö breuiori tempore globus leuoir, verbi gratia suberis, suas vibrationes faciat, quantöque citiüs vibrationum suarum periodum absoluat, lib. 2. de causis sonorum prop. 27 & alijs harmonicorum nostrorum locis reperiens...

Duodecimö, pendulorum istorum vibrationes pluribus vsibus adhiberi possunt, vt tractatu de horologio vniversali, & harmonicorum tum Gallicorum 1.2. de motibus, & alijs pluribus locis, tum Latorum etiam 1.2. de causis sonorum ä prop. 26. ad 30. dictum est... Tantum addo me postea deprehendisse fili tripedalem longitudinem sufficere, quae sua qualibet vibratione minutum secundum notet, cüm praedictis locis pedibus 3 *Vi* vsus fuerim: sed cum vnusquisque debeat experiri, cum horologio minutorum secundorum exactissimo, Blum quo deinceps in suis vtatur obseruationibus, non est quod hac de re pluribus moneam: adde quöd in mechanids filum illud siue tripedale, siue pedum 3 $\frac{1}{j}$ satis exacte secunda repraesentat.



Blaise Pascal (1623-1662),
Bildnis von Domat

tet, vt experientia conuictus fateberis: hinc in soni velocitate reperienda, quae secundo 230 hexapedas tribuit, hoc filo vsus sum, quo medici possint exporare varios singulis diebus aegrotorum, sanorumque pulsus.

Pascal als Wissenschaftler

Sich von Pascals wissenschaftlichem Werk und Charakter eine genaue Vorstellung zu machen ist eine leidige Angelegenheit, vielleicht sogar unmöglich. Tatsächlich ist ein großer Teil dieses Werks verlorengegangen, vor allem die große Abhandlung über die Kegelschnitte, *Traite des coniques*, von der Mersenne in seinen *Cogitata Physico-Matematica* spricht und deren Qualitäten er Huygens gegenüber rühmt¹; wir besitzen auch nicht mehr den *Traite du vide*, von dem - mit einigen Bruchstücken - nur die Vorrede², und auch nicht den *Traite de mecanique*, von dem gar nichts erhalten ist.

Pascals Persönlichkeit und Charakter wurden durch die ihm gewidmete Hagiographie so stark deformiert, daß es äußerst schwierig ist, sie ohne Vorurteil zu behandeln, was ich aber nichtsdestoweniger hier versuchen möchte, auf die Gefahr hin, als Gegner Pascals zu gelten.

Selbstverständlich kann ich Ihnen nur einen sehr raschen, kurzen und oberflächlichen Überblick geben. Während das erhaltene Werk des Physikers Pascal sehr knapp ist und insgesamt in einigen Experimenten, darunter dem berühmten Versuch am Puy de Dome und den kleinen, der Ausarbeitung oder, genauer, der Systematisierung der Hydrostatik gewidmeten Aufsätze besteht, so ist das Werk des Mathematikers³, selbst auf das Erhaltene reduziert, umfangreich und vor allem vielfältig, denn es besteht hauptsächlich in der Untersuchung und Lösung konkreter Probleme. Eine ins einzelne gehende Analyse wäre deshalb lang und schwierig, zumindest für uns. Sie wäre es sehr viel weniger für Pascals Zeitgenossen, weil sie, wie Pascal selbst, sich uns gegenüber in einem nicht zu vernachlässigenden Vor-

teil befinden. Sie kannten die Geometrie, wie wir sie nicht mehr kennen. Zweifellos kennen wir dafür viele andere Dinge, wichtigere vielleicht, fruchtbarere und wirksamere Dinge, wie z. B. die Algebra und den Infinitesimalkalkül, den sie gerade erst auszuarbeiten im Begriffe waren. Und deshalb sind wir ihnen darin überlegen, daß wir mit Leichtigkeit Probleme lösen können, die sie viel Mühe und Arbeit kosteten. Leider nützt uns die Überlegenheit gar nichts - ganz im Gegenteil -, wenn wir historisch arbeiten und ihre Gedanken genau verstehen wollen. Wir sind nicht in der Lage, wie sie, »in der Art der Alten«, d.h. der Griechen zu argumentieren, noch »in der Art der Modernen«, d. h. *grosso modo*, in der Art von Cavalieri oder Fermat. Wir begreifen z. B. nicht, warum es Pascal im Jahre 1658 für notwendig hält, »in der Art der Alten« die Gleichheit der Parabel und der Spirale zu beweisen, eine Aufgabe, die er Roberval zuschreibt, obwohl sie schon einige Zeit früher, ziemlich kompliziert, wie man zugeben muß, von Cavalieri und sehr elegant von Torricelli gestellt wurde, was Pascal nicht erwähnt. Falls es nicht gerade deshalb geschah, um — *sit venia verbo* — das Ansehen Torricellis zu schmälern, den Pascals Freund und Meister Roberval nicht ausstehen konnte, und um noch einmal die Legitimität der Methoden der Geometrie der Indivisibilen zu beweisen⁴, deren er sich dabei übrigens bedient.

Für Pascal ist in der Tat - wie übrigens auch für Cavalieri und Torricelli - die einzige, wirklich wahre und schöne Geometrie die Geometrie der Griechen. Das gilt für uns nicht mehr. Und was tun wir denn, wenn wir Geometer des siebzehnten Jahrhunderts und unter anderen Pascal studieren? Wir übersetzen Pascals Argumente in unsere Sprache, wir schreiben einige algebraische Formeln, ein oder zwei Integrale - wofür sich Pascal besonders gut eignet, wie Nicolas Bourbaki bemerkt⁵, der mathematisches Genie mit einer sehr tiefen Kenntnis dieser Disziplin verbindet -, und wir haben den Eindruck zu verstehen. Tatsächlich verstehen wir nichts, denn wenn wir Pascal in Formeln übersetzen, deformieren und denaturieren wir sogar zu tiefst sein Denken, ein Denken, das wesentlich durch die *Ablehnung* von Formeln charakterisiert ist. Diese Ablehnung bezahlte Pascal

sehr teuer, denn dadurch gelang es ihm nicht, zwei große Entdeckungen zu machen, die der Binomenformel, die er Newton überließ, und die des Differentials, die er Leibniz überließ, Entdeckungen, die sie erst nach ihm und zweifellos dank seiner machten.

Wie soll man diese Ablehnung der Formeln erklären? In letzter Instanz hängt sie sicher mit der Struktur von Pascals Geist zusammen. Die Historiker der Mathematik behaupten in der Tat, es gebe *grosso modo* zwei Typen mathematischen Denkens, nämlich Geometer und Algebraiker — einerseits die mit der Gabe, in den Raum zu schauen, »indem sie ihre Einbildungskraft stark anstrengen«, wie Leibniz sagt, die in der Lage sind, dort eine Vielzahl von Linien zu ziehen und ihre Bezüge und Verhältnisse wahrzunehmen, ohne sie zu verwirren⁶; und andererseits jene wie Descartes, die diese wie auch jede andere Anstrengung der Einbildungskraft ermüdend finden und ihr die durchsichtige Reinheit algebraischer Formeln vorziehen. Für die ersteren läßt sich jede Aufgabe konstruktiv lösen, für die letzteren durch ein System von Gleichungen. Desargues und Pascal gehören dem ersten Typus an, Descartes und Leibniz dem zweiten. Für die ersteren ist ein Kegelschnitt ein Ereignis im Raum und eine Gleichung nur dessen abstrakte und entfernte Darstellung; für die letzteren besteht das Wesen einer Kurve gerade in ihrer Gleichung, und die räumliche Darstellung ist nur deren völlig sekundäre und manchmal sogar unnütze Projektion.

Leon Brunschvicg hat auf ein paar Seiten meisterhaft den Gegensatz zwischen dem Algebraiker Descartes und dem Geometer Pascal herausgearbeitet, den Gegensatz von Descartes, dem Mann der *Methode*, die für alles gilt und die sich auf alles und überall anwenden läßt, zu Pascal, dem Mann der *Methoden*, der besonderen und speziellen Methode für jeden einzelnen und konkreten Fall. Da jedermann sie kennt, werde ich das nicht ausführen.⁷

Pascals Haltung mag uns befremdlich erscheinen, sie ist aber wahrscheinlich häufiger, als man denkt. So erinnert Paul Montel zu Recht daran, was Henri Poincaré (bei Gelegenheit von Descartes) geschrieben hat: »Eine Methode, welche das Entdecken auf das Anwenden

gleichförmiger Regeln reduziert und einen geduldigen Menschen zum großen Geometer macht, ist nicht wirklich schöpferisch.«⁸

Ich möchte hinzufügen, daß Pascals Haltung, die des eigentlichen Geometers, im siebzehnten Jahrhundert sehr viel normaler und üblicher ist als die Descartes⁹; letztere bedeutet im Verhältnis zur Tradition eine sehr viel tiefgreifendere Neuerung und einen sehr viel radikaleren Brauch als die Neuerungen Cavalieris oder selbst die von Desargues. Für das siebzehnte Jahrhundert ist Descartes, ist die Algebra, die algebraische Geometrie schwierig, ungewohnt und unverständlich.

Pascals angeborener Geometrismus wurde sicher noch verstärkt durch seine mathematische Erziehung, wie auch seine Wendung gegen die Algebra durch seine beständige Feindschaft gegen Descartes.

Über Pascals mathematische Erziehung wissen wir, ehrlich gesagt, nicht viel. Die hagiographische Erzählung von Mme. Perier kann man nicht ernst nehmen. Vom Bericht des Tallemant des Reaux kann man den Hinweis akzeptieren, daß Pascal im Alter von zwölf Jahren Euklid zu seinem Vergnügen zu lesen imstande war und rasch die ersten sechs Bücher beherrschte. Das ist schon sehr schön und selten genug, so daß man es nicht noch zu übertreiben braucht.

Wir können zugeben, daß er sich nicht mit Euklid begnügte und schon in seiner Jugend die tiefe Kenntnis der griechischen Geometrie, von Archimedes, Apollonius und Pappus erlangte, die in seinem Werk und gerade in seinem Beweis der Gleichheit von Parabel und Spirale deutlich sichtbar wird; das ist um so wahrscheinlicher, als sein Vater Etienne Pascal ein guter Kenner dieser Geometrie war. Von der griechischen Geometrie ging er zu Desargues über.

Ich neige zu der Vermutung, daß Desargues' Einfluß sich im persönlichen Umgang geltend machte. Niemand, auch nicht ein Genie wie Pascal, dürfte in der Lage gewesen sein, die Ideen und Methoden des großen Lyoner Geometers durch das einfache Lesen des *Brouillon projet d'une atteinteaux evenements des rencontres du cône avec un plan* — die man im siebzehnten Jahrhundert zu Recht *kfotis des tenehres* nannte -

zu verstehen und sich zu eigen zu machen, und das so schnell, daß er 1640 der Pariser Akademie (der des Pater Mersenne) den *Essay pour ks coniques* vorlegen konnte, worin die Inspiration durch Desargue nicht nur offensichtlich ist, sondern noch dazu von Pascal selbst klar ausgesprochen wird.¹⁰ Ich glaube folglich, daß wir in Pascal einen wirklichen Schüler von Desargues erblicken können.

Aber kehren wir zum Essay zurück. Neben Dingen, die allein Desargues angehören, finden wir da unter dem Lemma I und III das Äquivalent der berühmten »Pascalschen Aufgabe«, gemäß der die übereinstimmenden Punkte der entgegengesetzten Seiten eines dem Kegel einbeschriebenen Sechsecks sich auf einer Geraden befinden. Es ist ohne Zweifel diese einzigartige Aufgabe, von der ausgehend Pascal in seinem verlorenen *Tratte* - zumindest sagt uns das Mersenne, allerdings ohne diese Aufgabe zu zitieren — eine vollständige Theorie dieser Linien entwickeln wird.

Das einbeschriebene Sechseck wird nun »mystisches Hexagramm« genannt, und Pascal behauptet, jedem Kegelschnitt entspreche ein bestimmtes mystisches Hexagramm, so wie umgekehrt jedem Hexagramm ein bestimmter Kegelschnitt entspreche.

Das ist eine sehr schöne Entdeckung, die uns durch reinen Zufall bewahrt wurde, nämlich durch eine Abschrift von Leibniz, der 1675 Pascals Papiere in den Händen hatte. Er hat ihr Inventar erstellt, einige Blätter abgeschrieben und, zu unserem Unglück, die Originale ihrem rechtmäßigen Besitzer Etienne Perier zurückgegeben. Diese Papiere enthielten sämtliche geometrische Arbeiten Pascals, die schon im *Essay pour les coniques* und noch einmal in der *Adresse à l'Academie Parisienne* 1654 angekündigt waren.¹¹

Diese Arbeiten bilden zweifellos noch nicht den *Traite des coniques*, von dem Mersenne gesprochen hatte, aber sie stimmen weitgehend mit ihm überein. Nach Leibniz' Urteil, das übrigens durch einige Seiten des *Traite sur la generation des sections coniques* (*Ceneratio Conisectionuni*), die er uns erhalten hat¹², bestätigt wird, sind es unter der Inspiration von Desargues entstandene Abhandlungen, und Leibniz, der zu ihrem Druck rät, insistiert auf einer unmittelbaren Veröffent-

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	3	6	10	15	21	28	36		
1	4	10	20	35	56	84			
1	5	15	35	70	126				
1	6	21	56	126					
1	7	28	84						
1	8	36							
1	9								
1									

Das arithmetische Dreieck: Die erste Horizontalzeile besteht aus zehn Einsem, die zweite aus den neun Ziffern, jede folgende Zeile enthält eine Zelle weniger. Jede untere Horizontalzeile ist so angeordnet, daß jede Zelle die Summe der ihr links stehenden und der genau senkrecht über ihr stehenden Zahl enthält (nach Moritz Cantor, *Vorlesungen über Geschichte der Mathematik*. Bd. I, Leipzig -1900, S. 75of.)

lichung: Er habe nämlich, schreibt er, Bücher erscheinen sehen - gewiß die von La Hire —, die durch eine gleiche Inspiration geprägt sind und die dem Werk Pascals seine Neuigkeit rauben könnten.

Leibniz' Urteil ist also formal: Pascal ist ein Schüler und Fortsetzer von Desargues. Nun vernachlässigen die Pascal-Biographen gewöhnlich die Beziehung zwischen beiden Geometern oder stellen sie uns auf eine völlig unrichtige Weise dar. So präsentiert Emile Picard {den Jacques Chevalier in seiner Ausgabe der *CEuvres completes* Pascals¹³

zustimmend zitiert) Pascal als Erfinder der Projektionsmethoden, »dem Poncelet und Chasles im vergangenen Jahrhundert so glanzvoll folgen sollten«; so erklärt uns Pierre Humbert in seinem letzten, dem Wissenschaftler Pascal gewidmeten Buch ¹⁴, Pascal sei Desargues' Nachfolger, aber mit einem zusätzlichen Schuß Genie. Ich meinerseits glaube, er hätte eher sagen müssen: Pascal, das ist Desargues plus Klarheit und Systematisierung - tatsächlich ist Pascal klar, während Desargues es nicht ist —, aber das große schöpferische Genie, der Erfinder einer neuen Form der Geometrie, ist Desargues, und nicht Pascal.

Die zweite Epoche von Pascals mathematischer Produktion findet in den Jahren 1652 bis 1654 statt und gruppiert sich um Arbeiten über das arithmetische Dreieck. In diesem Fall legt Pascal - im Wettstreit mit Fermat und unabhängig von Galilei, der beiden auf diesem Weg voranging—die Grundlagen des Wahrscheinlichkeitskalküls. Er scheint, für eine Zeit zumindest, die Geometrie aufgegeben zu haben.

Was das arithmetische Dreieck betrifft, dessen Erfindung manchmal Pascal zugeschrieben wird, so ist es viel älter. Nach Moritz Cantor¹⁵ haben wir es von den Arabern. Eine ziemlich ähnliche Formel findet sich 1543 bei Michael Stifel, 1556 bei Tartaglia und, näher bei Pascal, 1625 bei Stevin und 1632 bei Herigone.¹⁶

Pascals Verdienst, ein sehr großes Verdienst, besteht — paradoxerweise - darin, das Dreieck um seine Spitze gedreht zu haben und es dadurch, im Prinzip zumindest, in ein unendliches Quadrat verwandelt zu haben, ein durch parallele, horizontale und vertikale Linien in eine unendliche Zahl von »Zellen« unterteiltes Quadrat. Was die eigentlichen Dreiecke betrifft, so werden sie durch die Diagonalen gebildet, welche die entsprechenden Punkte der genannten Unterteilungen verbinden. Diese Diagonalen bilden die »Basen« der folgenden Dreiecke.

In dem so gebildeten Quadrat enthalten die Zellen der ersten Reihe oder des ersten »Rangs« nur die Zahl 1, die des zweiten die einfachen Zahlen, die des dritten die triangulären Zahlen, die des

vierten die pyramidalen und so fort. Unter den Händen Pascals, der eine ganze Reihe äußerst interessanter und merkwürdiger Verhältnisse der Zahlen in den Zellen entdeckt (je nachdem welchen Platz diese Zellen in den »Basen« und den »parallelen« [horizontalen] oder »perpendikularen« [vertikalen] »Rängen« der Tabelle einnehmen), wird das »arithmetische Dreieck« zu einem ingeniösen und wirksamen Instrument zur Lösung von kombinatorischen und Wahrscheinlichkeitsproblemen. Unter anderem beweist Pascal (nach Herigone allerdings und sogar nach Tartaglia), daß die »Basen« uns die Koeffizienten der ganzen Potenzen des Binoms liefern.

Nur ein einziger Schritt wäre noch geblieben: Die Struktur und die innere Verbindung der Zahlen zu suchen, die die Basen bilden und ihre allgemeine Formel bestimmen. Aber Pascal tat ihn nicht. Seine antialgebraische Haltung, seine Abneigung gegen Formeln lassen ihm diese große Entdeckung entgehen. Er findet nicht, weil er nicht sucht.¹⁷

Dafür findet er - nach vielen anderen zweifellos -, weil er sie gesucht hat, die allgemeine Formel oder, genauer, die *Regel*, die es erlaubt, die Zahl der Kombinationen von m Objekten, die p für p genommen werden, zu bestimmen.¹⁸

Bleibt schließlich noch, da er in die gleiche Periode wie der *Traue du triangle arithmetique* gehört - oder vielleicht etwas früher anzusetzen ist -, der sehr interessante kleine Traktat über die *Sommtation des puissances numeriques*^w, worin Pascal, der nach Fermat und Roberval die Addition der Potenzen einer arithmetischen Progression der »Addition« der Linien oder der ebenen Flächen, wie sie die Geometrie der Indivisibilen praktizierte, annäherte, die im Bereich der arithmetischen Diskontinuität erzielten Ergebnisse unmittelbar in den des geometrischen Kontinuums transportiert.

Entsprechend schreibt er auch: »Wer ein ganz klein wenig in der Lehre der Indivisibilen bewandert ist, wird leicht erkennen, wie nützlich diese Konzeption zur Bestimmung krummliniger Flächen ist. Tatsächlich quadriert sich die Parabel aller Arten unmittelbar, und eine Unzahl anderer Kurven läßt sich leicht messen. Will man

das, was wir durch diese Methode für die Zahlen gefunden haben, auf kontinuierliche Mengen anwenden, so kann man folgende Regeln aufstellen ...« Diese »Regeln«, die ich nicht zitiere, führen zu der allgemeinen Regel:

»Die Summe der gleichen Potenzen verhält sich zur unmittelbar höheren Potenz der größten unter ihnen wie die Einheit zum Exponenten der höheren Potenz.«²⁰

Außer dieser ingeniosen und fruchtbaren (obwohl weniger originellen, als gewöhnlich behauptet wird) Annäherung zwischen zwei Größenordnungen - der Arithmetik und der Geometrie -, welche die klassische Tradition hartnäckig getrennt hielt, gibt es noch die denkwürdige und berühmte Stelle über die Beziehungen verschiedener Größenordnungen, worin manche die tiefste Intuition des Pascalschen Geistes erblicken wollten, eine Intuition, die sein mathematisches Denken ebenso umfasse wie sein philosophisches und sogar theologisches Denken. Hier ist die Stelle, die den *Tratte sur la sommation des puissances numeriques* beschließt und unmittelbar auf die soeben zitierte Integrationsregel folgt.²¹

Ich halte mich nicht bei anderen Fällen auf, denn es ist hier nicht der Ort, sie zu untersuchen. Es genügt, die vorangegangenen Regeln aufgestellt zu haben. Man wird die anderen ohne Schwierigkeit entdecken, indem man sich auf das Prinzip stützt, daß *bei kontinuierlichen Größen jede Zahl beliebiger Größen, einer Größe höherer Gattung hinzugefügt, ihr nichts hinzufügt*. So fügen die Punkte nichts zu den Linien, die Linien nichts zu den Flächen, die Flächen nichts zu den Körpern hinzu, oder um von Zahlen zu sprechen, wie es sich in einer arithmetischen Abhandlung schickt, so fügen die Wurzeln nichts zu den Quadraten, die Quadrate nichts zu den Kubikzahlen usw., dergestalt, daß man die Mengen geringerer Ordnung als Null vernachlässigen muß. Ich glaubte diese Bemerkungen, die denen, die mit Indivisiblen rechnen, vertraut sind, hinzufügen zu sollen, um die nie genug bewunderte Verbindung hervorzuheben, welche die nach Einheit strebende Natur zwischen den anscheinend entlegensten Dingen er-

richtet. Sie erscheint in diesem Beispiel, wo sich vor unseren Augen die Berechnungen kontinuierlicher Größendimensionen mit der Addition numerischer Potenzen verbinden.«

Eine wunderbare Stelle, zweifellos, aber Sie bemerken, daß Pascal sagt: »Ich glaubte diese Bemerkungen, die denen, die mit Indivisiblen rechnen, vertraut sind, hinzufügen zu sollen«, und diese Bemerkungen sind in der Tat nichts anderes als die Formulierungen einer ziemlich banalen und allen Mathematikern, ob sie nun mit Indivisiblen rechnen oder nicht, bekannten Sache. Die Tatsache, daß eine Linie nicht länger wird, wenn man einen Punkt hinzufügt, und eine Fläche nicht größer, wenn man eine Linie hinzufügt, noch ein Körper, wenn man eine Fläche hinzufügt, ist in den formalen Prinzipien der Geometrie impliziert²², die seit je bekannt sind und für den Geometer nichts Begeisterndes haben, zumindest wenn er sich nicht das Problem des Kontinuums vornimmt.²³ Die Beziehung zwischen der Addition numerischer Potenzen (der Zahlen) und der der Indivisiblen (kontinuierlicher Größen) ist zweifellos weniger bekannt und viel neuer, aber es ist die Grundlage selbst der Arbeiten von Fermat und Roberval, deren Einfluß bei Pascal den von Desargues ersetzt zu haben scheint. Wiederum zeigt sich Pascals Genie in der Ingeniosität seiner Entdeckungen und der Klarheit seiner Formulierungen, aber nicht in der Erfindung neuer Prinzipien.

Pascals mathematisches Genie leuchtet ein letztes Mal - aber in seinem vollen Glanz — in einer Gruppe von Arbeiten, die der (zykloiden) Rolle gewidmet sind. Die Geschichte dieser Rückkehr Pascals, der sich seit seiner »Feuernacht« (23. 11. 1654) entschieden von der Welt - und der Wissenschaft - abgewandt und alles außer Gott vergessen hatte, ist wohlbekannt: Pascal litt, wie uns Marguerite Perier berichtet²⁴, im Jahr 1657 einmal an heftigen Zahnschmerzen und »entschloß« sich, zu seiner Erleichterung sich mit etwas zu beschäftigen, das durch seine große Kraft seinen Geist derart beanspruchte, daß er gar nicht an sein Leiden denken könne. Dazu stellte er sich das von Pater Mersenne formulierte Problem der Rolle, das noch niemand lösen konnte und mit dem er sich noch nie befaßt hatte. Er

dachte es so gut durch, daß er die Lösung und alle Beweise fand. Diese eifrige Beschäftigung bannte seine Zahnschmerzen, und als er nach der Lösung mit der Arbeit aufhörte, fühlte er sich von seinem Übel geheilt.« Jedenfalls »schrieb er nichts davon auf und legte keinen Wert auf diese Entdeckung, da er sie für eitel und unnütz ansah und sich keineswegs in der Arbeit an seinem Werk über die Religion unterbrechen wollte«. Erst auf Drängen des Herzogs von Roannez, der ihm zu bedenken gab, daß es zur Bekämpfung der Atheisten und Freigeister »gut sei, ihnen zu zeigen, daß man mehr als sie in allem wisse, was Geometrie und exakte Wissenschaft betreffe«, und daß man sich nicht aus Unwissenheit der Offenbarung des Glaubens unterwerfe, sondern im Gegenteil besser als andere die Grenzen der Vernunft und den Wert der Beweise kenne, entschied sich Pascal, seine Entdeckungen zu redigieren und sie zum Gegenstand einer Preisaufgabe zu machen.

Im Juni 1658 richtete Pascal unter dem Pseudonym Arnos Dettonville einen Rundbrief an die europäischen Mathematiker mit dem Vorschlag, die Lösung von sechs - sehr schwierigen - Fragen herauszufinden: über den Flächeninhalt des Zykloidalsegments, das Zentrum der Gravitation dieses Segments, die Rauminhalte und Gravitationszentren der Körper, die sich durch Drehung dieses Segments um seine Grundlinie und seine Achse bilden, und bot den Bewerbern zwei Preise von vierzig bzw. zwanzig Pistolen. Ein zweiter Rundbrief präziserte die Bedingungen, unter denen die Preise zuerkannt würden.

Die Preissumme wurde bei Carcavy hinterlegt, und an Carcavy sollten die Bewerber ihre Denkschriften senden.

Marguerite Periers Geschichte ist sehr schön. Leider ist sie wenig wahrscheinlich. Selbst wenn man die Episode mit den Zahnschmerzen zugestände, so bliebe doch in der Tat völlig unvorstellbar, daß Pascal sich plötzlich nach zwanzig Jahren der 1636 von Mersenne gestellten Aufgabe erinnerte und daß er nie über die Eigenschaften des Zykloids nachgedacht hatte, einer damals sehr modischen Kurve, mit der sich Descartes, Fermat, Torricelli und vor allem sein Freund

und Meister Roberval beschäftigt hatten.²⁵ Zudem enthält Marguerite Periers Bericht eine ziemlich gravierende Ungenauigkeit: Sie sagt, Pascal habe »die Frist auf achtzehn Monate festgesetzt«. Tatsächlich hat Pascal, der nach eigenem Geständnis mehrere Monate an der Lösung der zur Aufgabe gestellten Probleme gearbeitet hatte²⁶ und seinen ersten Rundbrief im Juni 1658 verschickte, die Frist für die Antworten auf den I. *Oktober dieses Jahres* begrenzt! Das ließ, wenn man die Verzögerungen der Post abrechnet, den Bewerbern nicht einmal drei Monate Zeit. Es überrascht nicht, daß John Willis am 18. August 1658 eine erste Antwort an Carcavy sendet und eine Verlängerung der Frist fordert oder zumindest die Festsetzung des 1. Oktobers für das Absenden und nicht für das Eintreffen der Antworten, wobei er geltend machte, daß die Bedingungen des Wettbewerbs die französischen und vor allem die Pariser Mathematiker bevorzugten. Pascal lehnte ab. In seinen sehr von oben herab und in unangenehmem Ton geschriebenen *Reflexions sur les conditions des prix attachesä Ia Solution des probletnes concernant Ia cydoide* (Rundbrief vom 7. Oktober 1658, der das Ende des Wettbewerbs ankündet) rechtfertigt er seine Ablehnung durch die sehr merkwürdige Erwägung, falls man es anders mache, »wären selbst die, die die Preise gewonnen hätten, da sie sich unter den ersten befanden, deren Lösung man am 1. Oktober erhalten hätte, dessen niemals sicher, da sie ihnen stets durch andere, vorher abgeschickte Lösungen bestritten werden könnten und sie, auf das Zeugnis von Bürgermeister und Postbeamten kaum bekannter Städte weit hinten bei den Moskovitern, in der Tatarei, Cochinchina oder Japan davon ausschlossen«²⁷ Man sieht sehr wohl, daß Pascal keinerlei Lust hatte, seine 60 Pistolen aufs Spiel zu setzen, und fest entschlossen war, seinen eigenen Wettbewerb zu gewinnen. Trotz der ungünstigen Bedingungen erregte der Wettbewerb großes Interesse: Sluse schrieb an Pascal (6. Juli 1658), die erste Frage habe er seit langem gelöst, die anderen erschienen ihm jedoch als zu gewagt; Huygens, der die Frage auch schwierig fand, löste vier davon²⁸, Christopher Wren löste keine, berichtigte aber dafür den Zykloiden — der somit die zweite berichtigte Kurve wurde — und fand,

daß seine Länge viermal dem Durchmesser des erzeugenden Kreises entspreche. Wallis schickte eine ziemlich lange Denkschrift, in der er sich an alle von Pascal gestellten Fragen machte und sie sehr ingenieös behandelte. Da er mit großer Eile arbeitete, unterliefen ihm mehrere Rechenfehler und sogar methodische Fehler, von denen er einen Teil, aber nicht alle, korrigierte.²⁹ Schließlich schickte ein Jesuit, Pater Lalouere, Professor am College von Toulouse, eine Denkschrift, die er — zu Unrecht — für preiswürdig hielt.

Unmittelbar nach den *Reflexion* veröffentlichte Pascal drei Schriften, die die Geschichte des Wettbewerbs berichteten und die Gründe erläuterten, warum die Preise nicht vergeben wurden³⁰, und danach, im Dezember 1658, eine *Lettre ä A4. de Carcavi*, worin er die Ergebnisse darstellte und die Methoden, die er dafür angewendet hatte. Im Januar 1659 wurden die *Lettres de A. Dettonvi He contenant quelques-unes de ses inventions en geometrie* publiziert, die unter anderem den berühmten *Traue des sinus des quarts de cercle* enthielten, der Leibniz zur Erfindung des Differentialkalküls inspirierte, den Beweis »nach Art der Alten« der Gleichheit der Spiral- und Parabellinien und (in einem Brief an Huygens) einen Beweis (aber nach Art der Modernen), daß »die Kurven der Rollen stets ihrer Natur nach Ellipsen gleichen«, wirklichen Ellipsen im Fall der verlängerten oder verkürzten Zykloiden und zu Geraden gestauchten Ellipsen im Fall der gewöhnlichen Zykloiden.³¹ Das von Pascal in diesen Abhandlungen entfaltete Gespür für Feinheiten, sein Erfindungsreichtum und seine Virtuosität sind schwindelerregend. Er handhabt mit unerreichter Gewandtheit die Methoden der Alten und der Modernen. Er nötigt Bewunderung ab, und Huygens, der ihm immerhin »eine etwas zu kühne Methode, die sich zu sehr von der geometrischen Genauigkeit entfernt«, vorwirft (Huygens ist ein Adept der Methoden der »Alten« und hat die der »Modernen«, d.h. den Gebrauch der Indivisibilen, nie versucht), schreibt dennoch, »er zögere, sich in einer Wissenschaft, wo er so stark sich auszeichne, seinen Schüler zu nennen«. Man hätte indessen unrecht, diese Arbeiten Pascals, wie es oft geschieht und wie es z. B. Emile Picard tut, »die erste Abhandlung über den Integralkalkül« zu nen-

nen. Gewiß ist es richtig, daß man »in Pascals Schrift über die Rolle unter außerordentlich ingenieusen geometrischen Formen die grundlegenden Ergebnisse findet, die sich auf das beziehen, was die Geometer heute gekrümmte und doppelte Integrale nennen«, und daß es, »um die Wirksamkeit dieser Methoden anzudeuten, genüge, an den schönen Lehrsatz über die Gleichheit des Ellipsenbogens mit dem Bogen des verlängerten oder verkürzten Zykloids zu erinnern. Auch ist es kein Problem, wie ich schon erwähnte, Pascals Argumente in die Sprache der Infinitesimalrechnung zu übertragen. Richtig aber ist auch, daß man dabei nur eine Übersetzung erhält und daß Pascals Argument wesentlich geometrisch bleibt. Der »Fall« des »charakteristischen Dreiecks« ist in dieser Hinsicht sehr bezeichnend: Es ist für Leibniz »charakteristisch«, für Pascal aber keineswegs. Denn Pascal denkt nicht den *Bezug*, er denkt den *Gegenstand*, und deswegen verfehlt er die Leibnizsche Entdeckung, so wie er einige Jahre früher die Newtonsche verfehlt hatte.

Ich sagte, Pascal handhabte die Methoden der Modernen, d. h. die Geometrie der Indivisibilen, mit unerreichter Virtuosität und Originalität. Seine *Interpretation* dieser Methoden ist hingegen ziemlich enttäuschend. Pascal scheint den tiefen Sinn von Cavalieris Konzeptionen nicht verstanden zu haben, für den die »indivisiblen« Elemente eines geometrischen Gegenstandes eine Dimension weniger als dieser Gegenstand haben³², und er präsentiert uns in einer berühmten und bewunderten Stelle der *Lettre à AI de Carcavi*³³ die Konzeptionen von Roberval - für den sie ebenso viele Dimensionen haben —, die in bezug auf Cavalieris Auffassungen einen Widersinn bedeuten, »um zu zeigen, daß alles, was durch die wirklichen Regeln der Indivisibilen bewiesen wird, sich auch streng und nach Art der Alten beweisen läßt; dergestalt, daß die beiden Methoden sich nur in der Ausdrucksweise unterscheiden, was die vernünftigen Menschen nicht verletzen kann, sobald man ihnen dargelegt hat, was man darunter versteht«.

»Und deshalb«, fährt Pascal fort, »tue ich mich in der Folge gar nicht schwer, mich bei der *Summe der Linien* oder der *Summe der Flächen* oder

der *Summe der Ordinalen* der Sprache der Indivisibilen zu bedienen, was denen, die diese Lehre nicht verstehen, nicht geometrisch zu sein scheint, und die es für ein Vergehen gegen die Geometrie halten, die Fläche durch eine unbegrenzte Zahl von Linien auszudrücken. Das rührt von ihrem mangelnden Verständnis her, denn man versteht ja darunter nichts anderes als die Summe einer unbegrenzten Anzahl von Dreiecken, die aus jeder Ordinate mit jedem der kleinen gleichen Anteile des Durchmesser bestehen, deren Summe gewiß eine Fläche ist.

Pascal ist, kurz zusammengefaßt, ein Mathematiker von sehr großem Talent, der in früher Jugend das Glück gehabt hat, von Desargues geschult zu werden, oder zumindest stark unter dessen Einfluß stand, und der in seinem reifen Alter das Pech hatte, stark von Roberval beeinflusst zu werden.³⁴ Er ist gewiß einer der ersten Geometer seiner Zeit, ohne daß man ihn jedoch in den gleichen Rang wie die drei mathematischen Genies erheben könnte, die den Stolz Frankreichs im siebzehnten Jahrhundert bilden, nämlich Descartes, Desargues und Fermat.

Wenden wir uns nun dem Physiker Pascal zu. Der ist sehr viel bekannter als der Mathematiker, und das aus gutem Grund: Während Pascals mathematische Schriften für uns ziemlich schwierig sind, sind es die des Physikers Pascal gar nicht. Daher werden sie auch beständig neu herausgegeben. Jedermann kennt die faszinierenden Berichte seiner *Experiences nouvelles touchant le vide* und *La grande experience de VequÜibre des Hqueurs* (das Experiment vom Puy de Dome). Das sind, wie man oft und zu Recht gesagt hat, Juwelen der wissenschaftlichen Literatur, an denen man die Klarheit der Darstellung, die gedankliche Dichte und die Kunst, mit welcher die Versuche, einer nach dem anderen, der Aufmerksamkeit des Lesers dargeboten werden, nur bewundern kann.

In Pascals Stil ist etwas Magisches, und die gleichen Gedanken, die man bei anderen findet, nehmen eine andere Gestalt an, wenn man sie bei ihm liest. Drei verworrene Seiten des Pater Mersenne oder

eine von Roberval werden durch Pascal auf zehn Zeilen reduziert, und man hat den Eindruck, es sei etwas vollkommen anderes. Man ist versucht, das Gesetz von Boyle-Mariotte heranzuziehen und zu behaupten, daß die Dichte des Gedankens umgekehrt proportional zum Umfang — oder zur Ausdehnung des Textes ist.

Ich befürchte allerdings, daß diese Magie uns ein wenig unserer kritischen Fähigkeiten beraubt und sich einer inhaltlichen Prüfung von Pascals Bericht entgegenstellt. Versuchen wir es daher ohne Vor-eingenommenheit. Jedermann kennt den Text der *Experiences nouvelles touchant k vidc*. Ich gestatte mir dennoch, einige Bruchstücke zu zitieren, ohne mich auf die Geschichte der Umstände einzulassen, die seine Veröffentlichung veranlaßt haben ³⁵:

»Die Veranlassung zu diesen Experimenten«, schreibt Pascal, »war so: vor ungefähr vier Jahren machte man in Italien einen Versuch mit einem Glasrohr, dessen eines Ende offen und dessen anderes hermetisch versiegelt ist. Man füllt es mit Quecksilber, schließt die Öffnung mit dem Finger oder sonstwie, dreht es erst waagerecht und dann mit der verschlossenen Öffnung nach unten und taucht es zwei oder drei Finger tief in anderes Quecksilber, das sich in einem halb mit Quecksilber, halb mit Wasser gefüllten Gefäß befindet. Öffnet man jetzt das Rohr, das stets in das Quecksilber des Gefäßes getaucht bleibt, unten, so sinkt das Quecksilber im Rohr teilweise und läßt oben im Rohr einen anscheinend leeren Raum, während es unten bis zu einer gewissen Höhe mit dem Quecksilber gefüllt bleibt. Hebt man jetzt das Rohr ein wenig, bis seine untere Öffnung, die bisher in das Quecksilber des Gefäßes getaucht war, die Schicht des Wassers erreicht, so steigt das Quecksilber im Rohr mit dem Wasser nach oben, und die beiden Flüssigkeiten mischen sich im Rohr, aber schließlich sinkt alles Quecksilber, und das Rohr ist ganz voller Wasser.

Dieses Experiment wurde aus Rom dem Pater Mersenne, Minorit in Paris, gemeldet, der es im Jahre 1644 in Frankreich nicht ohne die Bewunderung aller Gelehrten und Wißbegierigen verbreitete, durch deren Mitteilung es allseits bekannt wurde. Ich habe es von Herrn Petit, dem Aufseher der Befestigungswerke, der in allen Wissenschaft-

ten sehr erfahren ist und es unmittelbar von Pater Mersenne selbst erfahren hatte. Darauf machten wir in Rouen zusammen diesen Versuch, besagter Herr Petit und ich, genauso wie er in Italien angestellt worden war, und fanden Punkt für Punkt, was man uns berichtet hatte, ohne indessen etwas Neues zu bemerken.«

Pascals Bericht enthält zwei Lücken. Er sagt in der Tat nicht, daß die Pariser »Gelehrten und Wißbegierigen«, die Torricellis Versuche in Paris nachmachen wollten, das nicht schafften, und zwar aus einem wichtigen Grund: Die Pariser Glasbläser waren außerstande, ihnen Glasrohre zu liefern, die stabil genug waren, um den Druck von drei Fuß Quecksilber auszuhalten. Die Glasbläser in Rouen waren denen in Paris überlegen. Das »Blasrohr«, das Pierre Petit bei ihnen bestellte, hielt stand. Aus diesem Grund war Pierre Petit (mit Pascal) in Frankreich der erste, dem es gelang, die Leere Torricellis zu erzeugen. Pascal verschweigt uns auch, daß der Versuch, den er mit Pierre Petit macht und auf dem seine eigenen gründen oder, zumindest, von dem sie ausgingen, den berühmten italienischen Gelehrten zum Urheber hatte.

Der Grund dieses doppelten Schweigens ist ziemlich schwer verständlich. Man könnte jedenfalls vermuten, daß Pascal seine Pariser Freunde nicht verletzen oder verstimmen wollte, indem er ihren Fehlschlag öffentlich bekanntgab, einen Fehlschlag, für den sie übrigens keineswegs verantwortlich waren. Und daß er glaubte, genügend neue und originale Versuche erdacht und durchgeführt zu haben, um sich nicht rühmen zu müssen, (mit Petit) *der erste* gewesen zu sein, dem ein alter Versuch gelungen war. Aber warum verschweigt er Torricellis Namen? Pascal sagt uns zweifellos oder, genauer, er sagt Herrn deRibeyre (16. Juli 1651), daß er um diese Zeit, d.h. 1646 oder 1647, nicht wußte, daß der in Frage stehende Urheber Torricelli war und daß er, nachdem er es erfahren hatte, den Namen stets angab. Jedenfalls ist diese Wissenslücke zumindest überraschend, da Petit in seinem Brief an Chanut sich ausdrücklich auf den Versuch »von Torricelli« bezieht und da Roberval in der ersten *Narration* an Desnoyer, geschrieben (im Oktober 1647) zur Verteidigung der - relativen -

Priorität Pascals gegen die Ansprüche Magnis auf absolute Priorität, ihn ausdrücklich nennt.³⁶

Aber lassen wir das. Fahren wir fort und vervollständigen wir den Bericht. Die Versuche, die Petit mit ihm durchgeführt hatte, waren an sich vollkommen ausreichend, um die traditionelle Lehre von der Unmöglichkeit oder dem »horror vacui«, dem Erschrecken vor der Leere, zu widerlegen. Aber sie überzeugten die Anhänger der Tradition nicht. So entschließt sich Pascal, nach Petits Abreise, diesmal allein eine Reihe von verschiedenen — und neuen — Versuchen zu machen, um die Ungläubigen zu überzeugen und das alte, hartnäckige Vorurteil endgültig zu zerstören.

Die Versuche von Petit und mehr noch die von Pascal fanden beträchtlichen Widerhall und verschafften Pascal wohlverdienten Ruhm. Aber im Herbst 1647 erhält Pater Mersenne einen Brief aus Warschau, mit dem Datum des 24. Juli, worin Pierre Desnoyers, ein Franzose, der Maria Gonzage dorthin gefolgt war, ihm die Versuche »eines Kapuziners namens Valeriano Magni« ankündigt, »der eine Philosophie drucken läßt, die beweist, daß das Leere sich in der Natur finden kann«. Der Empfang des Briefes und der »Philosophie« des Pater Magni³⁷, worin dieser sich den Ruhm zuschreibt, als erster die Existenz des Leeren bewiesen und mit eigenen Augen *Locum sine locato, Corpus motum successive in vacuo, Lumen nulli corporis inhaerem* gesehen zu haben, nötigten Pascal zur Veröffentlichung seiner *Nouvelles experiences*. Roberval seinerseits sandte an Desnoyer eine *Narration*, worin er sich gegen die Ansprüche Magnis wendet, den er beschuldigt, Torricelli einfach plagiiert zu haben, und von den Arbeiten seines jungen Freundes berichtet.³⁸

Im Titel seiner kleinen Schrift sagt Pascal, daß er Versuche »in Rohren, Spritzen, Blasebalgen und Siphons verschiedener Länge und Gestalt, mit verschiedenen Flüssigkeiten wie Quecksilber, Wasser, Wein, Öl, Luft usw.« durchgeführt habe. Er sagt außerdem, daß seine kleine Schrift nur die vorläufige Kurzfassung »einer größeren Abhandlung über denselben Gegenstand« sei. Die Zuschrift »An den Leser« unterrichtet uns darüber, daß »die Umstände ihn verhinder-

ten, gegenwärtig eine vollständige Abhandlung zu liefern, worin er eine Anzahl neuer Versuche geschildert hat, die er bezüglich des Vakuums gemacht hat, sowie die daraus gezogenen Folgerungen«³⁹, und daß er deshalb die wichtigsten in dieser Kurzfassung darstellt, »worin man im voraus den Plan des vollständigen Werkes sieht«.

»Der Plan des vollständigen Werkes« wird, um die Wahrheit zu sagen, in den *Nouvelles experiences* keineswegs deutlich. Tatsächlich steht außer Zweifel, daß es die Absicht des *Traite* war, zu beweisen, daß die dem »horror vacui« zugeschriebenen Wirkungen durch den Druck (oder das Gewicht) der umgebenden Luft verursacht werden. Nun erwähnen die *Nouvelles experiences* dieses Thema überhaupt nicht und beschäftigen sich allein mit dem Beweis der Existenz des Vakuums. Dieser Beweis wird in zwei Schritten geführt: Zunächst erzeugt man einen »anscheinend leeren« Raum, daraufzeigt man, »daß der anscheinend leere Raum von keinerlei in der Natur bekannten und durch einen Sinn wahrgenommenen Materie erfüllt ist«. Daraus schließt man, »bis zum Erweis, daß er irgendeine Materie enthalte«, daß er wirklich leer und »von jeder Materie frei« ist.

Pascal berichtet von acht hauptsächlichen Versuchen: Versuche mit der Spritze, mit dem Blasebalg, mit einem Glasrohr von 46 Fuß Länge, Versuche mit einem ungleichseitigen Siphon, dessen längeres Rohr 50 Fuß und das kürzere 45 Fuß mißt, Versuche mit einem wassergefüllten Rohr von 15 Fuß, worin man ein Seil anbringt und das man in ein mit Quecksilber gefülltes Becken taucht, noch ein Versuch mit der Spritze und zwei Versuche mit einem Siphon, dessen längeres Rohr 10 Fuß, dessen anderes $9\frac{1}{2}$ mißt, und die in zwei Quecksilberbecken getaucht werden. Diese sehr ingeniosen Experimente zeigen, daß die Natur a) weit davon entfernt, der Erzeugung des Leeren einen unüberwindlichen Widerstand entgegenzusetzen, ihr nur begrenzt Widerstand leistet, b) daß eine um ein wenig größere Kraft als die, womit das Wasser von 31 Fuß Höhe herunterzufließen neigt, dazu ausreicht und daß die Natur darüber hinaus sich der Erzeugung eines großen Vakuums nicht mehr entgegenstellt als der eines kleinen und c) daß ein einmal erzeugtes Vakuum beliebig

vergrößert werden kann, ohne daß sie sich dem widersetzt. Von diesen Versuchen betrachten wir nur die beiden berühmtesten, den dritten und den vierten, diejenigen, bei welchen Pascal Glasröhren von 46 und sogar von 50 Fuß benutzt zu haben angibt. Zitieren wir die Beschreibung:

3) »Ein Glasrohr von 46 Fuß, dessen eines Ende offen, das andere hermetisch versiegelt ist, wird mit Wasser oder eher mit sehr rotem Wein gefüllt, um gut sichtbar zu sein, dann zugestöpselt und so gedreht, und senkrecht, mit der zugestöpselten Öffnung nach unten in ein wassergefülltes Gefäß gebracht und darin ungefähr einen Fuß tief eingetaucht; wenn man den Stöpsel öffnet, sinkt der Wein im Rohr bis zu einer gewissen Höhe, die etwa 32 Fuß über der Wasserfläche in dem Gefäß liegt, leert sich und mischt sich mit dem Wasser des Gefäßes, das er unmerklich färbt, sinkt aus dem oberen Teil des Glasrohrs und läßt einen Raum von etwa 13 Fuß leer, wie es scheint, und ohne daß ein anderer Körper es einnehmen könnte. Und wenn man das Rohr neigt, wobei die Höhe des Weines im Rohr durch dieses Neigen geringer wird, so steigt der Wein wieder bis zu der Höhe von 32 Fuß an, und neigt man es schließlich bis zur Höhe von 32 Fuß, so füllt es sich wieder vollständig, wobei es soviel Wasser einsaugt, wie es Wein verloren hatte: so daß man es voll von Wein sieht von oben an bis zu 13 Fuß von unten und voll von nur unmerklich gefärbtem Wasser in den verbleibenden 13 Fuß.«

4) »Ein ungleichseitiger Siphon (ein U-förmiges Rohr), dessen längerer Schenkel 50 Fuß und der kürzere 45 Fuß messen, wird mit Wasser gefüllt, die beiden verschlossenen Öffnungen werden in zwei mit Wasser gefüllte Gefäße gesetzt und etwa einen Fuß tief eingetaucht, so daß der Siphon lotrecht zum Horizont steht und die Wasserfläche des einen Gefäßes fünf Fuß höher liegt als die des anderen: Öffnet man nun die beiden Rohrenden, so bleibt gegen die Meinung aller Philosophen und Handwerker der Siphon in diesem Zustand, der längere Schenkel zieht kein Wasser aus dem kürzeren, noch folglich

aus dem Gefäß, worin er steckt. Das Wasser sinkt aber in beiden Rohrschenkeln in die Gefäße, bis zur gleichen Höhe wie bei dem Rohr des vorigen Experiments, wenn man die Höhe von der Wasseroberfläche jedes der Gefäße rechnet. Wenn man aber den Siphon unter die Höhe von 30 Fuß neigt, zieht der längere Schenkel das Wasser aus dem Gefäß des kürzeren an, und wenn man ihn über die Höhe hebt, so hört das auf, und beide lassen, jeder in sein Gefäß, Wasser abfließen, und wenn man ihn senkt, so zieht das Wasser des längeren Schenkels das des kürzeren an wie zuvor.«

Der Text ist Pascals würdig. Vergessen wir jedoch für einige Augenblicke, daß es sich um Pascal handelt. Nehmen wir an, es wäre ein anonymes Text oder der eines unbekannten Autors. Würden wir uns nicht fragen, ob der Verfasser die Versuche, von denen er spricht, wirklich durchgeführt hat, und wenn, ob er sie *genau* und *vollständig* beschrieben hat? Stellen wir also Pascal diese Fragen: Glasrohre von 46 Fuß Länge ... die sind selbst heute sehr schwer herzustellen. Und obgleich Roberval uns bestätigt, daß sie mit bewundernswürdiger Kunst bereitet wurden — Roberval spricht allerdings von 40 Fuß —, ist es ziemlich unwahrscheinlich, daß die Glasbläser, selbst in Rouen, dazu in der Lage waren. Übrigens sind Rohre von 15 Meter Länge nicht leicht zu handhaben, selbst wenn man sie - die Auskunft stammt wiederum von Roberval - an Masten befestigt.⁴⁰ Um sie die von Pascals Versuchen erforderten Bewegungen ausführen zu lassen, braucht man Gerüste, Hebezeug, kurz eine technische Einrichtung, die stärker und komplizierter ist als die, die man gewöhnlich auf Schiffswerften benützt. Denn es ist sehr viel einfacher und leichter, einen Schiffsmast aufzurichten, als in der von Pascal erforderten Art einen ungleichseitigen Siphon zu bewegen, dessen längerer Schenkel 50 Fuß mißt ... Es erstaunt ein wenig, daß Pascal uns davon weder eine Beschreibung noch eine Skizze gibt. Man ist nicht zufrieden, wenn man von Pascal erfährt, daß diese Versuche ihn viel Mühe und Geld kosteten, und von Roberval, daß Pascal höchst ingenieure Apparate konstruiert habe. Man wüßte gern Genaueres über diese Appa-

rate sowie über die Art, wie man tatsächlich die Rohre und den großen Siphon von 30 Metern herstellt hat.

Verstehen wir uns recht: Ich möchte nicht andeuten, daß Pascal die von ihm beschriebenen Experimente nicht ausgeführt hat - oder die, die Roberval beschreibt -, obwohl die wissenschaftliche Literatur des siebzehnten Jahrhunderts voll ist von Versuchen, die gar nicht gemacht werden konnten. Der Pater Mersenne — der in diesen Dingen weniger leichtgläubig war als die Historiker des neunzehnten und zwanzigsten Jahrhunderts - hat zu Recht Galileis berühmte Experimente über den freien Fall der Körper und ihre Bewegung auf der schiefen Ebene in Zweifel gezogen. Viviani hat uns den — in allen Stücken erfundenen - Versuch erzählt, den der junge Galilei in Pisa gemacht habe, indem er Kanonenkugeln vom Schiefen Turm von Pisa heruntergeworfen habe. Borelli bezieht sich in seiner Polemik gegen Stefano d'Angeli kühl auf Versuche, deren Ergebnisse - wenn sie durchgeführt worden waren — zu d'Angelis Verwirrung beigetragen hätten. Und Pascal selbst beschreibt im *Traiti de l'equilibre des liqueurs* eine Reihe von Versuchen, die schon Robert Boyle - zu Recht — als Gedankenexperimente charakterisiert hatte.⁴¹

Darin liegt nichts Ungewöhnliches. Wie ich eben gesagt habe, ist die wissenschaftliche Literatur nicht nur des siebzehnten Jahrhunderts voll von diesen fiktiven Experimenten, und man könnte ein lehrreiches Buch schreiben über die Rolle der nicht durchgeführten und sogar unmöglichen Experimente in der Naturwissenschaft.

Aber, um es noch einmal zu sagen, ich will gar nicht behaupten, daß Pascal die Versuche, die er uns als durchgeführt beschreibt, nicht durchgeführt habe: Hingegen glaube ich behaupten zu können, daß er sie uns nicht so beschrieben hat, *wie er sie durchgeführt hat*, und daß er uns ihre Ergebnisse nicht so dargestellt hat, *wie sie sich vor seinen Augen abspielten*. Er hat uns mit Sicherheit etwas verheimlicht.

Als Gasparo Berti, von Galileis *Discorsi* inspiriert, in Rom den ersten Versuch über das Vakuum anstellt⁴² - Berti verwendete ein 10 Meter langes Bleirohr, das in einem großen Glaskopf endete, den er an seiner Hauswand befestigte -, stellt man in der Tat fest, daß das Wasser,

wie Galilei es gesagt hatte, in einer bestimmten Höhe anhält. Aber man stellte zugleich etwas anderes fest, nämlich, daß dieses Wasser zu sprudeln anfing. Das war ganz natürlich: Die im Wasser enthaltene Luft entwich, indem sie Blasen bildete, und das war andererseits ziemlich störend für die Parteigänger des Vakuums wie Berti selbst; die es leugneten, konnten mit dem Anschein der Wahrheit behaupten, daß der Raum oberhalb des Wassers nur dem Scheine nach leer und in Wahrheit mit Luft und mit Wasserdunst gefüllt sei.

Das Phänomen des Sprudeins mußte sich in Pascals Röhren erzeugen; es ist unvermeidlich. Als man 1950 Pascals Experiment im Palais de la Decouverte nachstellte (bei dieser Gelegenheit stellte sich heraus, wie schwierig es ist, ein 15 Meter langes Glasrohr zu beschaffen, weshalb man schließlich statt dessen Rohre von 2,55 in zusammensetzte), bemerkte man, daß das Wasser sprudelte, und das ziemlich heftig.

Kann dieses Phänomen Pascal entgangen sein? Ich glaube es nicht - und wenn, so wäre Pascal als Experimentator gerichtet -, und ich glaube es um so weniger, als das Sprudeln nicht das einzige bemerkenswerte Phänomen ist, das sich in dem Rohr erzeugt: Infolge des Luftdrucks (und des Wasserdampfes) sinkt nämlich die Wassersäule, und zwar 1,5 m in 24 Stunden.⁴⁵

Aber es kommt noch besser. Roberval, der 1647 nicht nur heftig für Pascal und gegen Magni Partei ergriffen, sondern darüber hinaus in seiner ersten *Harration* an Desnoyer (vom Oktober 1647) - worin er uns über Pascals Versuche Präzisierungen und genauere Einzelheiten liefert, die Pascal selbst nicht gibt - sich alle Schlußfolgerungen Pascals zu eigen gemacht hatte, dieser Roberval ändert plötzlich 1648 seine Meinung. 1647 hatte er erst sehr wenige Versuche (mit Quecksilber) gemacht. Danach hat er sie vervielfacht und bemerkt, daß kleine Luftblasen die ganze Länge der Quecksilbersäule hinaufstiegen. Stammten sie von der Luft, die an der Rohrwand haltete, oder war es die im Quecksilber selbst in komprimiertem Zustand enthaltene Luft? Das ist ziemlich gleichgültig. Jedenfalls wurde offensichtlich, daß man das erscheinende Vakuum nicht mit dem wirklichen

Vakuum identifizieren konnte. Und Roberval fügt in seiner *Seconde Narration* (im Mai 1648) bei der Beschreibung von Pascals Versuchen mit Wasser und Wein hinzu, daß die Anwesenden - Roberval selbst war nicht in Rouen dabei - notwendig kleine Luftblasen beobachten mußten, die das Rohr hinaufstiegen und sich bei diesem Aufstieg vergrößerten. Das Phänomen erwies eine Fähigkeit der Luft, sich zusammenzudrücken und, umgekehrt, wieder auszudehnen, die alles Vorstellbare überstieg.⁴⁴

Eine Schlußfolgerung scheint sich aufzudrängen: Pascal hat uns nicht den vollständigen und genauen Bericht der Versuche gegeben, die er durchgeführt oder sich vorgestellt hat. Das wirft ein eigentümliches Licht auf seine Polemik mit Pater Noel und verändert merklich das überlieferte Bild von Pascal als scharfsinnigem und klugem Experimentator, den die historische Übereinkunft dem unverbesserlichen Aprioristen namens Descartes gegenüberstellt. Nein, Pascal ist kein treuer Schüler Bacons oder eine erste Ausgabe von Boyle.

Luftblasen im Wasser und sogar im Quecksilber? Eine schöne Geschichte! Für Pascal hat das keinerlei Bedeutung. Er hat die Experimente, die er durchgeführt- oder nicht durchgeführt - hat, so gut, so klar *imaginiert*, daß er das Wesentliche davon zutiefst begriffen hat, nämlich die Wechselwirkung der Flüssigkeiten (für Pascal ist die Luft eine Flüssigkeit), die sich gegenseitig im Gleichgewicht halten.⁴⁵ Es ist schade, daß die verwendeten Flüssigkeiten — Wein, Wasser, Öl und Quecksilber - keine vollkommenen, zusammenhängenden, homogenen Flüssigkeiten sind, daß sie Luft enthalten und daß eben diese Luft an den Rohrwänden haftet. Die ausgedehnte Luft füllt das »erscheinende Vakuum«? Das ist wahr, und das ist sehr lästig. Aber wenn es gelänge, sie zu eliminieren, wenn man Flüssigkeiten benutzen könnte, die keine Luft enthalten, *dann* würde der Versuch die Identität des erscheinenden Vakuums und des wirklichen Vakuums leuchtend zur Anschauung bringen. Denn obwohl Pascal deren Existenz in seinen Folgerungen nicht förmlich behauptet — in seinen Briefen an Pater Noel und an Le Pailleur erinnert er daran -, ist es klar, daß er völlig davon überzeugt ist. Die Definition selbst, die er in seiner *Lettre*

auR. P. Noel gibt - obwohl er zu Recht bemerkt, daß eine Definition kein Urteil ist, und zu sagen: ich nenne diese Sache so, im Prinzip noch nicht die Behauptung seiner Existenz impliziert —, beweist es zur Genüge. »Was wir leeren Raum nennen, ist ein Raum, der sich in Länge, Breite und Tiefe erstreckt, unbeweglich ist und fähig, einen Körper von gleicher Länge und Gestalt aufzunehmen und zu enthalten; er ist das, was man in der Geometrie, die es nur mit abstrakten und immateriellen Dingen zu tun hat, *fest* nennt« - so etwas sagt man nicht, wenn man nicht an seine wirkliche Existenz glaubt, und der Pater Noel hat zwar einen formalen Fehler dabei gemacht, sich aber nicht getäuscht. Pascal will ganz einfach seine Geschütze nicht vorzeitig enthüllen: Er halt einen ganzen *Traite* in Reserve, der den Beweis bringen und zugleich, durch die Theorie des Gleichgewichts der Flüssigkeiten, den Grund erklären wird, warum das Vakuum sich in den Röhren erzeugt. In der Zwischenzeit will er nicht den Zweifel in das Gemüt der Einfältigen säen, die man im Gegenteil auf die Anerkennung der künftigen Beweise vorbereiten muß, und er will seinen Gegnern keine Waffen in die Hände geben.

Unter seinen Gegnern ist der traurig-berühmteste der Pater Noel von der Gesellschaft Jesu, der nach der Lektüre der *Experiences nouvelles* einen Brief an Pascal schrieb, worin er die alten Argumente und die cartesianischen Vorstellungen ein wenig vermischte (und in dem er die Übertragung des Lichts durch das erscheinende Vakuum geltend machte), die überlieferte Lehre verteidigte und einzuräumen vorschlug, daß »das erscheinende Vakuum in Torricellis Röhren von einer gereinigten Luft erfüllt werde, die durch kleine Poren im Glas eindringe«. Das bekam ihm schlecht: Pascals Antwort, ein Meisterwerk höflicher und schneidender Ironie - eine *Lettre Provinciale* »avant la lettre« -, erteilt dem Vice-Propvincial von La Fleche eine Lektion in Methodik und eine in Physik. Unter anderem entgegnet Pascal dem armen Jesuiten, daß man die Natur des Lichts nicht kenne und daß seine Definition: -*Das Licht ist eine leuchtende Bewegung von Strahlen, die aus lichten, d. h. glänzenden Körpern zusammengesetzt sind*« zirkulär ist und gar nichts sagt, daß man daher nicht zu der Behauptung befugt ist, es

könne sich lediglich im erfüllten Raum und nicht im Vakuum fortpflanzen. Da eine Hypothese ein beobachtetes Phänomen erkläre, könne man daraus nicht diese Hypothese erschließen, da die gleichen Phänomene eine Vielzahl von Erklärungen erhalten und durch die unterschiedlichsten Ursachen hervorgebracht werden können. So die Himmelserscheinungen, die sich ebensogut durch die Hypothese des Ptolemäus wie durch die des Kopernikus oder des Tycho Brahe erklären lassen.

Der Pater Noel hätte schweigen sollen. Zu seinem Unglück - und zu unserem Glück - antwortete er, und dieser Antwort verdanken wir die blendende *Lettre à AI. k Pailleur* Pascals⁴⁶, ein Meisterwerk unerbittlicher und grausamer Polemik. Der arme Pater Noel wird buchstäblich auf glühenden Kohlen geröstet, um und um gedreht und völlig lächerlich gemacht. Der Leser kann nicht umhin zu lachen; er beendet die Lektüre mit dem Eindruck, daß Pascal ein Genie und Pater Noel ein vollständiger Idiot ist und daß dessen metaphysische Einwände gegen die Idee des Vakuums ebenso wertlos sind wie seine Definition des Lichtes oder die Erklärung des Steigens des Quecksilbers (oder des Wassers) im Rohr durch die Wirkung der »bewegenden Leichtigkeit«...

Ganz gewiß ist Pascal ein Genie, und Pater Noel ist es ganz ebenso gewiß nicht. Es gibt nicht den geringsten Zweifel daran und auch nicht an der Überlegenheit von Pascals Physik über die des armseligen verspäteten Scholastikers. Und dennoch, wenn er schreibt: »Dieser Raum, der weder Gott noch Geschöpf, weder Körper noch Geist, weder Substanz noch Akzidenz ist, der das Licht überträgt, ohne transparent zu sein, der ohne Widerstand widersteht, der unbeweglich ist und sich mit dem Rohr bewegt, der überall und nirgends ist, der alles und nichts bewirkt, usw.« -, gibt sich mit diesen Worten wirklich ein Dummkopf der Lächerlichkeit preis? Lesen wir die Antwort Pascals, der das »weder Gott noch Geschöpf« verschwinden läßt unter dem Vorwand »die Mysterien, welche die Gottheit betreffen, sind zu heilig, um sie in unserem Streit zu profanieren«, als handelte es sich um eine dogmatische Frage und nicht um ein Problem der

reinen Metaphysik. Er schreibt: »Weder Körper noch Geist. Es ist richtig, daß der Raum weder Körper noch Geist ist, aber er ist Raum; ebenso ist die Zeit weder Körper noch Geist, sondern Zeit; und wie die Zeit zu sein nicht aufhört, obwohl sie keines dieser Dinge ist, so kann der leere Raum sehr wohl sein, ohne deshalb weder Körper noch Geist zu sein. Weder Substanz noch Akzidenz. Das gilt, wenn man unter dem Wort Substanz das versteht, was entweder Körper oder Geist ist; denn in diesem Sinne ist der Raum weder Substanz noch Akzidenz, aber er ist Raum, wie in eben diesem Sinne die Zeit weder Substanz noch Akzidenz ist, sondern Zeit, denn um zu sein, ist es nicht notwendig, Substanz oder Akzidenz zu sein« —, ist diese Antwort wirklich so bewundernswert? Behandelt Pascal nicht schwere metaphysische Probleme, die die größten Geister seiner Zeit beschäftigt haben, ein wenig herrenreiterhaft, ein wenig leichtsinnig? Jedenfalls bewundern wir all das sehr viel weniger, wenn wir es bei Gassendi lesen, bei dem Pascal es entlehnt.

Im Gegenzug erscheinen uns die Einwände des Pater Noel bei anderen als ihm überhaupt nicht lächerlich. Denn das, was Pater Noel uns sagt, ist genau das, was Descartes, Spinoza und Leibniz sagen, die alle in der Negation des Vakuums übereinstimmen und sich sehr ernsthaft - wie auch Newton - das Problem der möglichen Beziehungen zwischen einem Raum, der so, wie Pascal ihn versteht, kein Geschöpf sein kann, und Gott stellen. Sie geben, wohlverstanden, verschiedene Antworten auf ein Problem, das sie alle sehr ernst genommen haben.

Sogar der Einwand, daß die Lichtdurchlässigkeit des »erscheinenden Vakuums« die Möglichkeit eines »wirklichen Vakuums« ausschließt, finden wir kaum des Spottes wert, wenn er aus Huygens' Feder kommt, und ebensowenig kommen uns die Physiker des neunzehnten Jahrhunderts lächerlich vor, die seit Young und Fresnel und aus ähnlichen Gründen wie Pater Noel, den man als ihren Vorgänger ausgeben könnte, einen lichttragenden Äther postulieren, um die Übertragung des Lichtes durch das »erscheinende Vakuum« zu erklären. Die Magie des Pascalschen Wortes ist gefährlich: Es ist schwierig,

aber um so notwendiger, ihr auf jeden Fall zu widerstehen. Denn sie führt uns in historische Irrtümer, und sie verleitet uns zu Ungerechtigkeiten und Inkonsistenzen.

Ich habe die mir gewährte Zeit schon weit überschritten und muß hier innehalten, ohne auf *La grande experience de l'equilibre des liqueurs* (den Versuch vom Puy de Dome) einzugehen, dessen sorgfältige und genaue Anordnung - selbst wenn die Idee dazu von anderen kam, besonders von Descartes, der ein positives Ergebnis voraussah, oder dem Pater Mersenne, der zweifelte, ob überhaupt eines zustande käme - ein unbestreitbares Verdienst Pascals und ein unbestrittenes Zeugnis seines experimentellen Genies bleibt. Verzichten müssen wir auch auf die *Trnites de l'equilibre des iqueurs et de la pesanteur de la Masse de l'air*, die den verlorenen *Tratte du vide*⁴⁷ zusammenfassen und vervollständigen und die uns Pascal unter einem neuen Aspekt, dem des ordnenden und systematisierenden Geistes zeigen.

Tatsächlich finden sich in diesen Abhandlungen kaum wirklich neue Gedanken, wenn überhaupt. Bei der Lektüre kann man leicht (wie Pierre Boutroux es getan hat) im Vorbeigehen die Quellen notieren — Pascal zitiert niemanden —, aus denen er geschöpft hat oder von denen er sich inspirieren ließ: Stevin, Mersenne, Torricelli. Aber die Vielfalt und Verschiedenheit der beschriebenen Versuche, darunter der des «Vakuums im Vakuum», und die wunderbare Ordnung, in welcher die wirklichen so gut wie die imaginierten Tatsachen als Funktion einer einheitlichen Idee dargestellt und geordnet werden (besonders der Idee des Gleichgewichts der Flüssigkeiten, eines selbst auf das Prinzip virtueller Tätigkeit begründeten Gleichgewichts, nicht zu vergessen die Erfindung der hydraulischen Presse, eines schönen Beispiels für Pascals technologischen Erfindergeist), all das machte die *Traites* zu Werken von leuchtender Originalität, würdig, unter den klassischen Schriften der Naturwissenschaft einen Platz zu finden.

Indessen ist der systematisierende Geist, von dem Pascal uns in diesen Abhandlungen ein so schönes Beispiel bietet, nicht ungefährlich. Die Gleichsetzung der Luft mit einer Flüssigkeit, die übrigens in

seiner Zeit geläufig war - auch Descartes setzt die Luft einer sehr dünnen Flüssigkeit gleich —, mit anderen Worten, die Gleichsetzung der Pneumatik mit der Hydrostatik verleitet Pascal (obwohl er, um die Ausdehnung einer auf den Gipfel eines Berges gebrachten Blase zu erklären, die mit der Höhe variiert, den größeren oder geringeren Luftdruck gelten läßt), nicht deutlich zwischen dem *Druck* der Luft und ihrem *Gewicht* zu unterscheiden (was übrigens sehr schwierig ist und Robert Boyles großes Verdienst sein wird) oder, was dasselbe ist, zwischen dem elastischen Druck eines Gases und dem nicht elastischen einer Flüssigkeit, und mithin die durch den *Druck* der Luft erzeugten Phänomene durch ihr *Gewicht* zu erklären.

ANMERKUNGEN

- 1 Vgl. M. Mersenne, *Cogitata physico-mathematica*, Paris 1644, Vorrede: *Ut tunc propositione universalissima, 400 corollaris armaia, integrum Apollonium complexus est*, Brief an Constantin Huygens, März 1648; *Œuvres complètes de Huygens*, Bd. 1, S. 83: »Wenn Euer Archimedes Euch begleitet, zeigen wir ihm eine der schönsten geometrischen Abhandlungen, die er je gesehen hat, die der junge Pascal gerade beendet hat.« In seiner *Adresse à l'Académie Parisienne* (1654) kündigt Pascal an: »Conicorum opus completum et conica Apollonii et alia innumera unica fereptopositione amplexens; quod quidem nondum sexdecimum aetatis annum assecutus exegitavi, et deinde in ordinem congessi.«
- 2 Dieser *Traite du vide*, den uns die *Experiences nouvelles touchant le vide* (1647) ankündigen, scheint erst 1651 beendet zu sein. In der Tat schreibt Pascal in seinem Brief an M. de Ribeyre vom 12. Juli 1651, daß er eine Abhandlung beende, die erklären werde, »welches die wirkliche Ursache aller der Wirkungen ist, welche man dem Horror vacui zugeschrieben hat«.
- 3 Pascals wissenschaftliches Werk ist heute leicht zugänglich in der 2. Auflage der *Œuvres complètes de Pascal*, in der Bibliothèque de la Pléiade, Paris 1954 u. ö.
- 4 Der Ausdruck »Geometrie der Indivisibilen« ist zweideutig. Der Titel des Werkes von Bonaventura Cavalieri lautet tatsächlich: *Ceometria indivisibilibus continuorum nova quadam ratione promota*, Bologna 1635, was sagen will: »Geometrie der Kontinua, die mittels der Indivisibilen behandelt«, und nicht: »Geometrie der Indivisibilen«. Aber da Pascal den Ausdruck gebraucht, werde ich ihn ebenfalls verwenden. Vgl. meinen Artikel »Bonaventura Cava-

- lieri et la geometrie des Continus«, in: *Eventail de Vhistoire vivante*, FS Lucien Febvre, Bd. 1, S. 319 ff., nachgedruckt in A. Koyré, *Etudes d'histoire de la pensee scientifique*, Paris 1966 u. ö.
- 5 Vgl. Nicolas Bourbaki, *Elements de mathematique*, Bd. IX, S. 148, Nr. XX: »Dank dem Zauber einer unvergleichlichen Sprache gelingt es Pascal, die Illusion einer vollkommenen Klarheit zu schaffen«, Paris 1949.
- 6 Der Pater Mersenne spricht in seinem in Anm. 1 zitierten Brief an Constantin Huygens von der von Pascal erreichten Lösung »des Satzes von Pappus *ad* 3, 4 *lineas*, von dem man hier behauptet, Descartes habe ihn nicht in seiner ganzen Ausdehnung gelöst«, und sagt, »es bedurfte roter, grüner und schwarzer usw. Linien, um die große Vielfalt der Erwägungen auseinanderzuhalten ...«.
- 7 Vgl. Leon Brunschvicg, *Blaise Pascal*, S. 127f., 158, Paris 1953.
- 8 Vgl. Paul Montel, *Pascal mathematien*, Palais de la Decouverte, Paris 1950.
- 9 Vgl. Nicolaus Bourbaki, op. cit., Bd. IX, S. 15 3.
- 10 Vgl. R. Taton, »L'Essay pour les coniques« de Pascal, in: *Revue d'histoire des Sciences*, Bd. VIII, Heft 1, 1955, S. 1-18.
- 11 Vgl. Leibniz' Brief an Etienne Perier vom 30. August 1676, in: Pascal, *CEwvres complctes*, Bibl. de la Pleiade, 2. Aufl., S. 63 ff.; *Adresse à lAcademie Parisienne*, ebd., S. 71 ff.
- 12 Ebd., S. 66 ff.
- 13 Ebd., S. 58.
- 14 Vgl. Pierre Humbert, *Cet effrayant genie, L'oeuvre scientifique de Blaise Pascal*, S. 19, 34, 47, Paris 1947.
- 15 Vgl. Moritz Cantor, *Vorlesungen über Geschichte der Mathematik*, Bd. 2, S. 434, 445, Leipzig 1900.
- 16 Vgl. Pierre Boutroux, Introduction au *Traue du triangle arithmetique*, in: *Qitivres de Blaise Pascal*, ed. L Brunschvicg, P. Boutroux, Bd. 3, S. 438 ff., Paris 1908.
- 17 Er sucht auch nicht danach, wie es Wallis in seiner *Arithntetica Infinitorum* tun wird, das »Dreieck« für geometrische Berechnungen zu benützen.
- 18 Ebd., S. 442 ff.
- 19 Potestatum Numericarum Summa, *Qiuivres completes*, S. 166-171.
- 20 Ebd., S. 170, 171.
- 21 Ebd., S. 171.
- 22 Die Analogie zwischen verschiedenen Ordnungen von Größen und denen, die Pascal zwischen der Ordnung der Körper, der der Geister und der der Liebe errichtet, beschäftigt uns hier nicht.
- 23 In diesem Fall darf man das von Pascal ausgesprochene Prinzip nicht wörtlich nehmen, da es gewiß ist, daß man etwas wegnimmt, wenn man einen Punkt von einer Linie und sogar von einem Raum entfernt und dort ein Loch macht. Man könnte dieses Verhältnis sehr gut auf das Verhältnis zwischen Gott und

der Kreatur übertragen und dem Geschöpf, das unfähig ist, etwas zur göttlichen Handlung hinzuzufügen, die Fähigkeit zuschreiben, deren Vollständigkeit zu bewahren oder, im Gegenteil, darin ein punktuell Loch zu machen.

- 24 Vgl. »Memoires sur la vie de M. Pascal ecrit par Mlle Marguerite Perier, sa niece«, in: *Giuwes completes*, S. 40; vgl. ebenfalls »La vie de M. Pascal ecrite par Mme Perier, sa sceur«, ebd., S. 19ff.; vgl. die anonyme Anmerkung im *Recueil Guerrier*, zit. ebd., S. 174.
- 25 Sie hatte sogar eine Polemik zwischen Torricelli und Roberval provoziert, der den italienischen Gelehrten sehr zu Unrecht des Plagiats bezichtigte. Pascal wird diese Anklage in seiner *Histoire de la roulette*, 1658, erneuern.
- 26 Vgl. Problemata de cycloide, proposita mense junii 1658, in: *Gbuwres completes*, S. 180: »Quum ab aliquot mensibus, quaedam circa cycloidem, ejusque centra gravitatis, meditaremur, in propositiones satis arduas et difficiles, ut nobis visus est, inddimus.«
- 27 Vgl. Reflexions sur les conditions des prix attaches à la Solution des problemes concernant le cycloide, in: *Oeuvres completes*, S. 185. Pascal fügt hinzu (ebd.): »Ich verfüge nicht über den Ruhm, das Verdienst gibt ihn; ich rühre nicht daran; ich bestimme nur die Verteilung der Preise, deren Bedingung ich mit völliger Freiheit anordnen konnte, da sie aus meiner reinen Großzügigkeit stammen. Ich habe sie so angeordnet; niemand hat einen Grund, sich darüber zu beklagen; ich schuldete weder den Deutschen noch den Moskovitern etwas; ich konnte sie den Franzosen allein offeriert haben; ich könnte andere allein für die Flamen oder für wen ich will aussetzen.«
- 28 Die drei ersten und die sechste. Die Lösung der beiden anderen fand er nicht und verlangte keinen Preis. Der Wettbewerb hatte jedoch bedeutende Folgen für ihn: Er lenkte seine Aufmerksamkeit auf den Zykloiden, den er 1659 als die »tautochrone« Kurve beweisen wird.
- 29 Wallis überarbeitete seine Denkschrift und veröffentlichte 1659 einen *Tractatus de Cycloide*. Aber er verziehe Pascal nie.
- 30 *L'histoire de la roulette*, am 10. Oktober; *Recit de l'examen et du jugement des ecrits proposes pour les prix proposes sur le sujet de la roulette, où l'on voit que ces prix n'ont pas été gagnés parce que personne n'a donné la véritable Solution des problèmes*, am 25. November; *Suite de l'histoire de la roulette, où l'on voit le procédé d'une personne qui s'était voulu attribuer l'invention des problèmes proposés sur ce sujet*, am 12. Dezember, mit einer *Addition à la suite de l'histoire de la roulette*, datiert den 20. Januar 1659. Die beiden letzten Schriften sind gegen den Pater Lalouere gerichtet, den Pascal, seit der *Histoire de la roulette*, des Plagiats an Roberval bezichtigt hatte.
- 31 Vgl. Dimension des lignes courbes de toutes les Roulettes, Lettre de M. Dettonville à M. Huygens, de Zulichem, in: *CEuvres completes*, S. 340. Pascals Text

verdient es, vollständig zitiert zu werden: »Man sieht aus all dem, daß, je mehr sich die Basis der Rolle dem Umkreis des erzeugenden Kreises nähert, desto kleiner wird die kleine Achse der entsprechenden Ellipse im Verhältnis zur größeren; und daß, wenn die Basis dem Umkreis gleich, d. h. die Rolle einfach ist, die kleine Achse der Ellipse völlig verschwindet und daß nun die gekrümmte Linie der Ellipse (die ganz flach geworden ist) zu einer Geraden wird, nämlich ihrer großen Achse. Und daraus entsteht in diesem Falle, daß die Krümmung der Rolle ebenfalls zu einer Geraden wird. Deshalb ließ ich denen, denen ich diese Rechnung aufgab, bestellen, daß die Kurven der Rollen stets, ihrer Natur nach, Ellipsen seien und daß diese wunderbare Gleichheit der Kurve der einfachen Rolle mit einer Geraden, die Herr Wren gefunden hat, sozusagen nur eine zufällige Gleichheit sei, die daher rührt, daß die Ellipse in diesem Falle eine Grade ist. Dazu fügte Herr de Sluse die schöne Bemerkung, daß man die Ordnung der Natur noch darin bewundern müsse, die erst dann erlaube, daß eine Gerade einer Kurve gleich sei, nachdem man die Gleichheit einer Geraden mit einer Kurve schon vorausgesetzt hat.«

- 32 Zu dieser Frage vgl. meinen Anm. 4 zitierten Aufsatz.
- 33 Vgl. Lettre de M. Dettonville à M. de Carcavi, in: *Œuvres complètes*, S. 232.
- 34 Es ist schwierig, ein objektives Urteil über Roberval zu fällen, dessen Werk wenig bekannt und teilweise ungedruckt (oder verloren) ist. Es scheint in jedem Falle sicher, daß er trotz seines unleugbaren Talents nicht zum ersten Rang gehört. Pascal ist ihm gewiß weit überlegen.
- 35 Vgl. C'Emro *complètes*, S. 3 62 f. Zur Geschichte des Vakuums vgl. die schöne Studie von Cornelis de Waard, *L'expérience barometrique, ses antecedents et ses applications*, Thouars 1936.
- 36 *Oeuvres de Blaise Pascal*, ed. Brunschvicg-Boutroux, Bd. 1, S. 323 ff. (Brief des Pater Petit an Chanut), und Bd. 2, S. 21 ff. (Erster Bericht Robervals an Desnoyers).
- 37 *Demonstratio ocularis Loci sine locato, corporis successive moti in vacuo, luminis nulli corpori inhaerentis etc.*, Warschau o. J. (die Druckgenehmigung ist datiert vom 16. Juli 1647). Am 12. September 1647 ergänzt Magni sein Werk durch eine *Altera pars Demonstratiotittis ocularis de Possibilitate vacui*. Beide Schriften wurden vereinigt unter dem Titel *Admiranda de Vacuo*, Warschau o. J. (1647).
- 38 Die von Roberval formulierte Plagiatsbeziehung ist sehr wohl begründet; diejenige Pascals (in seinem Brief an M. de Ribeyre, 16. Juli 1651), der sich zu der Behauptung versteigt, Magni habe ihn selbst plagiirt, ist völlig aus der Luft gegriffen. Übrigens anerkennt Magni, in seiner Antwort auf Robervals Beschuldigung, Torricellis Eigentum, hält aber an seiner Originalität fest; vgl. C. de Waard, op. cit. S. 12 5 ff.
- 39 Was Pascal daran hinderte, seinen *Tratte* zu publizieren, war die Tatsache, daß

er ihn noch nicht geschrieben hatte. Er beendet ihn in der Tat erst 1651 (vgl. Anm. 2), veröffentlicht ihn aber nicht mehr. Nach Florin Perier »ging diese Abhandlung verloren, oder vielmehr, da er sehr die Kürze liebte, reduzierte er ihn auf zwei kleine Abhandlungen über *L'équilibre des liquides* und *La Pesanteur de la masse d'air*«.

- 40 Erster Bericht an Desnoyers. Robervals Bericht ist oft reicher an Präzisierungen — und sogar an Fakten — als die *Nouvelles Experiences*.
- 41 Etwa der Versuch eines Menschen, der zwanzig Fuß unter der Wasseroberfläche ein Rohr auf seinen Schenkel stützt.
- 42 Vgl. Cornelis de Waard, op. cit. S. 101 ff.
- 43 Diese Erscheinungen — das Sprudeln und das Sinken der Flüssigkeitssäule — müssen bei Wein noch sehr viel deutlicher als bei Wasser sein. Bei dem Siphon muß sich oben an seiner Spitze unfehlbar ein Luftpfropfen bilden.
- 44 Vgl. die zweite Narration in: *Qluvres*, ed. Brunschvicg-Boutroux, Bd. 2, S. 328. Robervals Bemerkung ist von einer grausamen Bosheit.
- 45 Pascal war 1647, wie es der Brief an Florin Perier vom 15. November 1647 über den auf dem Puy de Dome auszuführenden Barometerversuch und die Tatsache beweist, daß er zu dieser Zeit den Versuch des Leeren im Leeren konzipiert hatte, schon im vollen Besitz seiner Lehre.
- 46 1648, vgl. *CEuvres completes*, S. 377-391.
- 47 Vgl. Anm. 2 und Anm. 39.

Quellen

»Die Entwicklungsstufen der wissenschaftlichen Kosmologie«

Les etapes de la cosmologie scientifique.

(*Quatorzieme Semaine de Synthese*, Paris, Albin Michel, 1951, Nouvelle Serie, Bd. 29, Juli-Dezember 1951, S. 11-22).

»Leonardo da Vinci nach 500 Jahren«

Leonard de Vinci 500 ans apres.

(Manuskript eines Vortrags in Madison, Wisconsin, 1953).

»Der Beitrag der Renaissance zur wissenschaftlichen Entwicklung«

Uapport scientifique de Ja renaissance.

(*Quinzieme Semaine de Synthese*, Paris 1951).

»Galilei und die wissenschaftliche Revolution des 17. Jahrhunderts«

Galileo and the Scientifk Revolution oftheXVUth Century.

(*Philosophkai Review*, 1943).

»Galilei und Piaton«

Galileo and Plato.

(*Journal of the History ofIdeas*, IV, 4 /1943).

»Das Experiment von Pisa. Fall-Studie einer Legende«

Galilee et l'experience de Pise: A propos dune legende.

(*Annales de VUniversite de Paris*, 19 37).

»Kunst und Wissenschaft im Denken Galileis. Eine Antwort auf Panofsky«

Attitudes esthetiques et pensee scientifique.

(*Critique*, Sept.-Okt. 1955).

»Ein Meßversuch«

An Experiment in measurement.

(*Proceedinp of the American Philosophical Society*, Bd. 97, Nr. 2, April 195 3).

»Pascal als Wissenschaftler«

Pascal savant

(Vortrag bei dem Kolloquium Blaise Pascal, November 1954; Erstdruck: *Blaise Pascal, l'homme et l'œuvre*, Paris, Minuit, 1956).

Alle Aufsätze dieses Bandes sind gesammelt in den *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*, Paris 1966 u. ö.

Auswahlbibliographie A. Koyré

L'idée de Dieu et les preuves de son existence chez Descartes, Paris 1922. Dt. Ü.: *Descartes und die Scholastik*, Bonn 1923.

L'idée de Dieu dans la philosophie de saint Anselme, Paris 1923.

La philosophie de Jacob Boehme. Etudes sur les origines de la Métaphysique allemande, Paris 1929.

La philosophie et le problème national en Russie au début du XIX^e siècle, Paris 1929.

Etudes galiléennes, Paris 1939.

Entretiens sur Descartes, New York 1944.

Introduction à la lecture de Platon, New York 1945. Engl. Ü.: *Discovering Plato*, New York 1945.

Mystiques, spirituels, alchimistes du XVI^e siècle allemand, Paris 1955.

From the Closed World to the Infinite Universe, Baltimore 1957. Dt. Ü.: *Von der geschlossenen Welt zum unendlichen Universum*, Frankfurt/M. 1969.

Etudes d'histoire de la pensée philosophique, Paris 1961.

Newtonian Studies, hrsg. von I. B. Cohen, Cambridge/Mass. 1965. Frz. Ausg.: *Etudes newtoniennes*, Paris 1968.

Etudes d'histoire de la pensée scientifique, hrsg. von R. Taton, Paris 1966.

Metaphysics and Measurement. Essays in Scientific Revolution, hrsg. von M. A. Hoskin, London 1968.

De la mystique à la science. Notes de cours et inédits d'Alexandre Koyré, hrsg. von P. Redondi, Paris 1987.

Eine vollständige Bibliographie der Schriften A. Koyrés enthält der zuletzt genannte, von P. Redondi herausgegebene Band. Darin auch eine Reihe von Fotos A. Koyrés.

Literatur zu Alexandre Koyré

- J. Wahl, »Le rôle d'Alexandre Koyré dans le développement des études hégéliennes en France«, in: *Archives de philosophie*, Bd. 23, Heft 111 (Juli-Sept. 1965), S. 337-361.
- I. B. Cohen, M. Clagett: »Alexandre Koyré (1892-1964), Commemorations«, in: *Isis*, Bd. 57,2; Nr. 188 (Sommer 1966).
- Ch. C. Gillispie, »Koyré, Alexandre«, in: *Dictionary of Scientific Biography*, Bd. 7, New York 1973, S. 482-490.
- G. Jorland, *Le cheminement de la pensée d'Alexandre Koyré*, Diss. Paris 1978.
- History and Technology*, Bd. 4, Nr. 1-4, 1987 (Sonderheft A. Koyré).
- P. Redondi, *Epistemologia e storia della scienza*, Mailand 1978.

Forum Wissenschaft

**Figuren
des Wissens**

»Die neuere Wissenschaftsgeschichte ist eine *nach* Koyré. Auch wenn sie nur selten jene Eleganz erreicht, die Koyrés Texte auszeichnet.«

»Frankfurter Allgemeine Zeitung«

Fischer



ISBN 3-596-13776-4

DM 22.90



9 783596 137763

öS 167.-

Umschlaggestaltung: Buchholz/Hinsch/Hensinger
Abbildung: »Ptolemaisches Universum« um 1600