

Thomas S. Kuhn

Die Entstehung des Neuen

*Studien zur Struktur
der Wissenschaftsgeschichte*

Herausgegeben von Lorenz Krüger

Übersetzt von Hermann Vetter

Thomas S. Kuhn, geboren 1929, ist Professor für Wissenschaftstheorie und Wissenschaftsgeschichte in Princeton.

Sein Buch *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen* (= stw 25) hat eine Wende der Wissenschaftstheorie gebracht: Unter dem Eindruck der Fortschritte der Logik und der Meta-Mathematik seit Anfang dieses Jahrhunderts war die Theorie der empirischen Wissenschaften vornehmlich unter dem Gesichtspunkt der logischen Analyse wissenschaftlicher Aussagen sowie deren Beziehung zur Erfahrung angetreten. Daß hinter den Aussagesystemen ein in der Geschichte der Gesellschaft verankerter Forschungsprozeß steht, fand dabei nur vergleichsweise geringe Beachtung. Diese Ausblendung der historischen Dimension und ihre Gründe hat Kuhn in seinem Buch mit Scharfblick aufgedeckt und zugleich die zur Anreicherung der allgemeinen Wissenschaftstheorie mit konkreter Wirklichkeit notwendige Brücke zwischen Wissenschaftstheorie und Wissenschaftsgeschichte geschlagen.

Im vorliegenden Band sind zum ersten Mal Aufsätze Kuhns zusammengestellt, die einen Eindruck vermitteln, wie seine Aufsehen erregenden Thesen aus der konkreten historischen Forschung hervorgewachsen sind und wie die Grundgedanken des Buches über die wissenschaftlichen Revolutionen kritisch weitergebildet wurden: Reflexionen über die Natur der Wissenschaftsgeschichte und ihr Verhältnis zur Wissenschaftsphilosophie.

Bibliotheca
Bernensis

1993/66264



Suhrkamp

von divergentem und konvergentem Denken vgl. J. P. Guilford: *The Nature of Human Intelligence*, New York 1967, Chaps. 6, 7 (Anm. des Hg.).

*3 Angabe der Tagung s. Inhaltsverzeichnis.

*4 J. W. Getzels/P. W. Jackson: *The Highly Intelligent and the Highly Creative Adolescent: A Summary of Some Research Findings*, The Third (1959) University of Utah Research Conference on the Identification of Scientific Talent, Salt Lake City 1959, 46-57, Zitat auf S. 56; abgedruckt in C. W. Taylor/F. Barron, Hg.: *Scientific Creativity*, New York 1963. Die Originalstelle findet sich bei: J. P. Guilford, *A Revised Structure of Intellect*, Rep. Psychol. Lab. Nr. 19, Los Angeles 1957 (Anm. d. Hg.).

*5 Es handelt sich nach Auskunft des Autors um eine Vorarbeit zu *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen* (Anm. des Hg.).

Eine Funktion für das Gedankenexperiment

Gedankenexperimente haben mehr als einmal in der Entwicklung der Physik eine entscheidende Rolle gespielt. Jedenfalls der Historiker muß in ihnen ein manchmal sehr wirksames Werkzeug zur Verbesserung der Naturerkenntnis sehen. Und doch ist keineswegs klar, wie sie überhaupt jemals bedeutende Wirkungen haben konnten. Oft, wie etwa bei Einsteins Zug, dessen beide Enden vom Blitz getroffen werden, haben sie mit Verhältnissen zu tun, die nicht im Laboratorium untersucht worden sind¹. Manchmal, wie im Falle des Bohr-Heisenbergschen Mikroskops, gehen sie von Situationen aus, die gar nicht vollständig untersucht werden können und in der Natur überhaupt nicht vorzukommen brauchen². Diese Tatsachen werfen eine Reihe verwirrender Fragen auf, von denen ich drei in dieser Arbeit mittels eingehender Analyse eines einzigen Beispiels untersuchen möchte. Natürlich kann nicht ein einziges Gedankenexperiment alle vertreten, die einmal in der Geschichte eine Rolle gespielt haben. Die Klasse der Gedankenexperimente ist ohnehin zu groß und unscharf, als daß sie sich knapp charakterisieren ließe. Viele Gedankenexperimente unterscheiden sich von dem hier betrachteten. Doch dieses spezielle Beispiel – aus dem Werk Galileis – ist für sich allein interessant genug, um so mehr, als es unverkennbar gewissen Gedankenexperimenten ähnelt, die bei der Neufassung der Physik im 20. Jahrhundert mitwirkten. Ich werde keine Argumente dafür anführen, bin aber der Auffassung, daß das Beispiel typisch für eine wichtige Klasse ist.

Die Hauptprobleme im Zusammenhang mit Gedankenexperimenten lassen sich als eine Reihe von Fragen formulieren. Erstens: Die in einem Gedankenexperiment vorgestellte Situation darf offenbar nicht völlig willkürlich sein; welche Bedingungen der Wirklichkeitsnähe gelten für sie? In welchem Sinne und in welchem Maße muß die Situation in der Natur vorkommen können oder vorgekommen sein? Diese schwierige Frage verweist ihrerseits auf eine zweite. Wenn jedes er-

folgreiche Gedankenexperiment in seinem Aufbau gewisse Kenntnisse über die Welt verwendet, so geht es ja nicht um diese, sondern bei einem wirklichen Gedankenexperiment müssen die zugrundegelegten empirischen Daten schon von allem Anfang an bekannt und allgemein anerkannt sein; wie kann dann aber neue Naturerkenntnis entstehen? Schließlich die dritte und kürzeste Frage: Was für neue Erkenntnisse lassen sich so gewinnen? Können die Wissenschaftler überhaupt etwas aus Gedankenexperimenten zu lernen hoffen?

Auf diese Fragen gibt es gewisse ziemlich einfache Antworten, die ich in den beiden folgenden Abschnitten mit Beispielen aus der Geschichte und der Psychologie darlegen werde. Nach diesen Antworten – die zweifellos von Bedeutung, aber nach meiner Auffassung nicht ganz richtig sind – bezieht sich die durch Gedankenexperimente erzeugte neue Erkenntnis nicht auf die *Natur*, sondern auf den *theoretischen Apparat* des Wissenschaftlers. Nach dieser Auffassung hat das Gedankenexperiment die Funktion, Verwirrungen aufzuklären, indem es den Wissenschaftler zur Erkenntnis von Widersprüchen in seinem bisherigen Denken zwingt. Im Unterschied zur Entdeckung neuer Tatsachen scheint die Beseitigung einer bestehenden Verwirrung keine zusätzlichen empirischen Daten zu erfordern. Auch braucht die vorgestellte Situation in der Natur nicht wirklich vorzukommen. Vielmehr gilt für das Gedankenexperiment, das lediglich Verwirrung auflösen soll, einzig die Bedingung der Wirklichkeitsnähe. Die vorgestellten Verhältnisse müssen so beschaffen sein, daß der Wissenschaftler seine Begriffe in der bislang normalerweise von ihm geübten Art und Weise anwenden kann.

Diese Antworten sind ungeheuer einleuchtend und hängen eng mit der philosophischen Tradition zusammen; daher bedürfen sie eingehender und verständnisvoller Untersuchung. Außerdem dürfte ihre Betrachtung uns wesentliche analytische Mittel liefern. Jedoch gehen sie an wichtigen Eigenschaften der historischen Situation vorbei, in der Gedankenexperimente ihren Platz haben; daher werden in den letzten beiden Abschnitten dieser Arbeit etwas andere Antworten gesucht werden. Insbesondere wird in Abschnitt 3 behauptet werden, es sei im wesentlichen ziemlich irreführend, die Situation des Wissenschaftlers vor der Durchführung eines Gedankenexperi-

ments als »widersprüchlich« oder »verworren« zu bezeichnen. Richtiger ist die Aussage, Gedankenexperimente unterstützten die Wissenschaftler bei der Aufstellung anderer Gesetze und Theorien als der bisherigen. Dann kann die bisherige Erkenntnis »verworren« und »widersprüchlich« nur in dem besonderen und völlig unhistorischen Sinne gewesen sein, in dem es alle Gesetze und Theorien wären, die im Verlauf des wissenschaftlichen Fortschritts fallengelassen werden mußten. Diese Darstellung erweckt nun aber unvermeidlich den Eindruck, die Auswirkungen eines Gedankenexperiments kämen, obwohl es keine neuen Daten bringt, denen eines wirklichen Experiments viel näher, als man sich gewöhnlich vorstellt. In Abschnitt 4 soll der Versuch gemacht werden zu erklären, wie dies der Fall sein könnte.

1

Die historische Situation, in der wirkliche Gedankenexperimente bei der Neuformulierung und Veränderung bestehender Begriffe von Nutzen sind, ist notwendigerweise sehr kompliziert. Daher beginne ich mit einem einfacheren, nichthistorischen Beispiel, einer Begriffsumkehrung, die im Laboratorium von dem glänzenden Schweizer Kinderpsychologen Jean Piaget erzeugt wurde. Die Gründe für diese scheinbare Abweichung von unserem Thema werden im Laufe der Darstellung klar werden. Piaget brachte Kinder in eine wirkliche Laborsituation und befragte sie dann darüber. Bei etwas älteren Versuchspersonen hätte die gleiche Wirkung wohl auch durch bloße Befragung ohne die Laborumgebung erzielt werden können. Hätten sich die Personen die betreffenden Fragen selbst gestellt, so hätte die reine Situation des Gedankenexperiments vorgelegen, die im nächsten Abschnitt am Werk Galileis gezeigt werden soll. Da überdies die spezielle Umkehrung, die Galileis Experiment erzeugt, fast dieselbe ist wie die von Piaget im Laboratorium erzeugte, dürfte es durchaus lehrreich sein, mit dem einfacheren Fall zu beginnen.

Piaget führte den Kindern im Laboratorium zwei Spielzeugautos vor, ein rotes und ein blaues.³ In jeder experimentellen Sitzung wurden die beiden Autos gleichförmig auf einer geraden Linie bewegt. In einigen Fällen legten beide dieselbe

Entfernung zurück, aber in verschiedenen langen Zeitabschnitten. In anderen war die Zeit gleich lang, aber ein Auto legte eine größere Entfernung zurück. Schließlich gab es ein paar Experimente, in denen weder die Entfernung noch die Zeiten genau gleich waren. Nach jeder Vorführung fragte Piaget seine Versuchspersonen, welches Auto sich schneller bewegt hätte, und woran man das erkennen konnte.

Bei der Betrachtung der Antworten beschränke ich mich auf eine mittlere Gruppe von Kindern, die so alt waren, daß sie etwas aus den Experimenten lernen konnten, aber auch noch so jung, daß sie noch nicht wie Erwachsene antworteten. In den meisten Fällen bezeichneten die Kinder in dieser Gruppe dasjenige Auto als »schneller«, das das Ziel zuerst erreichte oder während des größten Teils der Bewegungsphase vorne lag. Außerdem blieben sie bei dieser Verwendung des Ausdrucks, auch wenn sie erkannten, daß das »langsamere« Auto in der gleichen Zeit eine größere Strecke zurückgelegt hatte als das »schnellere«. Nehmen wir z. B. eine Sitzung, in der beide Autos an derselben Linie abfuhrten; das rote fuhr später ab und holte das blaue am Ziel ein. Die folgende Unterhaltung, in der die Äußerungen des Kindes kursiv gedruckt sind, ist typisch. »Fuhren sie zur gleichen Zeit ab? – *Nein, das blaue fuhr zuerst ab.* – Kamen sie zusammen an? – *Ja.* – War eines von den beiden schneller, oder waren sie gleich schnell? – *Das blaue fuhr schneller.*«⁴ In diesen Antworten drückt sich das aus, was ich der Einfachheit halber das »Zielerreichungskriterium« für die Verwendung von »schneller« nennen möchte.

Hätten Piagets Kinder als einziges das Zielerreichungskriterium angewandt, so hätten die Experimente für sich allein sie nichts lehren können. Man würde zu dem Ergebnis kommen, daß ihr Begriff von »schneller« von dem der Erwachsenen abweicht, daß aber wegen seiner konsequenten Verwendung nur pädagogische oder elterliche Autorität eine Veränderung würde erzielen können. In anderen Experimenten jedoch zeigt sich ein zweites Kriterium, und das ist sogar auch in dem soeben beschriebenen Experiment möglich. Fast unmittelbar nach der oben beschriebenen Sitzung wurde der Apparat so eingestellt, daß das rote Auto sehr spät abfuhr und besonders schnell fahren mußte, um das blaue am Ziel zu erreichen. In

diesem Fall verlief das Gespräch mit dem Kind folgendermaßen. »Fuhr ein Auto schneller als das andere? – *Das rote.* – Wie hast du das gemerkt? – *ICH HABE ES GESEHEN.*«⁵ Offenbar können Kinder genügend schnelle Bewegungen unmittelbar als solche wahrnehmen. (Man vergleiche die Art, wie Erwachsene die Bewegung des kleinen Zeigers einer Uhr »sehen«, mit ihrer Wahrnehmung des Ortswechsels des großen Zeigers.) Manchmal verwenden die Kinder diese unmittelbare Wahrnehmung der Bewegung zur Feststellung des schnelleren Autos. Mangels eines besseren Ausdrucks nenne ich das entsprechende Kriterium das der »Wahrnehmungsunschärfe«.

Das gleichzeitige Vorhandensein der Kriterien der Zielerreichung und der Wahrnehmungsunschärfe ermöglicht den Kindern das Lernen in Piagets Laboratorium. Und auch ohne dieses würde die Natur früher oder später das gleiche lehren, wie es die älteren Kinder in Piagets Gruppe gelernt haben. Selten (sonst hätten die Kinder den Begriff nicht so lange beibehalten können), aber doch gelegentlich kommt in der Natur eine Situation vor, in der derjenige Gegenstand, dessen unmittelbar wahrgenommene Geschwindigkeit geringer ist, doch das Ziel zuerst erreicht. In diesen Fällen widersprechen sich die beiden Kriterien; das Kind kann zu der Aussage gebracht werden, beide Gegenstände seien »schneller« oder beide »langsamer«, oder derselbe Gegenstand sei »schneller« und »langsamer«. Diese Erfahrung des Paradoxen wurde von Piaget im Laboratorium erzeugt, gelegentlich mit erstaunlichen Ergebnissen. In ein und demselben paradoxen Experiment sagen die Kinder zunächst von einem Gegenstand, er sei »schneller«, und unmittelbar darauf von dem anderen. Ihre Antworten hängen entscheidend von geringen Unterschieden in der Versuchsanordnung und der Formulierung der Fragen ab. Wenn ihnen schließlich die offenbar willkürlichen Schwankungen ihrer Antworten bewußt werden, so entdecken oder erfinden die intelligentesten oder bestvorbereiteten den Begriff von »schneller«, den die Erwachsenen haben. Nach ein wenig Übung wenden ihn einige dann ständig an. Diese sind die Kinder, die aus Piagets Laborversuch gelernt haben.

Was aber – um auf die dieser Untersuchung zugrundeliegenden Fragen zurückzukommen – haben sie wohl gelernt, und woher haben sie es gelernt? Im Augenblick beschränke ich

mich auf ganz wenige und herkömmliche Antworten, die den Ausgangspunkt für Abschnitt 3 bilden werden. Die Vorstellungen, die Piagets Kinder mit in den Versuch brachten, enthielten zwei unabhängige Kriterien für die Anwendung der theoretischen Relation »schneller« und damit einen potentiellen Widerspruch. Im Laboratorium zwang eine neue Situation, zu der Vorführungen und Befragungen gehörten, die Kinder zur Wahrnehmung dieses Widerspruchs. Als Folge davon wandelten einige ihren Begriff von »schneller« ab, spalteten ihn vielleicht auf. Der ursprüngliche Begriff spaltete sich in so etwas ähnliches wie den Begriff »schneller« der Erwachsenen und einen weiteren Begriff »das Ziel zuerst erreichen«. Der Begriffsapparat der Kinder war danach wahrscheinlich reichhaltiger und sicherlich brauchbarer. Sie hatten gelernt, einen wesentlichen begrifflichen Fehler zu vermeiden und damit klarer zu denken.

Diese Antworten liefern nun eine weitere, sie weisen auf die eine Bedingung hin, die Piagets Versuchsbedingungen erfüllen mußten, um ein pädagogisches Ziel zu erreichen. Offenbar dürfen sie nicht willkürlich sein. Ein Psychologe könnte aus ganz anderen Gründen ein Kind fragen, ob ein Baum oder ein Kohlkopf schneller sei; und er würde vermutlich eine Antwort bekommen⁶; jedoch das Kind würde nicht lernen, klar zu denken. Wenn es das soll, so muß die ihm vorgelegte Situation zum allermindesten relevant sein. Das heißt, sie muß die Kriterien enthalten, die das Kind gewöhnlich beim Vergleich von Geschwindigkeiten anwendet. Doch während die Kriterien die normalen sein müssen, braucht es die gesamte Situation nicht zu sein. Angesichts von lebenden Trickzeichnungen mit diesen paradoxen Bewegungen würde das Kind zu den gleichen Schlüssen bezüglich seiner Begriffe kommen, auch wenn in der Natur selbst das Gesetz herrschte, daß die schnelleren Gegenstände stets zuerst ans Ziel kommen. Es gibt also keine Bedingung der physikalischen Wirklichkeitsnähe. Der Experimentator kann sich jede beliebige Situation ausdenken, solange sie die Anwendung der normalen Kriterien gestattet.

Wir kommen jetzt zu einem historischen, aber sonst gleichartigen Fall der Korrektur eines Begriffes, die wiederum durch genaue Analysen einer vorgestellten Situation gefördert wurde. Wie die Kinder im Laboratorium Piagets hat die »Physik« des Aristoteles und die von diesem Werk sich herleitende Tradition zwei unvereinbare Kriterien für die Analyse der Geschwindigkeit. Der allgemeine Punkt ist bekannt, muß aber hier zur Verdeutlichung noch einmal herausgestellt werden. Meistens betrachtet Aristoteles die Bewegung oder Veränderung (diese beiden Ausdrücke sind in seiner Physik gewöhnlich austauschbar) als Zustandsänderung. »Jede Veränderung verläuft von etwas zu etwas – wie das Wort *metabole* selbst sagt.«⁷ Das häufige Vorkommen derartiger Aussagen bei Aristoteles zeigt, daß er gewöhnlich jede sich nicht am Himmel abspielende Bewegung als endlichen abgeschlossenen Vorgang ansieht, der als Ganzes zu betrachten ist. Demgemäß mißt er den Betrag und die Geschwindigkeit einer Bewegung anhand der Parameter, die ihre Endpunkte beschreiben, der termini a quo und ad quem der mittelalterlichen Physik.

Die Folgerungen für den Aristotelischen Begriff der Geschwindigkeit liegen unmittelbar auf der Hand. Aristoteles selbst formuliert sie folgendermaßen: »Der schnellere von zwei Gegenständen durchläuft eine größere Strecke in der gleichen Zeit, eine gleich große in kürzerer Zeit und eine größere in kürzerer Zeit.«⁸ Oder an anderer Stelle: »Gleiche Geschwindigkeit liegt vor, wenn *dieselbe* Veränderung in der gleichen Zeit zustande kommt.«⁹ An diesen Stellen wie auch an vielen anderen in den Schriften des Aristoteles entspricht der zugrundeliegende Begriff der Geschwindigkeit weitgehend dem, was wir »Durchschnittsgeschwindigkeit« nennen würden, dem Verhältnis einer Gesamtentfernung zur gesamten verflossenen Zeit. Wie das kindliche Zielerreichungskriterium unterscheidet sich diese Beurteilung der Geschwindigkeit von der unseren. Doch wiederum kann der Unterschied keinen Schaden anrichten, solange das Kriterium der Durchschnittsgeschwindigkeit ausschließlich angewandt wird.

Doch, wiederum wie Piagets Kinder, ist Aristoteles unter heutigen Gesichtspunkten nicht überall ganz konsistent. Auch er

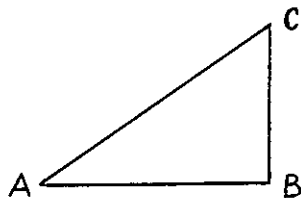
scheint noch ein Kriterium wie das der Wahrnehmungsschärfe der Kinder für die Beurteilung der Geschwindigkeit zu haben. Insbesondere unterscheidet er gelegentlich zwischen der Geschwindigkeit eines Gegenstandes gegen Anfang und gegen Ende seiner Bewegung. Zum Beispiel sagt er bei der Unterscheidung zwischen natürlichen oder nicht erzwungenen Bewegungen, die in der Ruhe enden, und gewaltsamen Bewegungen, die eines äußeres Bewegers bedürfen: »Doch während die Geschwindigkeit dessen, was zum Stillstand kommt, stets zu wachsen scheint, scheint die Geschwindigkeit dessen, was gewaltsam bewegt wird, stets zu sinken.«¹⁰ Hier wie in einigen ähnlichen Passagen werden keine Endpunkte, keine zurückgelegte Entfernung und keine verflossene Zeit erwähnt. Statt dessen erfaßt Aristoteles unmittelbar, womöglich durch Wahrnehmung, eine Seite der Bewegung, die wir »Momentangeschwindigkeit« nennen würden, und die ganz andere Eigenschaften als die Durchschnittsgeschwindigkeit hat. Aristoteles jedoch macht keinen Unterschied. Wie wir in Abschnitt 3 sehen werden, beruhen sogar wichtige inhaltliche Seiten seiner Physik auf dem Fehlen dieser Unterscheidung. Als Folge davon können sich beim Gebrauch des Aristotelischen Begriffs der Geschwindigkeit ganz ähnliche Paradoxien einstellen wie die, mit denen Piaget seine Kinder konfrontierte.

Wir werden gleich das Gedankenexperiment untersuchen, mit dem Galilei diese Paradoxien aufdeckte, doch vorher ist festzuhalten, daß zu Galileis Zeit der Begriff der Geschwindigkeit nicht mehr genau dem Aristotelischen entsprach. Die bekannten im 14. Jahrhundert entwickelten analytischen Methoden zur Behandlung der *latitudo formarum* hatten den für die Untersuchung der Bewegung verfügbaren Begriffsapparat bereichert. Insbesondere gab es jetzt eine Unterscheidung zwischen der Gesamtgeschwindigkeit einer Bewegung und der Intensität der Geschwindigkeit an jedem Punkt der Bewegung. Der zweite Begriff stand dem heutigen Begriff der Momentangeschwindigkeit sehr nahe; der erste war, wenn auch erst nach einigen wichtigen Berichtigungen durch Galilei, ein wesentlicher Schritt zum heutigen Begriff der Durchschnittsgeschwindigkeit¹¹. Ein Teil der im Aristotelischen Geschwindigkeitsbegriff enthaltenen Paradoxie wurde im Mittelalter zweieinhalb Jahrhunderte vor Galilei bereits beseitigt.

Die mittelalterliche Veränderung der Begriffe war jedoch in einer wichtigen Hinsicht unvollständig. Auf die *latitudo formarum* konnte man beim Vergleich zweier verschiedener Bewegungen nur dann zurückgreifen, wenn sie die gleiche »Ausdehnung« hatten, d. h. die gleiche Entfernung zurücklegten oder die gleiche Zeit in Anspruch nahmen. Richard Swinesheads Formulierung der Mertonschen Regel dürfte diese nur allzuoft vernachlässigte Beschränkung verdeutlichen: Erfolgt eine Geschwindigkeitserhöhung gleichmäßig, so »wird durch sie eine ebensolche Entfernung zurückgelegt ... wie durch den mittleren Grad [die Geschwindigkeitsintensität] dieser zunehmenden [Geschwindigkeit], falls etwas mit diesem mittleren Grad [der Geschwindigkeit] während des ganzen Zeitabschnitts bewegt würde«¹². Hier muß die Zeitdauer für beide Bewegungen die gleiche sein, sonst läßt sich die Vergleichsmethode nicht anwenden. Könnte die Zeitdauer verschieden sein, dann könnte eine gleichmäßige Bewegung geringer Intensität, aber langer Dauer eine größere Gesamtgeschwindigkeit haben als eine Bewegung größerer Intensität (d. h. größerer Momentangeschwindigkeit), die nur kurze Zeit anhält. Im allgemeinen umgingen die mittelalterlichen Theoretiker der Bewegung diese mögliche Schwierigkeit dadurch, daß sie sich auf Vergleiche beschränkten, die mit ihren Methoden zu behandeln waren. Galilei jedoch brauchte eine allgemeinere Methode, und bei ihrer Entwicklung (oder mindestens ihrer Darstellung) verwendete er ein Gedankenexperiment, das die Aristotelische Paradoxie im vollem Umfange herausstellte. Es gibt zwei Beweise dafür, daß die Schwierigkeit im ersten Drittel des 17. Jahrhunderts noch durchaus akut war. Der eine ist Galileis pädagogischer Scharfsinn – sein Text hatte mit wirklichen Problemen zu tun. Eindrucksvoller jedoch ist vielleicht die Tatsache, daß es Galilei selbst nicht immer gelang, die Schwierigkeit zu vermeiden.¹³

Das Experiment steht fast am Anfang des »ersten Tages« von Galileis »Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme«¹⁴. Salviati, der für Galilei spricht, fordert seine beiden Gesprächspartner auf, sich zwei Ebenen, eine senkrechte CB und eine schräge CA, vorzustellen, die sich bis zur selben Höhe über einer waagrechten Ebene AB erheben. Zur Unterstützung der Anschauung macht Salviati eine Skizze wie die hier wie-

dergegebene. Man soll sich nun zwei Körper vorstellen, die von C aus entlang den beiden Ebenen ohne Reibung gleiten oder rollen. Schließlich fordert Salviati seine Gesprächspartner auf zuzugestehen, daß die beiden Körper in A bzw. B die



gleiche Geschwindigkeit erreicht haben werden, diejenige nämlich, die notwendig ist, um sie wieder auf die ursprüngliche Höhe zurückzubringen¹⁵. Das wird zugestanden, und dann fragt Salviati die beiden Gesprächspartner, welcher der beiden Körper sich schneller bewege. Er möchte, daß sie erkennen, daß sie mit dem damaligen Geschwindigkeitsbegriff zu dem Eingeständnis gezwungen werden können, daß die Bewegung entlang der senkrechten Ebene gleichzeitig schneller, gleich schnell und langsamer ist als die entlang der schrägen Ebene. Sein weiteres Ziel ist, mit dieser Paradoxie seine Gesprächspartner und Leser zu der Erkenntnis zu bringen, daß man nicht einer ganzen Bewegung, sondern ihren Teilen eine Geschwindigkeit zuschreiben sollte. Kurz, das Gedankenexperiment ist, wie Galilei selbst ausführt, eine Vorbereitung auf die umfassende Diskussion der gleichförmigen und beschleunigten Bewegung in der »Dritten Unterredung« seiner *Weltsysteme*. Die Argumentation selbst werde ich erheblich straffen und systematisieren, das einzelne Hin und Her im Dialog interessiert uns nicht. Bei der ersten Frage, welcher Körper schneller sei, geben die Gesprächspartner die Antwort, zu der wir alle neigen (wenn es auch die Physiker unter uns besser wissen sollten). Sie sagen, die senkrechte Bewegung sei offensichtlich schneller¹⁶. Hier verbinden sich zwei der drei Kriterien, die wir bereits kennengelernt haben. Während sich beide Körper bewegen, ist der senkrecht bewegte »unschärfer«. Außerdem erreicht er sein Ziel eher.

Diese naheliegende und ungeheuer einleuchtende Antwort

wirft jedoch sofort Schwierigkeiten auf, die Sagredo, der klügere der Gesprächspartner, als erster erkennt. Er weist darauf hin (jedenfalls annähernd – ich verschärfe diesen Teil der Argumentation ein wenig gegenüber dem Original), daß die Antwort mit dem anfänglichen Zugeständnis unvereinbar sei. Da beide Körper zunächst ruhen und beide dieselbe Endgeschwindigkeit erreichen, müssen sie die gleiche Durchschnittsgeschwindigkeit haben. Wie kann dann der eine schneller sein als der andere? An diesem Punkt schaltet sich Salviati wieder in die Diskussion ein und erinnert seine Zuhörer daran, daß die schnellere zweier Bewegungen gewöhnlich als diejenige definiert ist, die die gleiche Entfernung in kürzerer Zeit zurücklegt. Ein Teil der Schwierigkeit, so sagt er, rühre von dem Versuch her, zwei Bewegungen zu vergleichen, die verschiedene Entfernungen zurücklegen. Er fordert die Gesprächsteilnehmer auf, statt dessen die Zeiten zu vergleichen, die die beiden Körper für eine gemeinsame Vergleichsentfernung benötigen. Als solche wählt er die Länge der senkrechten Ebene CB.

Dies jedoch macht alles nur noch schlimmer. CA ist länger als CB, und es stellt sich heraus, daß die Antwort auf die Frage, welcher Körper sich schneller bewegt, entscheidend davon abhängt, an welche Stelle der schrägen Ebene CA man die Vergleichsentfernung CB hinlegt. Wird sie vom oberen Ende der schrägen Ebene aus abgetragen, dann hat der sich senkrecht bewegende Körper seine Bewegung in kürzerer Zeit beendet, als der sich schräg bewegnende Körper zur Zurücklegung einer Strecke von der Länge CB braucht. Die senkrechte Bewegung ist also schneller. Wird andererseits die Vergleichsentfernung vom unteren Ende der schrägen Ebene an gemessen, so braucht der senkrecht bewegte Körper mehr Zeit als der schräg bewegte für die gleiche Entfernung. Damit ist die senkrechte Bewegung langsamer. Und schließlich argumentiert Salviati: Wenn man die Entfernung CB an passender Stelle inmitten der schrägen Ebene abträgt, dann werden die Zeiten, die die beiden Körper zum Zurücklegen der Vergleichsentfernung brauchen, gleich sein und somit auch ihre Geschwindigkeiten. Damit hat das Gespräch drei Antworten auf eine einzige Frage bezüglich einer bestimmten Situation gebracht, von denen jede mit den beiden anderen unverträglich ist.

Dieses Ergebnis ist natürlich eine Paradoxie, und das war je-

denfalls eine der Weisen, wie Galilei seine Zeitgenossen auf eine Veränderung der Begriffe vorbereitete, die bei der Analyse oder experimentellen Untersuchung der Bewegung angewandt wurden. Die neuen Begriffe wurden zwar öffentlich erst in Galileis Werk *Über zwei neue Wissenszweige* entwickelt, doch im *Dialog über die Weltsysteme* zeichnen sich die Grundlinien bereits ab. »Schneller« und »Geschwindigkeit« dürfen nicht in der herkömmlichen Weise verwendet werden. Man kann sagen, in einem bestimmten Augenblick habe ein Körper eine größere Momentangeschwindigkeit als der andere zum gleichen oder einem anderen Zeitpunkt. Oder man kann sagen, ein bestimmter Körper lege eine bestimmte Entfernung schneller zurück als ein anderer die gleiche oder eine andere Entfernung. Doch diese beiden Arten von Aussagen beschreiben nicht die gleichen Eigenschaften der Bewegung. »Schneller« bedeutet Verschiedenes, wenn einerseits Momentangeschwindigkeiten zu bestimmten Zeitpunkten und andererseits die für die Vollendung zweier bestimmter Bewegungen nötigen Zeiten verglichen werden. Ein Körper kann »schneller« im einen und dabei nicht im anderen Sinne sein.

Diese begriffliche Veränderung half Galileis Gedankenexperiment lehren, und wir können daher unsere alten Fragen stellen. Offenbar sind die Minimalantworten dieselben wie bei den Experimenten Piagets. Die von Aristoteles zur Analyse der Bewegung verwandten Begriffe waren teilweise widersprüchlich, und das war während des Mittelalters nicht völlig ausgeräumt worden. Galileis Gedankenexperiment förderte die Schwierigkeit zutage, indem es den Lesern die Paradoxie vor Augen stellte, die in ihrem Denken steckte. Damit half es ihnen bei der Veränderung ihres Begriffsapparats.

Wenn das richtig ist, kann man auch das Kriterium der Wirklichkeitsnähe erkennen, dem das Gedankenexperiment notwendigerweise genügen mußte. Für Galileis Argumentation ist es gleichgültig, ob Körper tatsächlich eine gleichförmig beschleunigte Bewegung ausführen, wenn sie sich eine senkrechte oder schräge Ebene hinabbewegen. Es spielt nicht einmal eine Rolle, ob bei gleichem Höhenunterschied der Ebenen die beiden Körper am Ende gleiche Momentangeschwindigkeit erreichen. Galilei führt zu keinem dieser Punkte Argumente an. Für seine Zwecke in diesem Teil des *Dialog*

genügt es an dieser Stelle völlig, daß man sie voraussetzen kann. Andererseits folgt nicht, daß die von Galilei gewählten Versuchsbedingungen willkürlich wären. So hätte er nicht sinnvoll voraussetzen können, daß der Körper zu Beginn seiner Bewegung von C aus verschwindet und kurz danach bei A wieder auftaucht, ohne die dazwischenliegende Strecke zurückgelegt zu haben. Dieses Experiment hätte Grenzen der Anwendbarkeit von »schneller« aufgezeigt, doch mindestens bis zur Entdeckung der Quantensprünge wären diese Grenzen nicht informativ gewesen. Aus ihnen hätten weder wir noch Galilei selber irgend etwas über die herkömmlichen Begriffe lernen können. Diese waren nie für solche Situationen gedacht. Kurz, wenn ein solches Gedankenexperiment etwas bewirken soll, so müssen die Begriffe auf die gleiche Weise verwendet werden können wie vorher. Nur dann kann das Gedankenexperiment die Betrachter auf unerwartete Konsequenzen ihrer normalen Operationen mit den Begriffen stoßen.

3

Bis hierher war meine Argumentation in wesentlichen Teilen von einer philosophischen Auffassung beeinflußt, die mir in der Analyse des wissenschaftlichen Denkens mindestens seit dem 17. Jahrhundert gebräuchlich zu sein scheint. Wenn ein Gedankenexperiment etwas bewirken soll, dann muß es, wie wir schon sahen, von einer normalen Situation ausgehen, d. h. einer Situation, die der Betrachter des Experiments mit seiner bisherigen Erfahrung ohne weiteres behandeln zu können glaubt. Nichts an der vorgestellten Situation darf völlig ungewohnt oder befremdlich sein. Wenn sich also das Experiment, wie es ja sein muß, auf frühere Naturerfahrungen stützt, so müssen diese vor der Durchführung des Experiments allgemein bekannt gewesen sein. Das scheint ein zwingender Grund für eine der Folgerungen zu sein, die ich im Vorangehenden stets gezogen habe. Da das Gedankenexperiment keine neue Information über die Welt enthält, kann es nichts lehren, was nicht schon bekannt war. Oder vielmehr, es kann nichts über die Welt lehren. Statt dessen lehrt es den Wissenschaftler etwas über seinen geistigen Apparat. Seine Funktion ist auf die Korrektur bisheriger theoretischer Fehler beschränkt.

Mir scheint jedoch, daß einige Wissenschaftshistoriker mit diesem Ergebnis nicht recht glücklich sein werden, und andere, so meine ich, sollten es auch nicht sein. Irgendwie erinnert es zu sehr an die bekannte Auffassung, nach der die Ptolemäische Theorie, die Phlogistontheorie oder die Stofftheorie der Wärme bloße Irrtümer, Verwirrungen oder Dogmen gewesen seien, die eine weniger dogmatische oder klügere Wissenschaft von Anfang an vermieden hätte. In der heutigen Geschichtsschreibung haben derartige Bewertungen immer mehr an Überzeugungskraft eingebüßt, und das wirkt sich auch auf die Folgerung aus, die ich bisher in dieser Arbeit gezogen habe. Aristoteles war vielleicht kein Experimentalphysiker, aber er war ein hervorragender Logiker. Hätte er in einer Sache, die für seine Physik so grundlegend ist, einen so elementaren Fehler begangen, wie wir ihm zugeschrieben haben? Und wenn, hätten ihn dann seine Nachfolger fast 2000 Jahre lang wiederholt? Kann es sich lediglich um eine logische Verwirrung handeln, und kann die Funktion von Gedankenexperimenten so trivial sein, wie diese Auffassung meint? Mir scheint die Antwort auf alle diese Fragen negativ zu sein, und der Ursprung der Schwierigkeit scheint mir in unserer Voraussetzung zu liegen, daß Gedankenexperimente, weil sie sich ausschließlich auf bekannte Daten stützen, uns nichts über die Welt lehren könnten. Obwohl der heutige Wortschatz der Erkenntnistheorie eine wirklich hilfreiche Sprechweise nicht anbietet, möchte ich jetzt behaupten, daß die meisten Menschen aus Gedankenexperimenten gleichzeitig etwas über ihre Begriffe und über die Welt lernen. Indem Galileis Leser etwas über den Begriff der Geschwindigkeit lernen, lernen sie auch etwas darüber, wie sich Körper bewegen. Es geschieht ihnen etwas ganz Ähnliches wie einem Menschen, der, wie Lavoisier, mit einer unerwarteten experimentellen Entdeckung fertigwerden mußte.¹⁷

Auf dem Wege zu diesen Hauptpunkten frage ich zunächst, was gemeint sein konnte, wenn man den kindlichen Begriff von schneller und den Aristotelischen Begriff für Geschwindigkeit »widersprüchlich« oder »verworren« nannte. »Widersprüchlich« zumindest deutet darauf hin, die Begriffe entsprächen dem berühmten logischen Beispiel vom quadratischen Kreis, doch das kann nicht ganz richtig sein. Der quadratische Kreis ist in dem Sinne widersprüchlich, daß er in keiner mög-

lichen Welt vorkommt. Einen Gegenstand mit den entsprechenden Eigenschaften kann man sich nicht einmal vorstellen. Doch weder der kindliche noch der Aristotelische Begriff sind in diesem Sinne widersprüchlich. Der kindliche Begriff von schneller kommt in unserer Welt verschiedentlich vor; ein Widerspruch entsteht erst bei der verhältnismäßig seltenen Art von Bewegung, bei der der wahrnehmungsunschärfere Gegenstand später das Ziel erreicht. Ebenso läßt sich der Aristotelische Begriff für Geschwindigkeit mit seinen beiden verschiedenen Kriterien ohne Schwierigkeit auf die meisten Bewegungen anwenden, die wir in unserer Umwelt sehen. Schwierigkeiten ergeben sich erst bei der wiederum seltenen Klasse von Bewegungen, bei der das Kriterium der Momentangeschwindigkeit und das Kriterium der Durchschnittsgeschwindigkeit bei qualitativen Anwendungen zu widersprüchlichen Antworten führen. In diesen beiden Fällen sind die Begriffe nur in dem Sinne widersprüchlich, daß bei ihrer Anwendung die Gefahr eines Widerspruchs besteht. Das heißt, man kann in eine Situation kommen, in der man gezwungen ist, unvereinbare Antworten auf ein und dieselbe Frage zu geben.

Das natürlich ist gewöhnlich nicht gemeint, wenn man einen Begriff widersprüchlich nennt. Es könnte aber durchaus dem entsprechen, was man sagen wollte, wenn man die oben untersuchten Begriffe »verworren« oder »für klares Denken unbrauchbar« nannte. Diese Ausdrücke geben die Verhältnisse zweifellos besser wieder. Sie gehen aber von einem Maßstab der Klarheit und Brauchbarkeit aus, zu dessen Anwendung man vielleicht gar nicht berechtigt ist. Soll man hier von unseren Begriffen verlangen, was wir von unseren Gesetzen und Theorien nicht verlangen und auch gar nicht verlangen könnten, nämlich daß sie auf jegliche Situation anwendbar seien, die in irgendeiner möglichen Welt entstehen könnte? Genügt es nicht, wenn ein Begriff, wie ein Gesetz oder eine Theorie, in jeder Situation eindeutig anwendbar ist, die wir jemals erwarten?

Um die Berechtigung dieser Fragen zu erkennen, stelle man sich eine Welt vor, in der alle Bewegungen gleichförmig (mit gleichbleibender Geschwindigkeit) vor sich gehen. (Diese Bedingung ist stärker, als nötig wäre, aber sie macht die Argumentation klarer. Es würde die schwächere Bedingung

genügen, daß kein Körper, der nach dem einen oder anderen Kriterium »langsamer« ist, jemals einen andern »schnelleren« Körper überholt. Bewegungen, die diese schwächere Bedingung erfüllen, nenne ich »quasi-gleichförmig«.) In einer solchen Welt könnte der Aristotelische Begriff der Geschwindigkeit nie durch eine wirkliche physikalische Situation ad absurdum geführt werden, denn die Momentangeschwindigkeit und die Durchschnittsgeschwindigkeit wären bei jeder Bewegung dieselbe¹⁸. Was würde man nun über einen Wissenschaftler sagen, der in dieser fiktiven Welt konsequent den Aristotelischen Begriff der Geschwindigkeit anwendet? Wohl nicht, daß er verworren sei. Nichts könnte in seiner empirischen Wissenschaft oder Logik durch die Verwendung dieses Begriffs schiefgehen. Vielmehr würden wir wohl von unserer breiteren Erfahrung und unserem entsprechend reichhaltigeren Begriffsapparat her sagen, er habe in seinen Geschwindigkeitsbegriff die Erwartung eingebaut, daß in seiner Welt nur gleichförmige Bewegungen vorkommen. Das heißt, wir würden zu dem Ergebnis kommen, daß sein Begriff teilweise die Funktion eines Naturgesetzes hat, das in seiner Welt regelmäßig erfüllt ist, in unserer jedoch nur manchmal.

Im Falle des Aristoteles kann man das freilich nicht ganz sagen. Er wußte und gab stellenweise zu, daß beispielsweise fallende Körper ihre Geschwindigkeit während der Bewegung erhöhen. Andererseits gibt es viele Hinweise darauf, daß Aristoteles diese Information an den äußersten Rand seines wissenschaftlichen Bewußtseins verbannte. Wann immer es ihm möglich war – und das war oft –, betrachtete er Bewegungen als gleichförmig oder mit den Eigenschaften der gleichförmigen Bewegung ausgestattet, und das hatte Konsequenzen für einen großen Teil seiner Physik. In Abschnitt 2 z. B. betrachteten wir eine Passage aus der *Physik*, die man als Definition von »schnellere Bewegung« gelten lassen kann: »Der schnellere von zwei Gegenständen durchläuft eine größere Strecke in der gleichen Zeit, eine gleich große in kürzerer Zeit und eine größere in kürzerer Zeit.« Das vergleiche man mit der unmittelbar folgenden Passage: »Angenommen, A sei schneller als B. Da nun von zwei Dingen dasjenige, das sich rascher verändert, schneller ist, hat in der Zeit FG, in der A von C nach D gekommen ist, B noch nicht D erreicht.«¹⁹

Diese Aussage ist keine reine Definition mehr. Vielmehr handelt sie vom physikalischen Verhalten »schnellerer« Körper, und – so interpretiert – gilt sie nur für Körper, die sich gleichförmig oder quasi-gleichförmig bewegen²⁰. Die ganze Beweiskraft von Galileis Gedankenexperiment besteht in dem Aufweis, daß diese und ähnliche Aussagen – die notwendig aus der einzigen Definition zu folgen scheinen, die nach dem herkömmlichen Begriff von »schneller« möglich ist – in der uns bekannten Welt nicht gelten, und daß der Begriff daher abgeändert werden muß. Aristoteles dagegen baut dann seine Auffassung von der Bewegung als quasi-gleichförmig tief in sein System ein. Zum Beispiel verwendet er die vorhin zitierten Aussagen im nächsten Absatz, um zu zeigen, daß der Raum ein Kontinuum sein müsse, wenn die Zeit es ist. Sein Argument stützt sich auf die oben indirekt gemachte Voraussetzung, daß ein Körper B, der hinter einem Körper A am Ende einer Bewegung zurückbleibt, dies auch an allen dazwischenliegenden Punkten getan haben muß. In diesem Fall kann man mit Hilfe von B den Raum und mit Hilfe von A die Zeit einteilen. Wenn eines ein Kontinuum ist, so muß es auch das andere sein²¹. Leider jedoch braucht die Voraussetzung nicht richtig zu sein, wenn etwa die langsamere Bewegung mit sinkender und die schnellere mit wachsender Geschwindigkeit vor sich geht, doch Aristoteles sieht keine Notwendigkeit, derartige Bewegungen auszuschließen. Auch hier wieder geht sein Argument davon aus, daß allen Bewegungen die qualitativen Eigenschaften der gleichförmigen Veränderung zukommen. Die gleiche Auffassung von der Bewegung liegt den Argumenten zugrunde, mittels derer Aristoteles seine sogenannten quantitativen Bewegungsgesetze entwickelt²². Als Beispiel betrachte man nur die Abhängigkeit der zurückgelegten Entfernung von der Größe des Körpers und der verflossenen Zeit: »Wenn also A, der Beweger, B um die Entfernung C in der Zeit D bewegt hat, dann bewegt in der gleichen Zeit die gleiche Kraft A $\frac{1}{2}B$ um das Doppelte der Entfernung C und in der Zeit $\frac{1}{2}D$ bewegt sie $\frac{1}{2}B$ um die ganze Entfernung C: denn dadurch werden die Regeln der Verhältnismäßigkeit eingehalten.«²³ Sind also Kraft und Medium gegeben, so ist die zurückgelegte Entfernung proportional zur Zeit und umgekehrt proportional zur Größe des Körpers.

Heute kann dieses Gesetz nur als merkwürdig erscheinen, wenn es auch vielleicht nicht so merkwürdig ist, wie man es gewöhnlich hat sehen wollen²⁴. Geht man aber von dem Aristotelischen Begriff der Geschwindigkeit aus – der bei den meisten Anwendungen keine Probleme aufwirft –, so erkennt man leicht, daß dies das einzig mögliche einfache Gesetz ist. Ist die Bewegung so beschaffen, daß Durchschnittsgeschwindigkeit und Momentangeschwindigkeit gleich sind, dann muß unter sonst gleichen Umständen die zurückgelegte Entfernung der Zeit proportional sein. Nimmt man außerdem mit Aristoteles (und Newton) an, daß »zwei Kräfte, von denen jede einzelne eines von zwei Gewichten in einer bestimmten Zeit eine bestimmte Entfernung bewegt ..., die zusammengefaßten Gewichte in der gleichen Zeit die gleiche Entfernung bewegen«, dann muß die Geschwindigkeit eine Funktion des Quotienten aus der Kraft und der Größe des Körpers sein²⁵. Das Aristotelische Gesetz ergibt sich unmittelbar, wenn man als die Funktion die einfachste mögliche nimmt, d. h. den Quotienten selbst. Das scheint vielleicht nicht die richtige Art zu sein, Bewegungsgesetze herzuleiten, doch Galilei ging oft ebenso vor²⁶. In diesem speziellen Punkt war der grundlegende Unterschied zwischen Galilei und Aristoteles der, daß Galilei von einem anderen Geschwindigkeitsbegriff ausging. Da für ihn nicht alle Bewegungen quasi-gleichförmig waren, war die Geschwindigkeit nicht das einzige Maß der Bewegung, das sich mit der Kraft, der Größe des Körpers usw. ändern konnte. Galilei konnte auch veränderliche Beschleunigungen betrachten. Diese Beispiele ließen sich wesentlich vermehren, doch es dürfte bereits klar sein, worauf ich hinaus will. Der Geschwindigkeitsbegriff des Aristoteles, der so etwas wie die heutigen Begriffe der Durchschnittsgeschwindigkeit und der Momentangeschwindigkeit vereinigte, war ein wesentlicher Bestandteil seiner ganzen Bewegungstheorie und hatte Konsequenzen für die gesamte Physik. Diese Rolle konnte er spielen, weil er nicht einfach eine Definition war, sei sie verworren oder nicht. Vielmehr hatte er physikalische Konsequenzen und fungierte teilweise als Naturgesetz. Diese Konsequenzen konnten niemals durch die Beobachtung oder die Logik in einer Welt in Frage gestellt werden, in der alle Bewegungen gleichförmig oder quasi-gleichförmig waren, und Aristoteles ging so vor, als

lebte er in einer derartigen Welt. In Wirklichkeit war das natürlich nicht der Fall, doch sein Begriff funktionierte trotzdem so gut, daß mögliche Abweichungen von der Beobachtung überhaupt nicht bemerkt wurden. Und solange das nicht der Fall war – d. h., solange die möglichen Schwierigkeiten bei der Anwendung des Begriffs nicht wirklich wurden –, hat man kein Recht, den Aristotelischen Geschwindigkeitsbegriff verworren zu nennen. Natürlich kann man ihn »falsch« nennen, im gleichen Sinne, wie man das von veralteten Gesetzen und Theorien sagt. Außerdem kann man sagen, weil der Begriff falsch war, waren seine Anwender *der Gefahr der Verwirrung ausgesetzt*, wie es dann bei Salvatis Gesprächspartnern eintrat. Doch nach meiner Auffassung kann man an dem Begriff an sich keinen Fehler finden. Seine Fehler lagen nicht in seiner logischen Widersprüchlichkeit, sondern darin, daß er nicht der gesamten Feinstruktur der Welt entsprach, auf die er passen sollte. Daher bedeutete die Erkenntnis seiner Schwächen notwendigerweise nicht nur eine Erkenntnis über den Begriff, sondern auch über die Welt.

Wenn der Gesetzesgehalt einzelner Begriffe als etwas Ungeohntes erscheint, dann liegt das wohl an dem Zusammenhang, in dem ich ihn hier herangezogen habe. Den Linguisten ist die Sache schon lange durch die Schriften von B. L. Whorf²⁷ bekannt, wenn auch umstritten. Braithwaite hat im Anschluß an Ramsey eine ähnliche These entwickelt. Mittels logischer Modelle zeigte er das unentwirrbare Gemisch von Gesetz und Definition auf, das für die Funktion auch ziemlich elementarer wissenschaftlicher Begriffe kennzeichnend sein muß²⁸. Noch deutlicher zeigen das verschiedene neuere Diskussionen in der Logik über die Verwendung von »Reduktionssätzen« bei der Bildung wissenschaftlicher Begriffe. Diese Sätze geben (in einer logischen Form, mit der wir uns hier nicht zu beschäftigen brauchen) die Beobachtungs- oder Prüfbedingungen an, unter denen ein bestimmter Begriff angewendet werden kann. In der Praxis ähneln sie sehr stark den Bedingungen, unter welchen die meisten wissenschaftlichen Begriffe tatsächlich gelernt werden, und das verleiht ihren beiden Haupteigenschaften besondere Bedeutung. Einmal bedarf es gewöhnlich mehrerer – oft vieler – Reduktionssätze, um einem gegebenen Begriff die Anwendungsbreite zu verleihen, die er in der wis-

senschaftlichen Theorie braucht. Und zweitens: sobald mehrere Reduktionssätze zur Einführung eines einzigen Begriffes verwendet werden, folgen aus ihnen »gewisse Aussagen, die den Charakter empirischer Gesetze haben ... Systeme von Reduktionssätzen vereinigen auf merkwürdige Weise die Funktionen der Begriffsbildung und der Theoriebildung«.²⁹ Dieses Zitat zusammen mit dem vorhergehenden Satz beschreibt fast genau die Situation, die wir gerade untersuchten. Wir brauchen aber gar nicht ganz in die Logik und Wissenschaftstheorie überzugehen, um die gesetzesartige Funktion wissenschaftlicher Begriffe zu erkennen. In anderer Form ist sie jedem Wissenschaftshistoriker bereits vertraut, der die Entwicklung von Begriffen wie Element, Art, Masse, Kraft, Raum, Wärme oder Energie genau untersucht hat³⁰. Diese und viele andere wissenschaftliche Begriffe befinden sich stets in einem Netz von Gesetzen, Theorien und Erwartungen, aus dem sie nicht für Definitionszwecke völlig herausgelöst werden können. Um zu erkennen, was sie bedeuten, muß der Historiker untersuchen, was über sie gesagt wird, und auch wie sie verwendet werden. Dabei stößt man regelmäßig auf eine Anzahl verschiedener Kriterien für ihren Gebrauch, deren gleichzeitiges Vorhandensein nur im Hinblick auf viele andere wissenschaftliche (und manchmal außerwissenschaftliche) Auffassungen ihrer Anwender verständlich ist. Es folgt, daß diese Begriffe nicht für die Anwendung auf jede mögliche Welt gedacht waren, sondern nur auf die Welt, wie sie der Wissenschaftler sah. Ihr Gebrauch ist ein Anzeichen dafür, daß er an ein größeres System von Gesetzen und Theorien glaubt. Umgekehrt schlägt sich der Gesetzesgehalt dieses Systems teilweise in den Begriffen selbst nieder. Daher haben zwar viele von ihnen eine Geschichte, die mit der Geschichte der entsprechenden Wissenschaft zusammenfällt, doch ihre Bedeutung und ihre Anwendungskriterien haben sich im Laufe der wissenschaftlichen Entwicklung sehr oft und sehr einschneidend verändert.

Kommen wir schließlich auf den Begriff der Geschwindigkeit zurück, so ist festzuhalten, daß ihn Galileis Neuformulierung nicht ein für allemal logisch bereinigte. Ebenso wie bei seinem Aristotelischen Vorgänger ergaben sich aus ihm Folgerungen für das Verhalten der Natur. Demzufolge konnte er ebenso

wie der Aristotelische Geschwindigkeitsbegriff durch angesammelte Erfahrungen in Frage gestellt werden, und dies geschah am Ende des letzten und Beginn des jetzigen Jahrhunderts. Der Vorgang ist zu gut bekannt, als daß er einer ausführlichen Erörterung bedürfte. Bei der Anwendung auf beschleunigte Bewegungen setzt der Galileische Geschwindigkeitsbegriff eine Klasse physikalisch nicht beschleunigter räumlicher Bezugssysteme voraus. Das ist die Lehre aus Newtons Eimer-Experiment, die keiner der Relativisten des 17. und 18. Jahrhunderts wegerklären konnte. Und bei der Anwendung auf lineare Bewegungen zieht der revidierte Geschwindigkeitsbegriff, der in dieser Arbeit verwendet wird, die Gültigkeit der sogenannten Galilei-Transformation nach sich, und aus dieser folgen physikalische Eigenschaften, z. B. die Additivität der Geschwindigkeit der Materie oder des Lichts. Ohne sich auf ein übergeordnetes System von Gesetzen und Theorien wie das Newtonsche stützen zu können, lieferte sie höchst bedeutsame Informationen über Eigenschaften der Welt. Oder vielmehr, sie tat es einmal. Einer der ersten großen Triumphe der Physik des 20. Jahrhunderts war die Erkenntnis, daß diese Information fragwürdig war, und die darauf folgende Neufassung der Begriffe von Geschwindigkeit, Raum und Zeit. Und bei dieser Neufassung spielten Gedankenexperimente wieder eine entscheidende Rolle. Der geschichtliche Vorgang, den wir oben im Werk Galileis verfolgt haben, hat sich inzwischen bezüglich des gleichen Systems von Begriffen wiederholt. Und es ist durchaus möglich, daß er sich noch einmal wiederholen wird, denn er ist einer der grundlegenden Vorgänge, durch die die Wissenschaft voranschreitet.

4

Meine Argumentation ist jetzt fast abgeschlossen. Um auf das noch Fehlende zu kommen, möchte ich kurz das Bisherige in seinen Hauptpunkten wiederholen. Ich begann mit der Auffassung, daß eine wichtige Klasse von Gedankenexperimenten den Wissenschaftler mit einem Widerspruch oder einer Unstimmigkeit konfrontiert, die in seiner Denkweise steckte. Das Erkennen des Widerspruchs erschien dann als ein wesentlicher erster Schritt zu seiner Beseitigung. Als Ergebnis des

Gedankenexperimente wurden klare Begriffe entwickelt, die die bisherigen verworrenen ersetzen. Eine genauere Untersuchung jedoch deckte eine wesentliche Schwierigkeit dieser Auffassung auf. Die im Gefolge der Gedankenexperimente »berichtigten« Begriffe waren *an sich* nicht verworren. Wenn ihr Gebrauch zu Problemen führte, so unterschieden sich diese nicht von denen, die jedes auf Experimenten beruhende Gesetz oder jede solche Theorie schafft. Das heißt, sie entstanden nicht allein aus dem Begriffsapparat, sondern aus den Schwierigkeiten bei dem Versuch, diesen auf eine bisher unverarbeitete Erfahrung anzuwenden. Die Natur und nicht bloß die Logik war für die scheinbare Verwirrung verantwortlich. Diese Verhältnisse führten mich zu der Behauptung, aus Gedankenexperimenten der hier untersuchten Art lerne der Wissenschaftler nicht nur etwas über seine Begriffe, sondern auch etwas über die Welt. Geschichtlich ähnelt ihre Rolle stark der Doppelrolle wirklicher Laborexperimente und Beobachtungen. Erstens können Gedankenexperimente aufdecken, daß die Natur einem bisherigen System von Erwartungen nicht entspricht. Außerdem können sie aufzeigen, wie die Erwartungen und die Theorie abgeändert werden müssen.

Doch wie – und das ist das verbleibende Problem – können sie das? Laborexperimente erfüllen diese Funktionen, weil sie dem Wissenschaftler neue und unerwartete Informationen liefern. Gedankenexperimente dagegen stützen sich ausschließlich auf bereits vorhandene Informationen. Wenn nun die beiden so ähnliche Funktionen haben, so muß es daran liegen, daß Gedankenexperimente dem Wissenschaftler gelegentlich Informationen verschaffen, die gleichzeitig verfügbar und doch irgendwie unzugänglich sind. Ich möchte nun zu zeigen versuchen, wenn auch unvermeidlicherweise kurz und unvollständig, wie dies der Fall sein könnte.

Andernorts habe ich ausgeführt, die Entwicklung eines ausgereiften wissenschaftlichen Spezialgebiets sei gewöhnlich weitgehend von dem eng verwobenen System von Begriffen, Gesetzen, Theorien und apparativen Methoden bestimmt, das dem Fachvertreter in seiner Ausbildung vermittelt wird³¹. Dieses bewährte System von Anschauungen und Erwartungen sagt ihm, wie die Welt beschaffen ist, und legt gleichzeitig die Probleme fest, die noch der Bearbeitung bedürfen. Es sind die-

jenigen Probleme, deren Lösung die Güte und den Umfang der Übereinstimmung zwischen den vorhandenen Auffassungen und der Naturbeobachtung erhöhen wird. Werden die Probleme so ausgewählt, so gewährleistet bisheriger Erfolg gewöhnlich auch zukünftigen Erfolg. Ein Grund dafür, warum die wissenschaftliche Forschung stetig von der Lösung eines Problems zur Lösung des nächsten fortzuschreiten scheint, ist der, daß die Fachvertreter sich auf Probleme beschränken, die durch die bereits vorhandenen theoretischen und apparativen Methoden festgelegt werden.

Diese Art der Problemauswahl macht nun zwar kurzfristige Erfolge besonders wahrscheinlich, führt aber auch mit Sicherheit zu langfristigen Mißerfolgen, die für den Fortschritt der Wissenschaften noch schwerwiegender sind. Selbst die nach diesen beschränkten Forschungsmethoden zutage geförderten Daten entsprechen nie vollständig oder ganz genau den theoretischen Erwartungen. Einige dieser Nichtübereinstimmungen bilden die laufenden Forschungsprobleme; doch andere werden an den Rand des Bewußtseins gedrängt, und einige werden völlig unterdrückt. Gewöhnlich ist diese Unfähigkeit, Anomalien zu erkennen und sich ihnen zu stellen, letzten Endes gerechtfertigt. Oft genug wird die scheinbare Anomalie durch geringfügige apparative oder theoretische Veränderungen auf das Gesetz zurückgeführt. Wollte man sich von Anfang an über jede Anomalie aufhalten, so würde man sich ständig ablenken lassen³². Doch nicht alle Anomalien sind mit geringfügigen theoretischen und apparativen Veränderungen zu beheben. Einige davon lassen sich wegen ihrer besonderen Auffälligkeit oder ihres wiederholten Auftretens in vielen verschiedenen Laboratorien auf die Dauer nicht ignorieren. Obwohl sie weiterhin in die wissenschaftliche Arbeit nicht einbezogen werden, wirken sie mit allmählich steigendem Nachdruck auf das Bewußtsein der wissenschaftlichen Gemeinschaft ein.

Im Laufe dieses Vorgangs verändert sich allmählich die Forschung. Zunächst erscheinen Berichte über unerklärte Beobachtungen immer häufiger in Laboraufzeichnungen oder als Nebenbemerkungen in Veröffentlichungen. Dann richten sich immer mehr Untersuchungen auf die Anomalie selbst. Diejenigen, die sie auf die Gesetze zurückführen möchten, wer-

den zunehmend über die Bedeutung der Begriffe und Theorien streiten, die alle schon so lange angewandt hatten, ohne eine Mehrdeutigkeit zu bemerken. Einige werden eine kritische Analyse des Systems der Auffassungen beginnen, das die Wissenschaftler in die Sackgasse geführt hat. Gelegentlich wird sogar die Philosophie zu einem anerkannten wissenschaftlichen Werkzeug, was sie gewöhnlich nicht ist. Mindestens einige dieser Symptome der Gemeinschaftskrise scheinen mir regelmäßig der grundlegenden theoretischen Neuorientierung vorauszuweichen, die die Beseitigung einer hartnäckigen Anomalie fast immer erfordert. Gewöhnlich endet diese Krise erst, wenn ein besonders erfindungsreicher Wissenschaftler oder eine Gruppe von solchen ein neues System von Gesetzen, Theorien und Begriffen geschaffen hat, das mit der bisher widerspenstigen Erfahrung und auch wenigstens dem größten Teil der bisherigen theoriekonformen Erfahrung fertig wird.

Diese theoretische Neuorientierung habe ich an anderer Stelle wissenschaftliche Revolution genannt. Solche Revolutionen brauchen auch nicht annähernd so tiefgreifend zu sein, wie es aus der obigen Skizze hervorgeht, aber sie haben alle mit ihr eine wesentliche Eigenschaft gemeinsam. Die für die Revolution notwendigen Daten waren schon vorher am Rande des wissenschaftlichen Bewußtseins vorhanden; die Krise rückt sie in den Mittelpunkt der Aufmerksamkeit; und die revolutionäre Neuorientierung ermöglicht es, sie auf neue Weise zu sehen³³. Was vor der Revolution trotz des geistigen Rüstzeugs undeutlich erkannt wurde, wird nachher wegen des geistigen Rüstzeugs genau erkannt.

Dieses Ergebnis, oder diese Konstellation von Ergebnissen, ist natürlich zu umfassend und zu undurchschaubar, als daß es hier vollständig belegt werden könnte. Ich meine aber, daß eine Anzahl seiner wesentlichen Bestandteile in einem beschränkten Anwendungsfall bereits belegt worden ist. Eine Krise, ausgelöst durch den Fehlschlag von Erwartungen und gefolgt von einer Revolution, steht im Mittelpunkt der Gedankenexperiment-Situationen, die wir untersucht haben. Umgekehrt ist das Gedankenexperiment eines der wesentlichen analytischen Mittel, die während der Krise eingesetzt werden und dann zur grundlegenden theoretischen Neuorientierung beitragen. Das Ergebnis von Gedankenexperimenten

kann das gleiche sein wie das von wissenschaftlichen Revolutionen: sie können den Wissenschaftler instand setzen, etwas als wesentlichen Bestandteil seines Wissens zu verwenden, was dieses Wissen ihm bisher unzugänglich gemacht hatte. In diesem Sinne verändert sich sein Wissen von der Welt. Und weil sie diese Wirkung haben können, häufen sie sich so auffällig in den Werken von Leuten wie Aristoteles, Galilei, Descartes, Einstein und Bohr, den großen Schöpfern neuer theoretischer Ansätze.

Kommen wir nun kurz und ein letztes Mal auf unsere eigenen Experimente zurück, die von Piaget und Galilei. Die Schwierigkeit bei ihnen war, so scheint mir, die: in den vor dem Experiment bestehenden Auffassungen waren indirekt Naturgesetze enthalten, die zu Informationen im Gegensatz standen, die die Versuchspersonen uns mit Sicherheit schon zu besitzen schienen. Nur deshalb konnten sie überhaupt aus der Versuchssituation etwas lernen. Unter diesen Umständen konnten wir nicht recht begreifen, warum sie den Widerspruch nicht erkennen konnten; wir waren nicht recht sicher, was sie noch lernen mußten; und daher mußten wir sie als verworren ansehen. Diese Beschreibung der Verhältnisse war meiner Meinung nach nicht völlig falsch, aber irreführend. Ich möchte jetzt zum Schluß als Ersatz folgende Beschreibung anbieten, die freilich teilweise metaphorisch bleiben muß.

Einige Zeit vor unserer Begegnung mit ihnen hatten unsere Versuchspersonen in ihrem Umgang mit der Natur mit Erfolg ein Begriffssystem verwendet, das von dem unsrigen verschieden war. Es war bewährt und hatte noch zu keinen Schwierigkeiten geführt. Trotzdem hatten sich bei ihnen zu der Zeit, als wir ihnen begegneten, schließlich verschiedene Erfahrungen angesammelt, die nicht in ihre herkömmliche Art des Umgangs mit der Welt hineinpaßten. An diesem Punkt lagen ihnen bereits alle Erfahrungen vor, die für eine grundlegende Umwandlung ihrer Begriffe nötig waren, doch es gab an dieser Erfahrung etwas, was sie noch nicht erkannt hatten. Deshalb waren sie der Gefahr der Verwirrung ausgesetzt und fühlten sich womöglich schon nicht mehr wohl³⁴. Die vollständige Verwirrung trat allerdings erst in der Situation des Gedankenexperiments ein, und da war sie schon das Vorspiel zu ihrer Behebung. Indem das Gedankenexperiment die dun-

kel empfundene Anomalie zu einem konkreten Widerspruch machte, zeigte es den Versuchspersonen, was nicht in Ordnung war. Diese erste deutliche Wahrnehmung der Unstimmigkeit zwischen Erfahrung und unausgesprochener Erwartung lieferte die Gesichtspunkte zur Behebung der Schwierigkeit.

Welche Eigenschaft muß ein Gedankenexperiment haben, wenn es zu diesen Wirkungen fähig sein soll? Ein Teil meiner obigen Antwort kann stehen bleiben. Wenn es eine Unstimmigkeit zwischen dem herkömmlichen Begriffsapparat und der Natur aufdecken soll, dann muß die vorgestellte Situation dem Wissenschaftler gestatten, seine gewohnten Begriffe in der bisherigen Weise anzuwenden. Das heißt, sie darf über den normalen Gebrauch nicht hinausgehen. Andererseits muß der Teil meiner obigen Antwort, der sich mit der physikalischen Wirklichkeitsnähe beschäftigte, jetzt berichtigt werden. Er ging davon aus, daß Gedankenexperimente mit rein logischen Widersprüchen oder Verwirrungen zu tun hätten; daher würde jede Situation, in der solche Widersprüche zutage treten können, brauchbar sein; es gab also überhaupt keine Bedingung der physikalischen Wirklichkeitsnähe. Wenn man aber davon ausgeht, daß die Natur und der Begriffsapparat beide in den vom Gedankenexperiment aufgewiesenen Widerspruch eingehen, ist eine stärkere Bedingung nötig. Die vorgestellte Situation braucht zwar in der Natur nicht einmal möglich zu sein, doch der aus ihr abgeleitete Widerspruch muß derart sein, daß ihn die Natur selbst präsentieren könnte. Ja, auch diese Bedingung ist noch nicht ganz stark genug. Die Schwierigkeit, der sich der Wissenschaftler in der Experimentalsituation gegenüber sieht, muß ihm schon vorher, wenn auch noch so undeutlich, gegenwärtig gewesen sein. Falls er nicht wenigstens so viel Erfahrung gehabt hat, ist er noch nicht imstande, aus Gedankenexperimenten allein etwas zu lernen.

Anmerkungen

- 1 Das berühmte Gedankenexperiment mit dem Zug taucht zuerst in Einsteins populärwissenschaftlicher Darstellung der Relativitätstheorie auf, *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie (Gemeinverständlich)* (Braunschweig 1916). In der 5. Auflage von 1920, die ich benutzt habe, wird das Experiment S. 14-19 beschrieben. Man beachte, daß dieses Gedankenexperiment nur eine vereinfachte Fassung desjenigen in Einsteins erster Arbeit über die Relativitätstheorie ist, »Zur Elektrodynamik bewegter Körper«, *Annalen der Physik* 17 (1905), 891-921. In diesem ursprünglichen Gedankenexperiment wird nur ein einziges Lichtsignal verwendet, das andere wird durch Spiegelung ersetzt.
- 2 W. Heisenberg, »Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik«, *Zeitschrift für Physik* 43 (1927), 172-198; N. Bohr, »The quantum postulate and the recent development of atomic theory«, *Atti del congresso internazionale dei fisici*, 11.-20. September 1927, Bd. 2 (Bologna 1928), 565-588. Die Argumentation beginnt damit, daß das Elektron als klassisches Teilchen behandelt wird, und diskutiert seine Bahn vor und nach dem Zusammenstoß mit dem Photon, das zur Bestimmung seines Ortes oder seiner Geschwindigkeit verwendet wird. Das Ergebnis soll zeigen, daß diese Messungen nicht klassisch durchgeführt werden können, und daß die anfängliche Beschreibung daher mehr vorausgesetzt hat, als die Quantenmechanik zuläßt. Diese Verletzung quantenmechanischer Grundsätze mindert aber nicht die Tragweite des Gedankenexperiments.
- 3 J. Piaget, *Les notions de mouvement et de vitesse chez l'enfant* (Paris 1946), insbes. Kap. 6 u. 7. Die unten beschriebenen Experimente stehen in Kap. 7.
- 4 Ebenda, S. 160.
- 5 Ebenda, S. 161. Hervorhebung von mir. In dieser Passage habe ich »plus fort« mit »schneller« wiedergegeben; in der vorhergehenden Passage hieß es auf Französisch »plus vite«. Die Experimente selbst jedoch zeigen, daß jedenfalls in diesem Zusammenhang die Antworten auf die Fragen »plus fort?« und »plus vite?« die gleichen sind.
- 6 Derartige Fragen wurden von Charles E. Osgood zur Gewinnung des sogenannten »semantischen Profils« verschiedener Wörter verwandt. Siehe sein Buch *The Measurement of Meaning* (Urbana, Ill. 1957).
- 7 Aristoteles, *Physik*, 224 b 35-225 a 1.
- 8 Ebenda, 232 a 25-27.
- 9 Ebenda, 249 b 4-5.
- 10 Ebenda, 230 b 23-25.
- 11 Eine eingehende Erörterung der gesamten Frage der latitudo formarum findet sich bei Marshall Clagett, *The Science of Mechanics in the Middle Ages* (Madison, Wis. 1959), Teil 2.

- 12 Ebenda, S. 290.
- 13 Der deutlichste Lapsus dieser Art findet sich im »Zweiten Tag« von Galileis *Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme* (engl. v. Stillman Drake, Berkeley, Calif. 1953, S. 199-201; dt. von E. Strauss, Leipzig 1892, S. 210-213). Dort argumentiert Galilei, kein materieller Körper, wie leicht er auch sei, würde von der Erde wegfliegen, auch wenn sie sich wesentlich schneller drehen würde, als es tatsächlich der Fall ist. Dieses Ergebnis (das Galileis System braucht – der Lapsus ist also, wenn auch sicher unbeabsichtigt, so doch nicht unmotiviert) wird gewonnen, indem die Endgeschwindigkeit einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung als proportional zur zurückgelegten Entfernung genommen wird. Das folgt natürlich unmittelbar aus der Mertonschen Regel, gilt aber nur für Bewegungsvorgänge, die die gleiche Zeit andauern. Man sollte auch Drakes Anmerkungen zu dieser Passage heranziehen, da sie eine etwas andere Deutung liefern.
- 14 Ebenda, engl. Ausg. S. 22-27, dt. Ausg. S. 23-29.
- 15 Galilei nützt dieses Zugeständnis etwas weniger aus, als ich es weiter unten tun werde. Genau genommen, hängt seine Argumentation nicht davon ab, sofern die Ebene CA über A hinaus verlängert werden kann und der sie hinabrollende Körper seine Geschwindigkeit weiter steigert. Der Einfachheit halber beschränke ich meine systematisierte Wiedergabe auf die nicht verlängerte Ebene und folge damit Galileis Vorbild im ersten Teil seines Texts.
- 16 Wer das nicht für eine sehr verführerische und naheliegende Antwort hält, sollte, wie ich es getan habe, Galileis Frage fortgeschrittenen Physikstudenten stellen. Wenn man ihnen nicht vorher sagt, worum es geht, geben viele dieselbe Antwort wie Salvatis Gesprächspartner.
- 17 Diese Bemerkung setzt eine Analyse des Auftretens neuer Entdeckungen voraus; dazu siehe meine Arbeit »Die historische Struktur wissenschaftlicher Entdeckungen«, im vorliegenden Band abgedruckt.
- 18 Man kann sich auch eine Welt vorstellen, in der die beiden von Piagets Kindern angewandten Kriterien nie zu Widersprüchen führen, doch diese wäre komplizierter, und daher werde ich mich in der folgenden Argumentation nicht auf sie stützen. Ich möchte aber eine prüfbare Vermutung über die Bewegung in dieser Welt wagen. Sofern die Kinder nicht die Erwachsenen nachahmen, müßten sie, wenn sie die Bewegung so sehen, wie oben beschrieben, sich nicht viel aus Hindernissen machen, die dem Gewinnen eines Wettlaufs entgegenstehen. Vielmehr müßte alles davon abhängen, wie heftig die Gliedmaßen bewegt werden.
- 19 Aristoteles, *Physik*, 232 a 28-31.
- 20 In Wirklichkeit kann natürlich die erste Passage keine Definition sein. Jede der drei dort genannten Bedingungen könnte es sein, doch wenn man die drei als äquivalent betrachtet, wie es Aristoteles tut, dann hat das die gleichen physikalischen Konsequenzen, wie ich sie hier an der zweiten Passage aufzeige.
- 21 Aristoteles, *Physik*, 232 b 21-233 a 13.
- 22 Diese Gesetze werden stets als »quantitative« bezeichnet, und ich schließe mich diesem Sprachgebrauch an. Doch man kann sich kaum vorstellen, daß sie als quantitativ in dem Sinne aufgefaßt wurden, wie es in der

- Bewegungslehre seit Galilei der Fall war. In der Antike wie im Mittelalter wurden diese Bewegungsgesetze von Leuten, die Messungen in der Astronomie regelmäßig für wichtig hielten und sie in der Optik gelegentlich anwandten, ohne auch nur den indirektesten Bezug auf irgendwelche quantitativen Beobachtungen erörtert. Außerdem wurden die Gesetze nie auf die Natur angewandt, außer bei Argumenten zur *reductio ad absurdum*. Mir scheint ihre Absicht eine qualitative zu sein – sie drücken in der Sprache der Proportionen mehrere richtig beobachtete qualitative Gesetzmäßigkeiten aus. Diese Auffassung dürfte eher einleuchten, wenn man sich erinnert, daß nach Eudoxos selbst die geometrische Proportion stets als nichtnumerisch aufgefaßt wurde.
- 23 Aristoteles, *Physik*, 249 b 30-250 a 4.
- 24 Eine überzeugende Kritik an denen, die das Gesetz einfach dumm finden, liefert Stephen Toulmin, »Criticism in the History of Science: Newton and Absolute Space, Time and Motion, I«, *Philos. Rev.* 68 (1969), 1-29, insbes. Anm. 1.
- 25 Aristoteles, *Physik*, 250 a 25-28.
- 26 Ein Beispiel: »Wenn ich daher bemerke, daß ein aus der Ruhelage von bedeutender Höhe herabfallender Stein nach und nach neue Zuwüchse an Geschwindigkeit erlangt, warum sollte ich nicht glauben, daß solche Zuwüchse in aller einfachster, Jedermann plausibler Weise zustande kommen? Wenn wir genau aufmerken, werden wir keinen Zuwachs einfacher finden, als denjenigen, der in immer gleicher Weise hinzutritt.« Galileo Galilei, *Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend*, dt. von Artur von Oettingen, Leipzig 1890, 1904 und 1891, Nachdruck Darmstadt 1964, S. 147; engl. von H. Crew und A. de Salvio (Evanston/Chicago 1946), S. 154-155. Galilei stellte aber doch eine experimentelle Prüfung an.
- 27 B. L. Whorf, *Language, Thought, and Reality: Selected Writings*, Hrsg. J. Carroll (Cambridge, Mass. 1956), dt.: *Sprache, Denken, Wirklichkeit*, hg. von P. Krausser, Reinbek: Rowohlt 1963.
- 28 R. B. Braithwaite, *Scientific Explanation* (Cambridge 1953), Kap. 3, S. 50-87. Siehe auch W. V. Quine, »Two Dogmas of Empiricism«, in *From a Logical Point of View* (Cambridge, Mass. 1953), S. 20-46.
- 29 C. G. Hempel, *Fundamentals of Concept Formation in Empirical Science*, vol. 2, Nr. 7 der *International Encyclopedia of Unified Science* (Chicago 1952), S. 28; dt.: *Grundzüge der Begriffsbildung in der empirischen Wissenschaft*, Düsseldorf 1974, S. 34. Die grundlegende Abhandlung über die Reduktionssätze ist Rudolf Carnap, »Testability and Meaning«, *Philos. of Sci.* 3 (1936), 420-471, und 4 (1937), 2-40.
- 30 Die Fälle des Wärmestoffs und der Masse sind besonders lehrreich, der erste wegen seiner Parallelität zu dem oben besprochenen Beispiel, der zweite, weil er die Entwicklungslinie umkehrt. Es ist schon oft darauf hingewiesen worden, daß Sadi Carnot aus der Wärmestofftheorie gute experimentelle Ergebnisse ableitete, weil sein Wärmebegriff Eigenschaften verband, die später teils der Wärme, teils der Entropie zugewiesen wurden. (Siehe meine Diskussion mit V. K. La Mer, *Am. J. of Physics* 22 (1954), 20-27; 23 (1955), 91-95, 95-102, 387-389. An der

letzten dieser Stellen wird die Sache so formuliert, wie es hier gebraucht wird.) Die Masse hingegen weist eine umgekehrte Entwicklung auf. In der Newtonschen Theorie sind träge und schwere Masse unabhängige Begriffe, die auf verschiedene Weise gemessen werden. Daß die beiden Arten von Messungen stets innerhalb der Meßgenauigkeit die gleichen Ergebnisse liefern, das ist ein experimentell geprüftes Naturgesetz. Doch nach der allgemeinen Relativitätstheorie bedarf es keines besonderen experimentellen Gesetzes. Die Messungen *müssen* das gleiche Ergebnis liefern, weil sie dieselbe Größe messen.

- 31 Unvollständige Erörterungen dieses und der folgenden Gesichtspunkte finden sich in meinen Arbeiten »Die Funktion des Messens in der modernen Naturwissenschaft«, im vorliegenden Band abgedruckt, und »The Function of Dogma in Scientific Research«, in A. C. Crombie (Hrsg.), *Scientific Change*, London/New York 1963. Die ganze Frage wird vollständiger und an vielen weiteren Beispielen erörtert in meiner Arbeit *The Structure of Scientific Revolutions* (Chicago 1962), dt. *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, Frankfurt am Main 1967, 3. Aufl. 1976.
- 32 Reiches Material zu diesem Punkt findet sich bei Michael Polanyi, *Personal Knowledge* (Chicago 1958), insbes. Kap. 9.
- 33 Der Ausdruck »ermöglicht es, sie auf neue Weise zu sehen« muß hier ein Bild bleiben, obwohl ich ihn ganz wörtlich meine. N. R. Hanson, *Patterns of Discovery* (Cambridge 1958), S. 4-30, behauptete schon, was die Wissenschaftler sehen, hänge von ihren bereits vorhandenen Auffassungen und ihrer Ausbildung ab; reiches Material dazu findet sich in der letzten in Anm. 31 angegebenen Arbeit.
- 34 Piagets Kinder hatten natürlich kein ungutes Gefühl (jedenfalls nicht aus Gründen, die hier von Bedeutung wären), bis ihnen die Experimente erklärt wurden. In der geschichtlichen Situation dagegen kommt es im allgemeinen zu Gedankenexperimenten, weil sich der Eindruck immer mehr verstärkt, daß irgendwo etwas nicht stimmt.

Logik oder Psychologie der Forschung?¹

Ich möchte hier meine Auffassung von der Entwicklung der Wissenschaft, wie sie in meinem Buch *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen* skizziert ist, den bekannteren Auffassungen unseres Diskussionsleiters Sir Karl Popper gegenüberstellen². Im allgemeinen würde ich ein derartiges Vorhaben von mir weisen, denn ich bin weniger optimistisch als Sir Karl bezüglich des Nutzens von Konfrontationen. Außerdem habe ich sein Werk viel zu lange bewundert, als daß ich jetzt auf einmal so leicht zum Kritiker werden könnte. Aber ich bin nun doch überzeugt, daß bei dieser Gelegenheit der Versuch gewagt werden muß. Schon vor der Veröffentlichung meines Buches vor zweieinhalb Jahren begannen mir ganz bestimmte und oft verwirrende Eigenheiten der Beziehung zwischen seinen und meinen Auffassungen aufzufallen. Diese Beziehung und die sehr verschiedenartigen Reaktionen auf sie lassen erwarten, daß ein sorgfältiger Vergleich zwischen den beiden Auffassungen besonders nützlich sein könnte. Dafür möchte ich jetzt die Gründe nennen.

Fast jedesmal, wenn sich Sir Karl und ich ausdrücklich den gleichen Problemen zuwenden, sind unsere Anschauungen von der Wissenschaft fast die gleichen³. Es geht uns beiden um den dynamischen Vorgang der wissenschaftlichen Erkenntnis und nicht um die logische Struktur der Ergebnisse; als die relevanten Daten betrachten wir beide die Tatsachen und auch den Geist des wirklichen wissenschaftlichen Lebens, und oft suchen wir sie in der Geschichte. Aus diesem gemeinsamen Datenvorrat ziehen wir auch oft die gleichen Folgerungen. Wir lehnen beide die Auffassung ab, die Wissenschaft schreite durch Hinzufügung immer weiterer Bausteine fort; beide betonen wir statt dessen die revolutionäre Verwerfung älterer Theorien und ihre Ersetzung durch neue, die mit ihnen unverträglich sind⁴; und beide betonen wir sehr stark, welche Rolle es dabei spielt, wenn die ältere Theorie an gewissen Problemen der Logik oder des Experiments und der Beobachtung