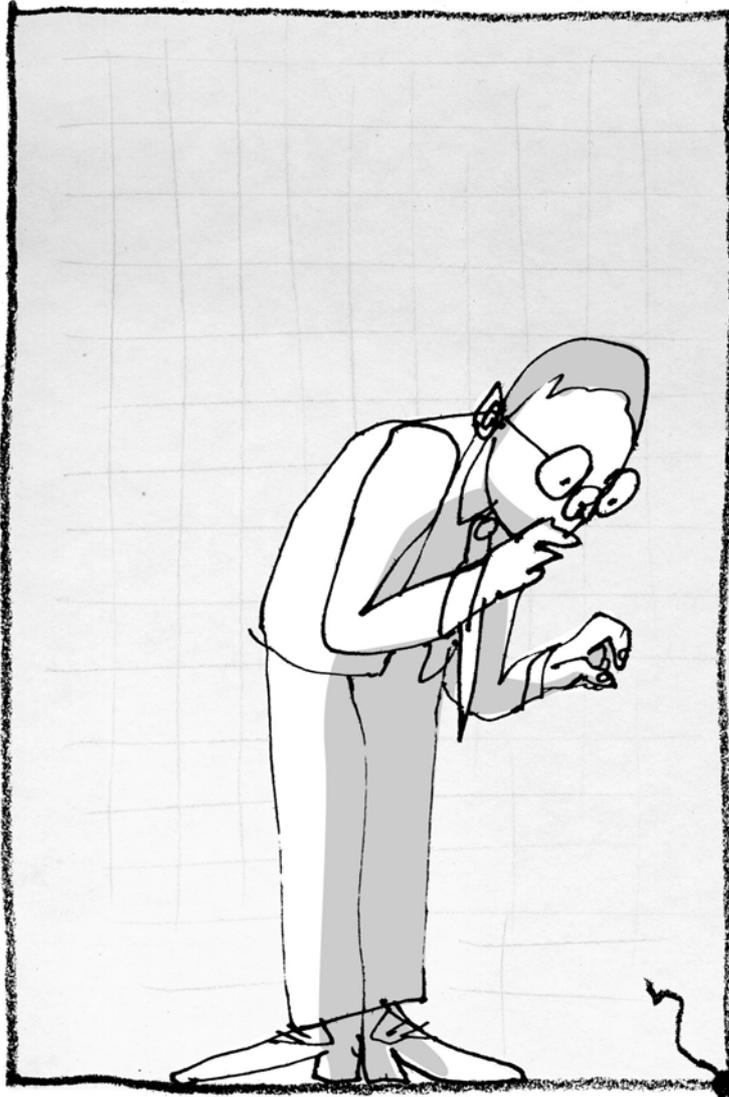


1. Kapitel

Das Paradox des wissenschaftlichen Fortschritts



Ausblick: Wie entwickelt sich das menschliche Wissen?

Warum gibt es überhaupt Fortschritt in der Wissenschaft? Können wissenschaftliche Revolutionen die Strukturen des Wissens völlig verändern? Wie vertragen sich wissenschaftliche Revolutionen mit dem Fortschritt der Wissenschaft?

Die Geschichte der Wissenschaft ist Teil einer umfassenderen Geschichte des menschlichen Wissens, zu der auch das intuitive und das praktische Wissen gehören, mit dem wir uns im Alltag orientieren oder die Herausforderungen unserer Umwelt meistern. Das Wissen der Menschheit ist in Instrumenten und Symbolen verkörpert, die dieses Wissen von Generation zu Generation weitergeben. Es erhält dadurch seine Kontinuität über lange Zeiträume, ähnlich wie die Vererbung in der biologischen Evolution dem Leben seinen langfristigen Bestand sichert. Die Entstehung des Neuen verdankt sich dabei der Möglichkeit, die überlieferten Werkzeuge auf neue Weise zu verwenden.

Zur Architektur des Wissens gehören mentale Modelle, mit deren Hilfe wir das Verhalten unserer Umwelt in Gedankenexperimenten erproben können. Wissenschaftliche Theoriegebäude beruhen auf der Vernetzung mentaler Modelle, die ihnen zugleich empirischen Halt und Anpassungsfähigkeit verleihen. Zusammen mit den materiellen Mitteln der Wissenschaft bildet die schriftliche Repräsentation solcher Theoriegebäude das Rückgrat gesellschaftlich tradierter Wissenssysteme, an denen der einzelne mit seinem individuellen Wissen partizipiert. Die Anreicherung solcher Wissenssysteme durch Erfahrung führt zu größerer Stabilität, langfristig aber auch zu inneren Spannungen und Widersprüchen.

Zugleich entstehen durch ihren Ausbau die Voraussetzungen für ihren Umbau in einem „Kopernikusprozeß“. Ähnlich wie bei der Kopernikanischen Revolution aus einem randständigen Gestirn das Zentrum eines neuen Weltgebäudes wird, verschiebt sich bei einer wissenschaftlichen Revolution der strukturelle Schwerpunkt eines Wissenssystems. In einer wissenschaftlichen Revolution geht deshalb das überlieferte Wissen nicht unter, sondern wird in einem Prozeß der Reflexion neu geordnet.

So entsteht der Fortschritt der Wissenschaft aus dem Zusammenwirken von Überlieferung und ihrer reflexiven Veränderung. Läßt sich vor diesem Hintergrund auch Einsteins Revolution der Wissenschaft begreifen?

Fortschritt zwischen Zufall und Notwendigkeit

Warum gibt es Fortschritt? Daß es ihn gibt, daran kann kein Zweifel bestehen, jedenfalls solange man sich auf den Fortschritt des naturwissenschaftlichen Forschens beschränkt und darunter die Entwicklung des Wissensbestandes versteht, den dieses Forschen über historische Zeiträume hinweg geleistet hat. Es gibt ihn, diesen Fortschritt, denn unsere technisierte Industriegesellschaft versteht sich weitgehend als sein Produkt, und es scheint ausgemacht, daß sie ohne weiteren Fortschritt kaum lange überleben würde. Zwar ist das notwendige oder wünschbare Ausmaß dieses Fortschritts und seiner Auswirkungen gelegentlich umstritten. So fragen sich die einen, ob auch genügend Mittel für Bildung und Wissenschaft aufgewendet werden, um den „Rohstoff Information“ in ausreichender Menge zu erzeugen und bereitzuhalten. Anderen hingegen verläuft der Fortschritt zu rasant, und sie warnen vor seinen Nebenwirkungen für Mensch und Natur. Doch in einem sind sich Wissenschaftsgläubige wie Wissenschaftsskeptiker überraschend einig: Für sie alle ist der wissenschaftliche Fortschritt ein unaufhaltsam voranschreitender Golem, dessen Schritte den Rhythmus der modernen Industriegesellschaften zum Guten oder Bösen bestimmen.

Nun genügt ein Blick auf traditionelle Kulturen, um zu erkennen, daß die Entwicklung menschlicher Gesellschaften nicht notwendigerweise mit einer sich selbst beschleunigenden Weiterentwicklung von Technik und schon gar nicht mit der Entstehung und Pflege von Wissenschaft verbunden ist. Wissenschaft ist offenbar nur eine unter vielen möglichen Ausdrucksformen menschlicher Kultur, eine Ausdrucksform, die unter historisch spezifischen Bedingungen entstanden ist, und die auch wieder untergehen kann. Daß die Geschichte zuweilen auch über Errungenschaften hinweggeht, dafür fehlt es nicht an Beispielen. Man denke nur an den Verlust antiker Bildung nach dem Untergang des Römischen Reiches oder an die fast vollständige Unterdrückung der ersten Ansätze zu einer Naturwissenschaft in China nach dessen Einigung im dritten vorchristlichen Jahrhundert. Doch indem wir wissenschaftlichen Fortschritt als ein historisches Phänomen identifizieren, stoßen wir auf ein Paradoxon: Einerseits haben wir es mit einem Phänomen zu tun, das ursprünglich offenbar das Ergebnis mehr oder weniger kontingenter historischer Bedingungen war, Bedingungen also, die selber durch keine faßbaren Gesetze erzwungen wurden, also genausogut anders hätten ausfallen können. Andererseits scheint dasselbe Phänomen nun seit mehr als einem Vierteljahrtausend zu einem unaufhaltsamen Motor der gesellschaftlichen Entwicklung geworden zu sein.

Offenbar ist der wissenschaftliche Fortschritt ebenso zerbrechlich wie unerschütterlich.

Kumulation oder Revolution?

Dieser paradoxe Charakter des wissenschaftlichen Fortschritts vertieft sich bei genauerem Hinsehen weiter. Zahlreiche Beispiele aus der Wissenschaftsgeschichte zeigen, wie sehr wissenschaftliche Durchbrüche von wirtschaftlichen Verhältnissen, technischen Voraussetzungen, nationalen Gepflogenheiten und Denkstilen, von schwer faßbarem Zeitgeist, ja, von persönlichen Vorlieben und Lauen abhängen können – nicht anders als bei Symphonien, Spielfilmen oder anderen Kulturleistungen. Wissenschaft ist ohne Zweifel von historischen Randbedingungen und Zufällen abhängig. Und doch hebt sie sich in ihrem Selbstverständnis in einer Eigenschaft von allen anderen kulturellen Äußerungen unsere Spezies ab – durch ihren anhäufenden, „kumulativen“ Charakter: Fast jeder Wissenschaftler ist persönlich davon überzeugt, daß er deshalb weiter sieht als seine Vorgänger, weil er von deren Leistungen ausgehen kann oder, wie Newton es im Rückgriff auf einen alten literarischen Topos ausgedrückt hat, weil er auf den Schultern von Riesen steht. Aus dieser Perspektive baut in der Wissenschaft ein Schritt auf dem anderen auf, so daß sich die langfristige Entwicklung der Wissenschaft im Rückblick als ein fortgesetzter Wachstumsprozeß darstellt, eben als Fortschritt im wörtlichen Sinne, der durch äußere Störungen wie Kriege oder Revolutionen höchstens vorübergehend unterbrochen wird.

Revolutionäre Züge sind allerdings auch der Wissenschaft selbst nicht fremd – und dieser Umstand läßt den Glauben an ihren stetigen Fortschritt wieder fragwürdig erscheinen. Das revolutionäre Moment der Wissenschaft wurde erst in den letzten Jahrzehnten von Historikern und Philosophen besonders betont. Sie verweisen auf die vielen Beispiele für radikale Veränderungen im Denken und Handeln der Wissenschaft, etwa die Wende vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild oder die von der klassischen Newtonschen zur relativistischen Physik Albert Einsteins. Wie sollen solche geistigen Umwälzungen nun mit Besitzstandswahrung und allmählicher Bestandserweiterung auf der Grundlage des einmal Erworbenen vereinbar sein?

In seiner berühmten Studie „Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen“ hat der amerikanische Wissenschaftstheoretiker Thomas S. Kuhn im Jahr 1962 die These aufgestellt, die Wissenschaftsgeschichte sei wesentlich von solchen Umbrüchen geprägt. Nach Kuhn lassen sich wissenschaftliche Revolutionen als radikale Umwälzun-

gen ganzer Weltbilder verstehen, genauer: als Prozesse der Ablösung bestimmter beispielgebender „Paradigmen“ durch andere. Die Strukturen wissenschaftlicher Revolutionen sind damit denen politischer und kultureller Umbrüche vergleichbar und folglich von ähnlichen psychologischen und soziologischen Faktoren abhängig. Wissenschaftsgeschichte wird somit zur Komponente einer umfassenden Kulturgeschichte.

Doch im Gegensatz zu den Feldern der Politik oder Kunst bleibt in der Wissenschaft das Bild vom unaufhaltsamen Voranschreiten unabweisbar. Wie das Phänomen des Fortschritts mit den Paradigmenwechseln zu vereinbaren ist, das haben Kuhn und seine Nachfolger ebensowenig beantworten können wie die Frage nach der Herkunft der jeweils neuen Paradigmen. Denn diese bauen ja nach Kuhn eben nicht auf ihren Vorläufern auf, sondern ersetzen sie vielmehr so restlos wie eine revolutionäre Regierung ein *ancien régime*.

Kuhns Frage nach der Struktur wissenschaftlicher Revolutionen hat das Paradox des wissenschaftlichen Fortschritts also noch einmal verschärft. Doch seither hat die Fülle der sich Kuhn anschließenden, ihn kritisierenden oder einfach nur ignorierenden Spezialstudien das Problem wieder unter sich begraben. Geblieben ist die kulturgeschichtliche Perspektive auf die Wissenschaft, die auf die meisten auch der jüngeren Wissenschaftshistoriker eine nachhaltige Faszination ausübt. Voller Eifer untersuchen sie das schier unendliche Spektrum von Wechselwirkungen zwischen der Wissenschaft und ihrem Kontext – wobei sie die leidige Frage nach dem wissenschaftlichen Fortschritt meist geflissentlich ausblenden. Diesen kulturwissenschaftlich bewegten Historikern steht eine andere, allerdings zusehends dahinschmelzende Gruppe gegenüber: Experten, die sich auf manchmal engstirnige Weise in die technischen Details wissenschaftlicher Arbeiten der Vergangenheit vertiefen und für die die Gretchenfrage nach dem Fortschritt in der Wissenschaft von vornherein beantwortet ist – und zwar völlig im Sinne traditioneller Fortschrittsgläubigkeit. Ohne Kritik und Vorbehalt begleiten sie die heutige Naturwissenschaft wie einst die Hofchronisten der Vergangenheit die Taten ihrer Herrscher.

Nun geht es aber beim Paradox des wissenschaftlichen Fortschritts um alles andere als um akademische Quisquilien, die nur Spezialisten interessieren müssen. Im Gegenteil: Das Problem wirft Fragen auf, mit denen jeder zu tun bekommt, der heute verantwortlich mit Wissenschaft, ihren Voraussetzungen und Folgen umgehen will: Insbesondere der Frage nach den Voraussetzungen für wissenschaftliche Innovationen muß sich jeder stellen, der darüber reden will, wie die Institutionen und Kommunikationsstrukturen der Wis-

senschaft beschaffen sein müssen, um mit Hilfe wissenschaftlichen Fortschritts die Menschheit für die drängenden Herausforderungen unserer Zeit zu wappnen. Und diese Frage nach der Gestaltbarkeit des wissenschaftlichen Fortschrittes hängt nun durchaus vom Blickwinkel ab.

Dem einzelnen Wissenschaftler, der als Zeitgenosse die Entwicklung seines Faches miterlebt, stellt sich diese als ein naturwüchsiger und letztlich nicht steuerbarer Prozeß dar, bei dem sich Wissen stetig vermehrt, während die neuen Erkenntnisse ständig komplexer werden, auch wenn es immer wieder zu Einsichten kommt, die Forschungsergebnisse zu Spezialfällen einer allgemeineren Betrachtung werden lassen. Der Fortschritt der Wissenschaften scheint für solch einen Beobachter in einer immer getreueren Annäherung der Modelle und Theorien an die Realität zu bestehen – um den Preis allerdings, daß Inhalte dieser Theorien immer schwerer nachzuvollziehen sind. Dem einzelnen bleibt aus dieser Perspektive wenig anderes übrig, als auf den wissenschaftlichen Fortschritt als eine Art *perpetuum mobile* der Moderne zu setzen – und sich mit der Unverständlichkeit seiner Resultate, erst recht aber seiner Wirkungsweise, abzufinden.

Aus einer historischen Perspektive stellt sich das Bild des wissenschaftlichen Fortschritts dagegen anders dar. Auch hier gibt es natürlich zunächst einmal die Möglichkeit, eine bestimmte Epoche aus der Perspektive eines jeweiligen Zeitgenossen zu betrachten, jetzt aber bereichert durch die Kenntnis von Wegen, die sich im nachhinein als Irrwege herausgestellt haben, und um einen Überblick über die Einbettung der Wissenschaft in gesellschaftliche Zusammenhänge, wie er ebenfalls nur im Rückblick möglich ist. So ergibt sich ein Bild von Wissenschaft als einem menschlichem Treiben wie jedes andere auch: voller Zufallsbegegnungen, Prioritätsgerangel, verfehlter Hoffnungen, Irrtümer, aber auch voller verrückter Ideen, die sich letztlich doch als genial herausstellen – Wissenschaft als ein weiterer Schauplatz menschlicher Größe und Fehlbarkeit.

Solche Historiengemälde sind gewiß faszinierend, aber sie erklären nichts. Die gesellschaftlichen Strukturen, in denen sich neues Wissen materialisiert, die Begriffe, zu denen man es ordnet, die Medien, durch die es dargestellt und verbreitet wird – das alles reduziert sich aus der Perspektive einer bloß erzählenden Geschichtsschreibung letztlich auf Staffage. Es verleiht dem Drama der Wissenschaft historisches Kolorit, bestenfalls macht es das Schicksal und das Handeln der Protagonisten etwas verständlicher. Doch auch, wenn der Pulverdampf über den Fronten vergangener Forscherhändel längst abgezogen und der Blick auf Bedingungen und Motive

wissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung freigelegt ist, muß bei solcher Betrachtung der verlassenen Kampfplätze nicht nur die Gestaltbarkeit, sondern auch die bloße Möglichkeit von Fortschritt ein Rätsel bleiben.

Fortschritt trotz Revolutionen?

Gibt es überhaupt eine Perspektive, aus der sich der Fortschritt der Wissenschaft mit der kontingenten historisch-menschlichen Natur seiner Entstehung versöhnen läßt? Eine solche Perspektive müßte ja auch erklären, warum wissenschaftliche Revolutionen fundamentale Kategorien unseres Weltverständnisses umstürzen, ohne daß der wissenschaftliche Erkenntnisprozeß anschließend jeweils von vorne beginnen müßte – sie müßte also letztlich erklären, warum solche Revolutionen überhaupt möglich sind.

Gerade die wissenschaftliche Revolution, die sich mit Einsteins Namen verbindet, bietet dafür ein herausragendes Beispiel. Denn sie betrifft so grundlegende Begriffe nicht nur des wissenschaftlichen, sondern auch des vorwissenschaftlichen Denkens wie Raum, Zeit und Materie. Die beiden großen Umbrüche im wissenschaftlichen Weltbild, die von seinen Arbeiten am Anfang des 20. Jahrhunderts ihren Ausgang nahmen – die Relativitäts- und die Quantenrevolution – haben unser Verständnis scheinbar so elementarer Begriffe wie Trägheit, Schwerkraft, Geschwindigkeit, ja sogar Gleichzeitigkeit, Kausalität, Abzählbarkeit oder Lokalisierbarkeit in einer für den Alltagsverstand nur schwer nachvollziehbaren Weise verändert. Darüber hinaus führten diese Umbrüche dazu, daß sich auch unsere Auffassung von der Welt als Ganzer radikal wandelte vom Bild eines unendlichen, statischen Kosmos zum Bild eines explosionsartig expandierenden Universums mit einem einzigen Ursprung.

Trotz dieses Einschnitts in unserem Weltverständnis ist die jahrhundertelange Vorarbeit, die dem heutigen wissenschaftlichen Weltbild zugrundeliegt, nicht einfach in den Wirren der Einsteinschen Revolution verlorengegangen. Die Entdeckungen eines Kopernikus, eines Galilei und eines Newton sind vielmehr in dieser Revolution zugleich widerlegt und bestätigt worden. Wie ist das möglich? Wie läßt sich die faktische Möglichkeit von Fortschritt mit der Tatsache wissenschaftlicher Revolutionen vereinbaren?

Das platonistische Selbstverständnis der Wissenschaftler

Natürlich ist eine Entwicklung denkbar, in der sich unser Wissen von der Welt allmählich an die Welt selber annähert, wenn auch mögli-

cherweise erst auf Umwegen. So stellt sich die Wissenschaftsgeschichte oft aus der Sicht eines heutigen Wissenschaftlers dar, der von seinem modernen Standpunkt aus die Bemühungen seiner Vorgänger dort als Fortschritt empfindet, wo sie auf ihn hinführen – und wo sie es nicht tun, als bedauerliche Irrwege. Aus diesem Blickwinkel erscheint etwa die aristotelische Physik als Irrweg, die Galileische Physik dagegen als eine Annäherung an die Newtonsche und diese wiederum als eine an die relativistische Physik Einsteins.

Die Annahme Galileo Galileis zum Beispiel, daß sich die Planeten auf Kreisbahnen um die Sonne bewegen, ist danach eine gute, allerdings verbesserungsbedürftige Vorwegnahme der Einsicht in die elliptische (aber immer noch annähernd kreisförmige) Gestalt der Planetenbahnen, wie sie zuerst Johannes Kepler formuliert und Newton dann mit Hilfe seines Gravitationsgesetzes abgeleitet hat. Einsteins Erklärung der kaum merklichen Drehung dieser Bahnellipsen mit Hilfe seines relativistischen Gravitationsgesetzes erscheint entsprechend als kleine Korrektur im Newtonschen Bild, nach dem diese Bahnen eigentlich eine stabile Lage im Raum haben müßten. Die Entdeckungen Galileis und Newtons sind nach dieser Auffassung vom wissenschaftlichen Fortschritt niemals als Ganze widerlegt worden, sondern haben sich, abgesehen von einigen mehr oder weniger großen Korrekturen, als Näherungsaussagen in der jeweils fortgeschritteneren Theorie erhalten.

Nach diesem Verständnis nähern sich die einzelnen Einsichten der Wissenschaft, die ja nicht nur auf einander aufbauen, sondern auch immer umfassender werden, letztlich einer Gesamtschau der Natur, die dann in einer Weltformel oder einer einheitlichen „Theorie für alles“ Ausdruck finden könnte. Selbst wenn viele Wissenschaftler daran zweifeln, ob eine solche universelle Theorie je formuliert werden wird, ohne danach immer noch weiter verbesserungswürdig zu sein, scheint sich der offensichtlich kumulative Charakter des wissenschaftlichen Fortschritts am besten durch die Vorstellung einer allmählichen Annäherung an ein wahres Abbild der Natur erklären zu lassen. Im Laufe der Philosophiegeschichte wurde diese Vorstellung auf vielfache Weise diskutiert. Ihren prägnantesten Ausdruck hat sie wohl in der Ideenlehre Platons gefunden. Sie bietet die vielleicht einfachste Erklärung für den Eindruck, daß unsere Erkenntnisprozesse scheinbar von ihrem noch unbekanntem – und vielleicht nie erreichbarem – Ziel her gesteuert werden. Denn nach Platon ist die Erkenntnis des Wahren nichts anderes als die Erinnerung an ursprüngliche Ideen, von der alle unsere konkreten Erfahrungen nur Schatten sind.

Diese Beziehung zwischen Ideenwelt und realer Welt hat Platon in seinem berühmten Höhlengleichnis beschrieben. Unsere reale Welt wird darin mit einer Höhle verglichen und die Sinneseindrücke, die wir von dieser Welt empfangen, mit bloßen Schattenbildern. Menschen, die ihr Leben lang nur diese Schattenbilder sehen, werden sie zwangsläufig für die wirklichen Dinge halten. Einmal aber aus dem Höhlendasein befreit, werden sie erkennen, daß sie bis dahin nichts anderes als einen blassen Abglanz der eigentlichen Wirklichkeit gesehen haben. Ebenso wird es uns gehen, wenn wir durch die Philosophie (und in späterer Lesart dann durch die Wissenschaft) denkend die Unzulänglichkeiten unserer Sinne überwinden und endlich die Welt der Ideen als eigentliche Wirklichkeit erkennen.

Nach dieser Vorstellung ist wissenschaftliche Erkenntnis Aufklärung. Sie ist Aufbruch aus dem Dunkeln ins Licht der Wahrheit, auch wenn sich diese Wahrheit nicht mit einem Schlag, sondern erst allmählich und vielleicht nie ganz enthüllen läßt. Sie, die Wahrheit, ist es, auf welche in dieser platonistischen Sicht alle unsere wissenschaftlichen Bemühungen hinauslaufen. Damit sind diese Bemühungen nicht als voneinander unabhängige, in ihren jeweiligen lokalen Kontexten befangene Unternehmungen zu sehen, sondern laufen auf einen gemeinsamen Fluchtpunkt zu. Wohl die meisten Wissenschaftler sind in diesem Sinne „spontane Platonisten“. Denn die Ideen, an denen sie sich abarbeiten, seien es mathematische wie Dreiecke oder Primzahlen, seien es physikalische wie Kraft oder Feld, erheben Anspruch auf überzeitliche, ja universale Gültigkeit. Es sind Ideen, die man sich unabhängig von der Geschichte denkt, die uns Menschen zu ihnen geführt hat, und die daher auch nicht-menschlicher Intelligenz erreichbar sein sollten. Man denke nur an den Vorschlag, mathematische Gesetze zur Kommunikation mit Außerirdischen heranzuziehen – eine Idee, die schon Carl Friedrich Gauß von Zeitgenossen zugeschrieben wurde und die zuletzt durch den Roman „Contact“ des amerikanischen Astronomen Carl Sagan populär wurde.

Wenn die Wissenschaft auch irdische Wurzeln haben mag, liegt ihr Erfolg aus platonistischer Sicht in ihrer Fähigkeit begründet, sich von diesen Wurzeln zu lösen, von den konkreten, wandelbaren Erscheinungen zu abstrahieren, um dahinter die allgemeinen, möglichst mathematisch formulierbaren Prinzipien zu suchen. Darin liegt auch ein Heilsversprechen für den einzelnen, der sich dieser Suche nach der „höheren Wahrheit“ verschrieben hat. Wissenschaft kann so zum Religionsersatz werden, zu einer Expertenreligion, deren Verheißungen sich allerdings meistens nur an wenige Auserwählte richten. Für Albert Einstein und für Max Planck etwa – aber

ebenso für viele andere herausragende Wissenschaftler – war das Forschen auch ein Weg, sich von den leidvollen Niederungen des „nur Menschlichen“ abzuwenden, um Trost und Lebensorientierung in der Erforschung einer ewigen Natur zu suchen. Wissenschaft kann auch zum Eskapismus werden.

Vom Platonismus zum Rationalismus

Nun scheint es so, als hänge die Geradlinigkeit des wissenschaftlichen Fortschrittes gerade mit einer Abwendung von den Unwägbarkeiten und Wechselfällen unseres Alltagslebens zusammen. Dies ist jedenfalls die feste Überzeugung einer langen philosophischen Tradition, die in kristallklaren Ideen, in unumstößlichen Prinzipien oder doch wenigstens in endgültigen Methoden den Garant des wissenschaftlichen Fortschritts gesehen hat. Nach Platon ist Immanuel Kant der wichtigste Hausheilige dieser Tradition. Auch er hat versucht, die scheinbar unangreifbare Sicherheit, die sich mit zumindest einigen Aussagen von Mathematik und Naturwissenschaft verbindet, damit zu begründen, daß diese sich eben nicht aus der Sinneserfahrung ableiten.

Denn Sinneserfahrung kann es ja nicht sein, die uns beispielsweise so sicher sein läßt, daß, wenn eine Strecke A größer ist als eine zweite Strecke B und diese größer als eine dritte C , daß dann auch A größer als C sein muß. Wenn dieser Schluß eine bloße Erfahrungstat- sache wäre, müßten wir jederzeit davon ausgehen, beim nächsten Vergleich dreier Strecken dadurch überrascht zu werden, daß die erste zwar immer noch größer als die zweite und die zweite größer als die dritte, diesmal aber die erste dennoch kleiner ist als die dritte. Kein vernünftiger Mensch rechnet ernsthaft mit dieser Möglichkeit – und erst recht kein Wissenschaftler. Aber woher kommt unsere Sicherheit darüber? Anders als Platon hat Kant den im Wortsinne übersinnlichen Ursprung solcher Sicherheit nicht in einer objektiven Ideenwelt angesiedelt, sondern im Erkenntnisvermögen des Menschen selbst. Demnach sind Schlüsse, wie eben geschilderte, in unserem Erkenntnisvermögen gewissermaßen vorprogrammiert, besitzen ihre Gültigkeit *a priori* – das heißt vor aller Erfahrung – und können durch diese auch niemals widerlegt werden.

Auf diese Weise meinte Kant auch, die sichere Grundlage des wissenschaftlichen Fortschritts geklärt zu haben. Denn alle noch zu gewinnende Erfahrung müßte sich ja zwangsläufig in die einmal gegebene Architektur unseres Wissensgebäudes einfügen. Kant versuchte deshalb, den Grundriß dieser Architektur, den er „metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft“ nannte, zu beschrei-

ben. Dieser Grundriß sollte, so Kant, allen späteren Entwicklungen der Naturforschung Orientierung verleihen, seinerseits aber von diesen Entwicklungen im wesentlichen unberührt bleiben. Denn er ließ sich ja aus Gesetzen vernünftigen Denkens herleiten, die vor aller Erfahrung gültig waren und insofern in der Tat von deren Unwägbarkeiten und Wechselfällen unabhängig sein mußten. Kant entwarf also eine Art Denkmaschine, für die unsere Erfahrungen nur noch empirisches Rohmaterial darstellen, welche dann mit Hilfe von Mechanismen, die ein für allemal durch das Getriebe der Maschine festgelegt sind, zu den Vernunfteseinsichten der Naturwissenschaft verarbeitet würden. Zu den unveränderlichen Bestandteilen dieser Denkmaschine rechnete Kant unter anderem ein bestimmtes Verständnis von Raum, Zeit, Materie und Kraft – also gerade jene Elementar-begriffe des wissenschaftlichen Denkens, die durch die mit Einsteins Namen verbundene Revolution fundamental verändert wurden.

Aber schon lange vor Einstein wurde durch den rasanten wissenschaftlichen Fortschritt selbst deutlich, daß sich sein robuster Charakter kaum durch die vorgeblich universelle Funktionsweise der Kantschen Denkmaschine erklären ließ. Denn dieser Fortschritt brachte ständig neue Begriffe hervor und stellte alte in Frage, so daß Kants universell gemeinter Grundriß im Rückblick als kaum mehr erscheint als ein philosophisch verbrämtes Abbild der Naturwissenschaft seiner Zeit. Nicht, daß es innerhalb der von Kant begründeten Tradition keine Möglichkeit gibt, auf die Herausforderung dieses Bildes durch die weitere Entwicklung der Naturwissenschaft zu reagieren. Denn die ursprünglich von ihm entworfene Maschine ließ sich ja jederzeit durch eine modernere ersetzen, in der nunmehr die jeweils aktuellen Begriffe der Naturwissenschaft einen Platz als vorgeblich universelle Funktionsmechanismen des Denkens einnehmen konnten. So wäre es möglich, den Bereich der Naturerkenntnis, der durch solche Mechanismen des reinen Denkens reguliert wird, auf einen kleinen Funktionskern, wie etwa die reine Logik, zu beschränken und alle übrigen Bestandteile des naturwissenschaftlichen Wissens für genuin empirisch zu halten.

Eine verwandte Möglichkeit besteht darin, daß man versucht, eine wissenschaftliche Methode zu identifizieren. Diese sollte sowohl den Erkenntnisfortschritt der Wissenschaften als auch die Gültigkeit ihrer Resultate garantieren. Derartige Versuche wurden seit der frühen Neuzeit unternommen, und praktisch alle teilen mit dem Kantschen Rationalismus die Annahme eines letztlich von Erfahrung nicht tangierbaren Kerns wissenschaftlicher Rationalität. Sie er-

strecken sich von den Regeln eines Descartes über den frühen Positivismus bis hin zur analytischen Philosophie unserer Tage.

Von der Sprengkraft der Wissenschaftsgeschichte

Das philosophische Projekt des wissenschaftlichen Rationalismus hat die Entwicklung der modernen Naturwissenschaften seit den Anfängen begleitet. Aber es ist gescheitert: Alle Versuche, Rationalität unabhängig von den spezifischen Inhalten zu legitimieren, liefen letztlich ins Leere. Alle vermeintlich metaphysischen Anfangsgründe oder methodischen Prinzipien erwiesen sich als abhängig vom jeweiligen Geist der Zeiten, die eine Logik der Forschung fand sich nicht. Dies ist ein Resultat der jüngeren Wissenschaftsgeschichte. Ursprünglich wohl wider ihre eigene Absicht, hat sie damit auch ihren Teil zur Unterminierung des Fortschrittsglaubens beigetragen. Damit droht sie nun aber auch, der wissenschaftlich zu legitimierenden Rationalität insgesamt den Boden zu entziehen. Die Wissenschaftsgeschichte gibt diese Not inzwischen zuweilen als Tugend aus und tritt damit in eine unheilige Allianz mit bestimmten philosophischen Strömungen, die dazu neigen, die Rationalität mit dem Rationalismus aufzugeben und damit das sprichwörtliche Kind mit dem Bade auszuschütten.

Die Sprengkraft der Wissenschaftsgeschichte in bezug auf philosophische Konstruktionen des wissenschaftlichen Fortschritts rührte ursprünglich nur daher, daß sie diesen idealisierten Gebilden den Spiegel gelebter Praxis vorhalten konnte. Schließlich hält kein Anspruch auf eine universelle wissenschaftliche Methode, und sei er von Titanen wie Newton oder Einstein erhoben, einem näheren Vergleich mit der historisch rekonstruierten Wirklichkeit der Forschung stand. Es ist deshalb auch kein Wunder, daß in der Praxis der Beurteilung von Wissenschaft, in der es gelegentlich ja nicht nur um die Unterscheidung von besserer und schlechterer Wissenschaft geht, sondern auch um die Unterscheidung der Wissenschaft von Pseudowissenschaft, dennoch keine allgemein brauchbaren Definitionen und Kriterien zur Hand sind. Bei der Evaluierung von Wissenschaft verläßt man sich ja in der Regel nicht auf mathematisch exakte Kriterien, sondern auf soziale Prozesse wie Begutachtungsverfahren durch Experten. Exzellente Wissenschaft wird dann einfach nur noch praktisch definiert als die Wissenschaft, die von exzellenten Experten als exzellent begutachtet wird – mit der Gefahr, daß sich Dogmen oder Gruppeninteressen durchsetzen, die den Gang der Wissenschaft willkürlich beeinflussen und ihren Fortschritt eher behindern als befördern.

Aber wie sollte man auch sonst verfahren? Der Philosophie der Wissenschaft ist es trotz jahrhundertelanger Bemühungen nicht gelungen, überzeugende, allgemeingültige Kriterien für die Annehmbarkeit wissenschaftlicher Theorien aufzustellen, die auch in der Praxis eingesetzt werden könnten. Man denke nur an die Schwächen des Positivismus – und sei es in der Spielart des Popperschen Falsifikationismus –, welche die jüngere Wissenschaftsgeschichte schonungslos offenlegte. Karl Popper forderte, eine wissenschaftliche Theorie dann aufzugeben, wenn ihre Voraussagen durch empirische Prüfung falsifiziert werden. Aber praktisch ist jede wissenschaftliche Theorie schon falsifiziert, noch bevor sie vollständig formuliert ist, denn es gibt immer eine Beobachtung oder ein Experiment, das ihr widerspricht. Und ist sie dann um so mehr falsifiziert, wird sie im Regelfall eher modifiziert als aufgegeben. Oder man denke an die so vernünftig klingende Maxime, derzufolge man zwischen empirischen Aussagen und theoretischen Schlußfolgerungen streng zu unterscheiden habe. Welche empirische Aussage aber läßt sich denn überhaupt formulieren, ohne damit sogleich auf ganze Netzwerke abstrakter und damit theoretischer Begriffe zurückzugreifen?

Die Ergebnisse der Wissenschaftsgeschichte aus den vergangenen Jahrzehnten geben Anlaß zur Skepsis gegenüber allen Ansätzen, die den Anspruch erheben, mit Hilfe überhistorischer, universeller Kriterien wissenschaftliches Wissen säuberlich von anderen Formen des Wissens oder auch nur von Irr- und Aberglauben unterscheiden zu können. Jeder geradlinige Pfad, den Philosophie und Wissenschaftstheorie durch den schier undurchdringlichen Dschungel gelebter Wissenschaft zu schlagen versuchen, droht der Wahrnehmung dieser Wirklichkeit Gewalt anzutun. Jede historische Fallstudie, die diese Wirklichkeit untersucht, um aus ihr verallgemeinerungsfähige Schlüsse über eine universelle wissenschaftliche Methode zu ziehen, ist deshalb von vornherein zum Scheitern verurteilt. Es ist diese Not, aus der die Wissenschaftsgeschichte seit Paul Feyerabend's anarchischem Manifest eine Tugend gemacht hat, indem sie das Scheitern selbst zum Erfolg und zur Befreiung vom Methodenzwang erklärt.

Vielleicht ist schon die Konstruktion eines kumulativen wissenschaftlichen Fortschritts, in dessen Verlauf ein Baustein der Erkenntnis auf den anderen geschichtet wird, in Wahrheit nur eine Inszenierung, die aus den Bruchstücken der historischen Überlieferung ein Gebäude nach jeweils modernem Verständnis und Geschmack errichtet, ähnlich wie es die Archäologen früherer Epochen taten. Dafür spricht jedenfalls der gewagte Begriff einer „rationalen Rekonstruktion“, mit dessen Hilfe sich die Wissenschaftstheorie die widerspenstige Geschichte gelegentlich gefügig zu machen sucht. Aber

lassen sich die Entdeckungen der Vergangenheit wirklich als schrittweise Annäherungen an das heutige naturwissenschaftliche Weltverständnis interpretieren und so in ein bruchloses Gesamtbild einordnen? Sind Galileis kreisförmige Planetenbahnen in diesem Sinne wirklich nur eine Annäherung an die Ellipsen Keplers? Ist schließlich Einsteins Physik einer gekrümmten Raumzeit wirklich nur eine kleinere Korrektur der klassischen Physik Newtons, die man berücksichtigen muß, wenn man sich entweder mit nahezu Lichtgeschwindigkeit in der Nähe großer Massen bewegt oder es einfach nur ganz genau nimmt?

Fremde Welten

Gründliche historische Untersuchungen sprechen dagegen. Annahmen über die Einordnung früherer Entdeckungen in ein heutiges Weltbild erweisen sich schnell als unzulässige Vereinfachungen, die davon ablenken, daß die Gedankenwelten eines Galilei oder Kepler von denen heutiger Naturwissenschaftler wesentlich verschieden waren. Für Galilei zum Beispiel waren die Planetenbahnen keineswegs das Ergebnis einer aus Trägheit und Fall zur Sonne hin zusammengesetzten Bewegung, wie sie in der klassischen Physik verstanden werden. Sie waren vielmehr Erscheinungsformen einer sogenannten „neutralen Bewegung“, die weder der natürlichen Tendenz jedes Körpers zum Mittelpunkt seiner Welt noch einem gewaltsamen Zwang unterlag, sich von diesem zu entfernen. Nur solche neutralen Bewegungen auf Kreisbahnen waren einem harmonischen Kosmos angemessen. In Galileis Begriffswelt war der Trägheitsbegriff der klassischen Physik unbekannt. Diese Welt war vielmehr von der aristotelischen Naturphilosophie geprägt, in der die Unterscheidung zwischen natürlichen und gewaltsamen Bewegung fundamental war und in die sich auch Galileis Begriff der neutralen Bewegung als eine Art Zwischenkategorie einordnen läßt. Keplers Analyse der Planetenbewegung dagegen orientierte sich einerseits an den genauen empirischen Daten, die er von Tycho Brahe übernommen hatte, andererseits aber an kosmologischen Ideen, die ihre Wurzeln ebenfalls in antiken Theorien eines harmonisch geordneten Kosmos hatten. Beispielsweise dachte Kepler die Anordnung der Planetenbahnen als durch regelmäßige platonische Körper bestimmt, eine Vorstellung, die auch von ihrem Charakter her nicht in das Bild der modernen Naturwissenschaft paßt.

Die Lehrbuchanekdoten, die so tun, als gebe es in der Wissenschaft eine bruchlose Kontinuität zwischen der Gegenwart und ihrer Geschichte, dienen ohne Zweifel vor allem der Selbstvergewisse-

rung derer, die sie erzählen. Sie verkörpern letztlich Gründungsmythen, wie sie aus religiösen und politischen Zusammenhängen wohl bekannt sind, und legitimieren die gegenwärtige Wissenschaft durch ihre Autorität und Vorbildfunktion. Was Romulus und Remus für die Gründung der Stadt Rom waren, sind Galilei und Kepler für die Entstehung der neuzeitlichen Naturwissenschaft. Wie der heilige Sebastian für das Christentum Blutzeuge einer höheren Wahrheit ist, so gelten Giordano Bruno und wiederum Galileo Galilei heute manchem als Märtyrer des wissenschaftlichen Glaubens. Und selbst wenn unser Glauben an die Autorität solcher Heroen im Zeitalter von Wissenschaftsskepsis und Ernüchterung geschwunden ist, kommt offenbar auch die heutige Wissenschaft ohne Berufung auf den Mythos Galilei, den Mythos Darwin oder den Mythos Einstein kaum aus und fügt ihnen sogar noch neue Mythen hinzu – etwa den, der sich mit dem Namen Stephen Hawking verbindet. Und wenn sich die jüngere, kulturhistorisch orientierte Wissenschaftsgeschichte in ihrer heute dominierenden Strömung diesen Mythen entgegenstellt, dann erscheint das wie ein Sakrileg und wird von führenden Naturwissenschaftlern wie Stephen Weinberg auch so empfunden.

Doch es nutzt nichts. Wissenschaftshistorische Studien aus jüngerer Zeit haben Galilei & Co. von den Podesten heruntergeholt, auf denen sie seit Jahrhunderten standen, und haben sie in ihre jeweiligen Welten und Zeiten zurückverwiesen – Galilei etwa in die Gesellschaft der Höflinge des Großherzogs der Toscana zu Florenz. Die Argumentationsstrategien, mit denen er sich dort gegen seine neuscholastischen Gegner durchzusetzen versuchte, erscheinen damit plötzlich in einem anderen Licht. Sie erweisen sich weniger als Anwendungsbeispiele der von Galilei angeblich etablierten wissenschaftlichen Methode, sondern vielmehr als Winkelzüge eines cleveren Emporkömmlings, der das höfische Machtgetriebe für seine Karriere geschickt zu nutzen verstand. Da viele der Angaben in seinen Schriften, insbesondere zur Präzision von angeblich durchgeführten Experimenten, sich bei näherem Hinsehen als übertrieben oder sogar als falsch erwiesen haben, nennt man ihn heute gelegentlich sogar einen Schwindler und stellt ihn in eine Reihe mit modernen Wissenschaftsfälschern. So schlägt Reverenz leicht in ihr Gegenteil und – auch wenn der Mythos von Galilei dem Fälscher nicht wahrer ist als der von Galilei dem Erfinder der naturwissenschaftlichen Methode.

Die Perspektive der Kulturgeschichte

Das Paradox des wissenschaftlichen Fortschritts scheint sich im Lichte solcher kulturgeschichtlichen Analysen wissenschaftlicher Ent-

wicklungen noch zu verschärfen. Während die Erweiterung der Wissenschaftsgeschichte zur Kulturgeschichte ursprünglich einmal den verengten Blick auf einen angeblich kontextfreien rationalen Kern der Wissenschaft von seinen Scheuklappen befreien sollte, hat diese Erweiterung längst dazu beigetragen, die Wissenschaft selbst zu diskreditieren. Und der Geist läßt sich kaum mehr in die Flasche zurückzwingen: Jede Fallstudie, die eine Persönlichkeit oder eine Entdeckung der Wissenschaftsgeschichte mit Blick auf ihre kulturellen, technischen und sozialen Kontexte genauer unter die Lupe nimmt, nährt unweigerlich nicht nur Zweifel an überlieferten Mythen, sondern auch an der Autorität der Wissenschaft selbst, die doch immer noch auf sie angewiesen zu sein scheint. Je feiner die Auflösung der Lupe, desto mehr kommt der pure Zufall und das Menschlich-Allzumenschliche zum Vorschein – und desto weniger läßt sich die Wissenschaft von ihrem Kontext trennen.

Und um so mehr aber die Wissenschaft mit ihrem Kontext in einer bestimmten historischen Situation verwoben erscheint, desto weniger sind unterschiedliche Episoden der Wissenschaftsgeschichte überhaupt noch miteinander vergleichbar. Anachronistisch, ja geradezu undenkbar erscheint es vor diesem Hintergrund, all die unvergleichbaren Episoden wieder zu einem umfassenden Panorama des Fortschritts zusammenzufügen. Wo sind die Haken und Ösen, um die Episoden miteinander zu verketteten? Wie könnte eine Einsicht aus der anderen folgen, wenn jede einer anderen Welt angehört? Was sollte etwa den Höfling Galilei mit heutigen Elementarteilchenphysikern verbinden, deren Untersuchungsgegenstände kulturhistorisch arbeitende Wissenschaftshistoriker als Kunstprodukte interpretiert haben, die mindestens ebenso sehr Spiegel der komplexen sozialen und technischen Organisation heutiger Wissenschaft sind wie Spiegel einer objektiven physikalischen Realität?

Man kann eben nicht so ohne weiteres davon ausgehen, daß es zu allen Zeiten das Gleiche bedeutete, Wissenschaftler zu sein. Tatsächlich läßt sich die Gleichartigkeit von Forschungsstilen und -ergebnissen in einer gegebenen historischen Epoche oft eher aus ähnlichen sozialen Bedingungen heraus erklären – zum Beispiel aus dem höfischen Patronagesystem in der frühen Neuzeit als aus der Gleichartigkeit der Forschungsmethode. In jener Zeit gab es Wissenschaft als Beruf noch nicht. Ebenso wie die Künstler mußten die Wissenschaftler um die Gunst eines Potentaten buhlen – und zwar nicht nur, um die Ressourcen für ihre Unternehmungen zu erhalten, sondern auch um ihre Resultate mit der nötigen Autorität auszustatten. Die Erlaubnis, ein Werk einem – möglichst hochrangigen – Fürsten zu widmen, hatte damals etwa die Bedeutung, die ein überstandenes Peer-Re-

view-Verfahren und eine anschließende Veröffentlichung in „Nature“ oder „Science“ für einen heutigen Wissenschaftler hat. Zeitgenössische Forscher wie Galilei, Tartaglia, Cardano, Descartes, Bacon und viele andere griffen daher zu ähnlichen rhetorischen Tricks, um ihre Überzeugungskraft zu steigern. Fast jeder von ihnen erhob den Anspruch, die Philosophie der Alten überwunden und eine neue Wissenschaft begründet zu haben, die unmittelbaren technischen Nutzen für Militär, Medizin und Ökonomie versprach. Wie gut einzelne dieser Äußerungen auch in eine Heroengeschichte der Wissenschaft passen mögen, etwa wenn sie von einem Galilei stammen, zusammengenommen lassen sie den jeweiligen Helden zum typischen Vertreter einer sozialen Gruppe schrumpfen.

Auch auf die Frage nach den Entstehungsbedingungen der Relativitätstheorie haben Wissenschaftshistoriker versucht, Antworten zu geben, in denen die Rolle des kulturellen, technischen oder sozialen Umfeldes im Mittelpunkt steht. Solche Antworten erscheinen um so plausibler, wenn es nicht nur um die singuläre Leistung Einsteins geht, sondern um bestimmte Einsichten, die sich etwa zeitgleich auch bei anderen Forschern eingestellt haben. So ist das Thema der Synchronisation von Uhren – das, wie wir noch sehen werden, eine Schlüsselrolle für die Entstehung der speziellen Relativitätstheorie im Jahre 1905 gespielt hat – sowohl in den Arbeiten des französischen Mathematikers Henri Poincaré als auch in denen Albert Einsteins zu finden. In der Tat war ja die Synchronisation von Uhren durch Signalübertragung ein unübersehbar wichtiger Aspekt der Globalisierung von Verkehr und Kommunikation um 1900, besonders wenn man wie Einstein in Bern am Patentamt oder wie Poincaré in Paris am Bureau des Longitudes seiner Arbeit nachging, an Orten also, die je in ihrer Weise eine wichtige Rolle für diese Entwicklung spielten. Warum sollte also das praktische Problem der Synchronisierung von Uhren einen Wissenschaftler dieser Zeit nicht auf eine neue Idee zu Raum und Zeit bringen, insbesondere wenn diese Idee ihm bei der Lösung seiner innerwissenschaftlichen Probleme hilfreich ist?

Natürlich verbinden sich mit Erklärungsansätzen dieser Art auch Probleme. Nicht nur, daß solchen Verknüpfungen zwischen wissenschaftlicher und gesellschaftlicher Praxis immer etwas Assoziatives anhaftet – sie erklären oft nicht das, was man auf den ersten Blick von ihnen erwarten würde. Warum sollte zum Beispiel das technisch-kulturelle Umfeld zur Aufgabe der klassischen Begriffe von Raum und Zeit führen? Schließlich sind die im Alltag zu beobachtenden Phänomene der Signalübertragung und Synchronisation von

Bahnhofsuhren allesamt durchaus noch mit jenen gewohnten Begriffen verträglich.

Andererseits: Wer wollte die Plausibilität von Erklärungen wissenschaftlicher Innovation aus Veränderungen des technischen und kulturellen Umfeldes bestreiten? Gerade die Einsteinsche Umwälzung unserer Begriffe von Raum und Zeit zeigt ja, daß es in Wirklichkeit keine absolute Grenze zwischen wissenschaftlichen Begriffen und unserem Alltagsdenken gibt. Denn die Begriffe von Raum und Zeit, die durch die Relativitätstheorie verändert wurden, waren nicht nur technische Konzepte der klassischen Physik im engeren Sinne, sondern schlossen auch intuitive, dem Alltagsdenken entsprungene Vorstellungen ein, zum Beispiel über die Bedeutung von Gleichzeitigkeit. Warum sollte es also deshalb nicht denkbar sein, daß auch die Veränderungen dieser Begriffe auf Vorbilder in einer sich durch technische Entwicklungen ständig verändernden Alltagswelt zurückgehen?

Die Perspektive der traditionellen Wissenschaftsgeschichte

Auch Begriffe haben ihre Entwicklungsgeschichte. Daß diese aber von etwas anderem als der Einsicht großer Geister gestaltet wurde, dieser Gedanke ist der traditionellen Geschichte der Naturwissenschaft einigermaßen fremd. Für sie ist der wissenschaftliche Fortschritt letztlich eine Art Staffellauf einzelner Titanen, die sich über die Abgründe der Zeit den Stab ihrer genialen Ideen weiterreichen. Die angemessenen Fragen der Historiker an eine als Erfolgschronik verstandene Geschichte der Wissenschaft sind dann auch die klassischen nach dem wer, was, wann und wo, Fragen also, wie sie einem eher als Spitzensport verstandenen Unternehmen angemessen sind. Das Problem, daß sich zwischenzeitlich immer wieder die Sportarten verändert haben, bleibt dabei unberücksichtigt. Wie soll man denn auch die Leistung des Aristoteles bewerten, der als erster die Regeln für die natürlichen Bewegungen schwerer und leichter Körper aufgestellt hat, wenn die zugrundeliegende Unterscheidung zwischen diesen nach seiner Theorie fundamental verschiedenen Arten von Körpern heute einfach nicht mehr gilt? Und wie zweifelhaft ist das Verdienst von Heinrich Hertz, als erster elektromagnetische Wellen in einem Äther nachgewiesen zu haben, dessen Existenz heute bestritten wird?

Fast zwangsläufig muß die traditionelle Wissenschaftsgeschichte damit die Unvereinbarkeit vergangener mit heutigen Weltvorstellungen verdrängen, was ihr allerdings um so leichter fällt, als sie es vom Ansatz immer nur mit einzelnen Persönlichkeiten zu tun hat,

die durch gelegentliche Irrtümer nur um so verehrungswürdiger erscheinen. Demgegenüber hat die neuere Wissenschaftsgeschichte die Abhängigkeit dieser Persönlichkeiten und ihrer Leistungen von bestimmten Kontexten betont und auch einige der sozialen Strukturen herausgearbeitet, über die solche Abhängigkeiten vermittelt sind. Sie hat damit die Tür zu einem Verständnis der Erzeugung wissenschaftlichen Wissens aufgestoßen, das dieses nicht so sehr als Summe einzelner Leistungen, sondern vielmehr als das Resultat eines kollektiven Prozesses begreift. Allerdings werden grundsätzliche methodische Konsequenzen aus dieser Einsicht oft nicht gezogen. Eine solche Konsequenz wäre es, Vorstellungen wie die über die aristotelische Unterscheidung natürlich schwerer und natürlich leichter Körper oder über die Beschaffenheit des Äthers als Teil eines umfassenden Wissenssystems aufzufassen, an dem einzelne Individuen und auch die traditionellen Heroen der Wissenschaftsgeschichte teilhaben. Statt dessen werden diese Individuen durch Kontextualisierung im Effekt oft auch als Personen relativiert.

Ohne es darauf abgesehen zu haben, trifft auch die kulturhistorische Wissenschaftsgeschichte damit eine in der Öffentlichkeit verbreitete Neigung. Denn der Mensch verehrt nicht nur gerne Helden, er stürzt sie gelegentlich auch mit Wonne vom Sockel. Zwar ist der kulturhistorische Ansatz nicht *per se* dazu geeignet, die geschichtsträchtige Rolle großer Einzelpersonlichkeiten grundsätzlich in Frage zu stellen, da er ja vor allem nur darauf zielt, diese Rolle im Rahmen historischer Kontexte zu beschreiben. Indem er aber große Wissenschaftler wie Galilei oder Einstein tief in ihr jeweiliges Umfeld eintunkt, passiert es regelmäßig, daß aus diesem dann Gegenfiguren auftauchen, die in der öffentlichen Wahrnehmung fast ein größeres Profil gewinnen als die ursprünglichen Helden. Ein Beispiel ist das Interesse an Galileis Tochter Maria Celeste, ein anderes die Spekulationen über einen möglichen Beitrag von Einsteins Freundin und späteren Frau Mileva Marić zur Entstehung der Relativitätstheorie. In beiden Fällen geht es um Kontexte eines überdimensionalen Heroen der Wissenschaftsgeschichte, die diesen ein Stück weit in den Umkreis unserer kleinen, vertrauten Menschenwelt zurückholen. Wieviel besser würden wir die Wissenschaft verstehen, wenn es sich am Ende doch herausstellen würde, daß auch ihre Antriebskräfte im wesentlichen nur Macht, Geld, Sex und Ruhm waren.

Ungeachtet solchermaßen verzerrter öffentlicher Wahrnehmungen bleibt dennoch festzuhalten, daß der kulturhistorische Ansatz uns heute in jedem Falle ein realistischeres Bild von der Genese der Wissenschaft bietet als die Heldengeschichten früherer Tage. Selbst wenn die Bedeutung sozialer Bedingungen für die Strukturierung

wissenschaftlicher Inhalte hier und da überschätzt wurde, haben die Arbeiten der vergangenen Jahrzehnte gründlich mit den altbackenen Vorstellungen aufgeräumt, die traditionellen Studien zur Wissenschaftsgeschichte meist unausgesprochen zugrundelagen.

Ihr Erbe allerdings wirkt noch immer nach – nicht selten als Belastung. Die Vorstellung, man könne Wissenschaftsgeschichte betreiben, ohne sich um eine komplexe Architektur des Wissens oder die nicht weniger komplexen Strukturen seiner sozialen Organisation zu kümmern, mag intellektuell obsolet sein, institutionell ist sie immer noch wirkmächtig. Früher schien es völlig ausreichend, Wissenschaftler im wesentlichen als Briefmarkensammler zu behandeln, die ihre Ideen wie einzelne Marken austauschen. Man konnte deshalb getrost ihre Schriften und Briefe zwischen zwei Buchdeckel klemmen, ergänzt um einige erläuternde Anmerkungen, die im besten Falle die Herkunft einzelner Ideen, meistens aber nur die der Dokumente selbst vermerken. Legionen von Editoren haben sich durch Gebirge von Dokumenten gewühlt, einzig um am Ende eine Spur von Fußnoten hinter sich zu lassen. Will ein Leser das hier begrabene Wissen wieder zum Leben erwecken, müßte er sich seinerseits entlang dieser Spur einen Weg durch die über Archive und Bibliotheken weit verstreuten Papiermassen bahnen. Statt die heutigen Möglichkeiten zu nutzen, solche verstreuten historischen Quellen im Internet frei verfügbar zu machen, sie miteinander zu vernetzen und zum Ausgangspunkt für die Bearbeitung systematischer Fragen zu machen, investieren Förderorganisationen, Universitätsverlage und Akademien immer noch Millionen in Herausgeber, die wenig herausgeben, und in Editionsprojekte, die mehr und mehr zu einem Flaschenhals der Forschung geworden sind.

Fortschritt und materielle Kultur

Indem sich traditionelle Editionen auf Quellengattungen wie Veröffentlichungen, Manuskripte oder Briefe beschränken, tendieren sie dazu, das Vorurteil zu perpetuieren, es gebe in der Wissenschaft eine einfache Arbeitsteilung zwischen Theorie und Empirie – wobei zwar die Empirie als Rohstofflieferant letztlich die Quelle aller Innovation sei, Theorie aber die Interpretationen dieses Materials und damit gewissermaßen die Quintessenz der Wissenschaft verkörpere. Da sich Interpretationen im Laufe der Geschichte bekanntlich wandeln, sind sie dieser Auffassung nach das eigentliche Thema der Wissenschaftsgeschichte – und die Texte, in denen sie formuliert sind, die Objekte, mit denen der Historiker sich vorrangig zu befassen habe. Erst die jüngere Wissenschaftsgeschichte hat dagegen nicht nur die sozialen

Bedingungen thematisiert, unter denen diese Texte entstanden, sondern auch die sogenannte materielle Kultur, also die Gesamtheit jener Arbeitsmittel und praktischen Kenntnisse, die jeder wissenschaftlichen Empirie vorausgeht und an der diese sich oft überhaupt erst entzündet.

Zusammen mit den sozialen Bedingungen prägt die jeweilige materielle Kultur auch die großräumigen Strukturen wissenschaftlicher Entwicklung einer Epoche. Die Mathematik als Erforschung von Operationen mit Symbolsystemen tritt historisch zum ersten Mal in frühen Hochkulturen auf den Plan, in denen solche Symbolsysteme einen bedeutenden Aspekt sozialer oder ökonomischer Steuerungsmechanismen darstellen. In der Tat spielen Symbolsysteme eine wichtige Rolle in den komplexen Verwaltungssystemen und gesellschaftlichen Ritualen der babylonischen, ägyptischen, chinesischen oder mesoamerikanischen Großreiche, in denen es deshalb Spezialisten gab, die sich mit den Regeln dieser Systeme auch jenseits unmittelbarer Anwendungszusammenhänge beschäftigt haben. Die Mechanik tritt in der klassischen Antike als Wissenschaft etwa gleichzeitig mit der Erfindung der ungleicharmigen Waage auf, deren Funktionieren durch das erste mechanische Gesetz, das Hebelgesetz, erklärt wird. Ein anderes Beispiel für eine materielle Kultur mit nachhaltigem Einfluß auf die Wissenschaftsgeschichte ist die Ballistik. Sie wird in der frühen Neuzeit zu einem der Schlüsselthemen der Dynamik, wie sie Galilei und andere begründet haben, und war gleichzeitig ein zentrales Thema der Kriegsführung in der politisch zersplitterten Landschaft Europas. Die Chemie als Wissenschaft entwickelte sich ebenfalls in enger Beziehung mit den praktischen Belangen der Neuzeit auf Gebieten wie dem der Metallurgie. Ebenso nahe liegt die Beziehung zwischen der Entstehung der Thermodynamik und der Durchsetzung der Dampfmaschinenteknologie sowie zwischen Elektrodynamik und Elektrotechnologie im 19. Jahrhundert.

Solche erstaunlichen Parallelitäten suggerieren einfache kausale Beziehungen zwischen wissenschaftlichen Entwicklungen einerseits und gesellschaftlichen Entwicklungen andererseits. Ist Wissenschaft also eine Antwort auf jeweils zentrale ökonomische Bedürfnisse? Haben etwa die Ägypter deshalb die Geometrie erfunden, um das Problem der Aufteilung ihrer Felder nach deren regelmäßiger Überschwemmung durch den Nil in den Griff zu bekommen? Wenn Wissenschaft wirklich so gezielt von unseren menschlichen Bedürfnissen gesteuert würde, so sollte man im Prinzip jederzeit im besonderen diejenige Wissenschaft fördern, die Lösungen für die gerade drängendsten Probleme bereithält – heute also etwa Seuchen- und

Krebsbekämpfung, Energieversorgung oder die Abwehr einer drohenden Klimakatastrophe. Und tatsächlich erfreuen sich Forschungszweige, die sich derlei auf die Fahnen geschrieben haben, heute der besonderen Aufmerksamkeit von Politik und Öffentlichkeit. Doch leider ist die Kausalbeziehung zwischen gesellschaftlichem Interesse und Erkenntnisfortschritt nicht immer so direkt, wie Forschungspolitiker es gerne hätten oder es dem Steuerzahler weismachen möchten. Aber auch, wenn gezieltes wissenschaftliches Engagement seinen Förderzweck verfehlt, so beflügelt es zuweilen den Erkenntnisfortschritt ganz anderer Gebiete. Das zeigen etwa die vergeblichen Versuche in den USA nach dem Zweiten Weltkrieg, durch großzügige Finanzierung von Antigravitationsforschung endgültig das Problem lösen zu wollen, wie man die Schwerkraft aufheben könne, deren fatale Wirkungen doch so viele Menschen das Leben gekostet hat. Es war vergeblich – aber immerhin haben diese Förderungsmaßnahmen dazu beigetragen, die Erforschung der allgemeinen Relativitätstheorie in den 1950er Jahren erheblich voranzubringen.

Fortschritt und Zeitgeist

Der Vorstellung eines in der materiellen Kultur begründeten Determinismus der Wissenschaftsentwicklung steht die Vorstellung einer gemeinsamen großräumigen Entwicklung von Wissenschaft und geistiger Kultur gegenüber. Nach dieser Vorstellung wird die Wissenschaft nicht strikt kausal von ihrer sozioökonomischen Umwelt bestimmt, sondern steht als mehr oder weniger autonomes Teilsystem mit ihren mehr oder weniger günstigen äußeren Entwicklungsbedingungen lediglich in Wechselwirkung.

Im Kern trifft sich ein solcher Ansatz mit der traditionellen Geistes- und Ideengeschichte – und oft auch mit ihrer modernen Fortsetzung im Rahmen einer Kulturgeschichte der Wissenschaften. Aus der Perspektive eines solchen Ansatzes erscheint es dann nur natürlich, daß die Wissenschaft im Sinne eines überprüfbaren, sich auf diesseitige Erklärungen beschränkenden Naturverständnisses im freiheitlichen Klima griechischer Stadtstaaten mit ihrer Diskussionskultur eine erste Blüte erlebte. Ebenso natürlich erscheint, daß sich die von der religiösen Weltsicht dominierte Welt des europäischen Mittelalters seit dem 13. Jahrhundert der aristotelischen Universalphilosophie verschieb und diese erst in der Renaissance und in der frühen Neuzeit aufgab, als die Kultur in Europa weltlicher, die Städte unabhängiger und das Bürgertum einflußreicher geworden waren. Es erscheint sogar durchaus denkbar, daß sich die Verbindung

zwischen Wissenschaft und Zeitgeist noch enger knüpfen läßt. Könnte die prominente Rolle atomistischer Naturphilosophie in der frühen Neuzeit, wie sie etwa bei Galileo Galilei, bei Pierre Gassendi oder bei Isaac Newton zu finden ist, nicht mit den ebenso dominanten Versuchen zeitgenössischer Sozialphilosophen wie Thomas Hobbes zusammenhängen, die Gesellschaft aus den Eigenschaften des einzelnen Individuums zu erklären? Auch in der weiteren geistesgeschichtlichen Entwicklung scheint es ja, als wären der Begriff des Atoms und der des Individuums so eng miteinander verbunden, daß beide entweder zusammen triumphieren oder zusammen untergehen müßten. Und war es etwa wirklich Zufall, daß das Zeitalter der Atomzertrümmerung durch eine Krise des klassischen Begriffs vom autonomen Individuum eingeläutet wurde, wie sie in der Kunst des frühen 20. Jahrhunderts, aber auch in den Lehren Sigmund Freuds zum Ausdruck kommt?

Allerdings, im einzelnen sind solche Verbindungen kaum nachzuweisen. Denn darin unterscheidet sich der Zeitgeist, wenn es ihn denn überhaupt geben sollte, sicherlich vom heiligen Geist, daß er sich wohl kaum ohne die Vermittlung von Rezeptions- und Kommunikationsprozessen ausbreiten kann. Wie genau aber hat die griechische Polisdemokratie die antike Wissenschaft befördert? Und wie ist es dem christlichen Denken seit der Hochscholastik gelungen, Philosophen, aber auch ungelehrte Zeitgenossen über Jahrhunderte hinweg von der Plausibilität aristotelischer Naturphilosophie zu überzeugen? Und wie konnte in der Neuzeit der Individualismus der politischen Philosophie Einfluß auf die Akzeptanz des Atomismus in der Naturtheorie gewinnen? Und selbst, wenn Otto Hahn begeistert Freud gelesen hätte und dadurch zur Idee mit der Kernspaltung gebracht worden wäre – so wäre dieser Einfluß doch nicht von dem zu unterscheiden, den etwa der Gebrauch eines Nußknackers auf Hahns Entdeckung hätte haben können. Erfolg und Ideen haben meistens viele Väter, und Vokabeln wie „beeinflussen“, „anregen“, „aufnehmen“, wie sie in der Ideengeschichte geläufig sind, sind kaum dazu geeignet, der unterschiedlichen Rolle von mehr oder weniger zufälliger Randbedingungen und systematischen Faktoren in der Entstehung wissenschaftlicher Ideen Rechnung zu tragen. Ohne eine solche Differenzierung aber müssen alle Versuche, die Entwicklung des wissenschaftlichen Wissens als Teil einer umfassenden Kulturgeschichte zu interpretieren, ebenso wolkig bleiben wie der Zeitgeist, auf den sie immer wieder zurückgreifen müssen, wenn Indizien für konkrete Vermittlungsprozesse fehlen.

Dimensionen des Wissens

Die Entwicklung der Wissenschaft verläuft also weder völlig autonom noch wird sie ganz von ihrer jeweiligen kulturellen und sozio-ökonomischen Umwelt determiniert. Vielmehr steht sie mit dieser Umwelt in einer Wechselbeziehung. Doch in welchen historisch faßbaren Indizien erschließt sie sich uns? Das hängt davon ab, welche Dimensionen des Wissens für diese Wechselwirkung eine Rolle spielen. Solange man – wie in der traditionellen Wissenschaftsgeschichte – überwiegend philologisch vorgeht und vor allem Referenzbeziehung zwischen Texten analysiert, besteht insbesondere wenig Hoffnung, der erwähnten materiellen Kultur, also etwa dem „Einfluß“ technologischer Entwicklungen auf die Wissenschaftsentwicklung, habhaft zu werden.

Denn hierbei kann es kaum primär um die Frage gehen, ob ein Wissenschaftler durch die Lektüre eines bestimmten Textes zu neuen Ideen kommt. So dürften zum Beispiel die großen Ingenieurleistungen der Renaissance die Grundlage für die sich an sie anschließende Wissenschaftsentwicklung der frühen Neuzeit geliefert haben. Galilei selbst hebt diese Rolle in seinem abschließenden Werk zur Mechanik hervor, das er mit einem Gespräch über die Erfahrungen der Handwerker und Ingenieure im berühmten Arsenal von Venedig beginnen läßt. Wenn man diese Passage aber nicht nur als einen literarischen Topos sieht oder als Hommage an die Spitzentechnologie seiner Zeit, dann muß man sich fragen, in welcher Form das Erfahrungswissen dieser Praktiker denn Eingang in die zeitgenössische Mechanik gefunden hat, in welchem Verhältnis es insbesondere zu dem überlieferten theoretischen Wissen der Antike stand und welche Rolle es bei der Transformation der antiken Mechanik in die Dynamik der Neuzeit spielte. Das traditionelle philologische Handwerkszeug der Wissenschaftsgeschichte kann allein solche Fragen nicht beantworten, zumal das Praktikerwissen der frühen Neuzeit kaum textlich, eher schon in den Zeichnungen wie in den Manuskripten Leonardo da Vincis, überliefert ist.

Die bisherige Diskussion hat bereits eine ganze Reihe von Dimensionen des Wissens angesprochen, die in einer Wissenschaftsgeschichte Berücksichtigung finden müssen, wenn man eine einseitige Verkürzung dieser Geschichte vermeiden und die Möglichkeit von Fortschritt begreifen will. Dazu gehört der kumulative Charakter der Wissenschaft und ihre Abhängigkeit von gesellschaftlichen Bedingungen. Diese Bedingungen können die institutionelle Organisation von Wissensproduktion und -transmission betreffen, aber auch die Medien, in denen Wissen repräsentiert wird, ebenso wie das techni-

sche und kulturelle Umfeld. Zu den Charakteristika der Wissenschaftsentwicklung gehört ferner das gelegentliche Auftreten fundamentaler Umbrüche, also wissenschaftlicher Revolutionen. Vor dem Hintergrund dieser Tatsache kann man das kumulative Wachstum wissenschaftlichen Wissens nicht einfach als sich ständig erweiternden Ausbau eines einmal gegebenen Theoriegebäudes auf festem Fundament interpretieren. Dieses Wachstum ist vielmehr mit immer neuen Umgestaltungen der Architektur des Wissens verbunden.

Diese Architektur des wissenschaftlichen Wissens wiederum besitzt offenbar eine komplizierte Struktur. Jedenfalls besteht sie nicht nur aus Theorien und empirischen Daten. Darüber hinaus hängt das wissenschaftliche Wissen ganz offensichtlich mit anderen Wissensbereichen zusammen, und zwar nicht nur mit dem Wissen, das in anderen Theorien, wie etwa denen der Philosophie gespeichert ist, sondern zum Beispiel auch mit dem praktischen Wissen von Handwerkern. Teilaspekte des wissenschaftlichen Wissens erscheinen, jedenfalls über mittlere historische Distanzen, fast immun gegen empirische Überprüfung, eine Tatsache, die immer wieder Anlaß gegeben hat, über *a priori*, das heißt vor aller Erfahrung liegende Wissensstrukturen, zu spekulieren. Wir hatten darüber hinaus festgestellt, daß die Wissenschaftsentwicklung eine großräumige Struktur besitzt, die zumindest indirekt mit langfristigen gesellschaftlichen und insbesondere technischen Entwicklungen zusammenhängt. In jedem Falle weist die Existenz solcher großräumigen Strukturen auf eine Dimension von Wissen hin, die von vornherein eine gesellschaftliche sein muß. Das immer wieder zu beobachtende Phänomen etwa gleichzeitiger, voneinander weitgehend unabhängiger Entdeckungen sowohl im Bereich der Technik als auch im Bereich der Wissenschaft kann kaum ein Zufall sein, sondern ist nur als eine Auswirkung dieser Dimension zu verstehen.

Die Frage, ob es überhaupt eine Perspektive gibt, aus der sich der Fortschrittscharakter der Wissenschaft mit ihrer kontingenten, von historischen Randbedingungen geprägten Entwicklung ohne Paradoxien verbinden läßt, wird sich nur unter Berücksichtigung aller genannten Dimensionen befriedigend beantworten lassen.

Fortschritt und Entwicklung

Entscheidend ist in diesem Zusammenhang eine Klärung des Begriffs „Entwicklung“. Gesucht ist ein Entwicklungsbegriff, der eine prinzipielle Vereinbarkeit der Rolle von Kontingenz und Willkür bei der Entstehung von Wissen einerseits und wachsender Leistungsfähigkeit des angehäuften Wissens andererseits zuläßt. Die geläufigen

Begriffe von Entwicklung, die in der Wissenschaftsgeschichte Anwendung finden, betonen im allgemeinen das eine Moment auf Kosten des anderen. Wenn Naturwissenschaftler die Geschichte ihres Faches erforschen, neigen sie meistens dazu, diese von ihrem Ende her zu konstruieren, so, als wäre dieses Ende von vornherein das Ziel der wissenschaftlichen Entwicklung gewesen. Sie schreiben damit explizit oder implizit der wissenschaftlichen Entwicklung einen notwendigen, zwangsläufigen Charakter zu, der bestenfalls für beschleunigende oder retardierende Einflüsse Raum läßt.

Wenn andererseits Historiker die Geschichte der Wissenschaft in verschiedene kulturelle und gesellschaftliche Kontexte einordnen, behaupten sie zugleich – mehr oder weniger explizit – deren wesentliche Abhängigkeit von einer Vielzahl von Faktoren, die für die Wissenschaftsentwicklung selbst nur Zufallscharakter haben können. Im Extremfall wird damit die Wissenschaftsentwicklung zum Ergebnis ihrer „ökologischen“ Randbedingungen erklärt. Nach dem zuerst beschriebenen Entwicklungsbegriff gibt also die Natur der Entwicklung der Wissenschaftsgeschichte eine von vornherein festgelegte Richtung. Nach der zweiten ist es dagegen die Kultur, die diese Geschichte in einer allerdings ziellosen Weise vorantreibt und wissenschaftliche Innovation letztlich zu einer Begleiterscheinung ihrer Zeitumstände macht.

Beide Entwicklungsbegriffe, der Begriff eines teleologischen, also vom Ziel her determinierten, Fortschritts sowie der Begriff einer kontingenten Innovation, sind auch aus anderen Bereichen historischer Entwicklung wohlbekannt. Darüber hinaus wurden natürlich innerhalb und außerhalb der Wissenschaft noch weitere Entwicklungsbegriffe erprobt. Ein Beispiel ist die Vorstellung von einer von ihren Ausgangsbedingungen her ein für allemal festgelegten Entwicklung. Ein anderes Beispiel ist die Vorstellung von einer Entwicklung, die letztlich von einer höheren Macht bestimmt ist, einer Vorstellung, wie sie in religiösen Heilsgeschichten, aber auch in traditionellen Auffassungen über Erziehung zu finden ist. Immer wieder hat man versucht, philosophische, psychologische, gesellschaftliche und ökonomische Entwicklungen, die biologische Evolution und selbst die Geschichte unseres Planetensystems oder des ganzen Kosmos mit Hilfe solcher Entwicklungsbegriffe zu interpretieren, mit mehr oder minder großem Erfolg. Die Namen von Hegel, Marx, Lamarck, Darwin, Kant, Laplace und Piaget stehen für solche Versuche.

Nach der bisherigen Diskussion schließt ein befriedigendes Verständnis des wissenschaftlichen Fortschritts einige der simpleren Entwicklungsvorstellungen von vornherein aus. Dazu gehört die Vorstellung einer allein von ihren Ausgangsbedingungen oder einer

allein von ihrem Ziel her determinierten Entwicklung. Denn es ist zu offensichtlich, daß die Rolle mehr oder weniger kontingenter, jedenfalls äußerer Randbedingungen auf den Entwicklungsprozeß der Wissenschaft sich nicht auf lediglich hemmenden oder beschleunigenden Einfluß beschränkt. Ebenso wenig sinnvoll erscheint die Interpretation der Wissenschaftsgeschichte als eines im wesentlichen von außen geprägten Prozesses. Ein solches Interpretationsmuster mag für lokale Parallelitäten zwischen Wissenschaftsentwicklung und kultureller Entwicklung plausibel sein. Den nachhaltigen Charakter wissenschaftlicher Errungenschaften unabhängig von der Fortwirkung ihrer oft einmaligen Entstehungsbedingungen kann es aber schwerlich erklären. So mögen einige noch heute gültige Argumentationsmuster wissenschaftlichen Beweisens unter den spezifischen Bedingungen der griechischen Polis entstanden sein. Daß sie aber heute immer noch als wirksam angesehen werden, läßt sich wohl kaum aus irgendwelchen, seit der Antike unveränderten gesellschaftlichen Rahmenbedingungen erklären.

Vergleicht man die verschiedenen Entwicklungsbegriffe und prüft, was sie in verschiedenen Bereichen zu leisten vermögen, so ergibt sich eine kleine Anzahl von Minimalanforderungen, denen ein Entwicklungsbegriff für die Wissenschaftsgeschichte genügen muß, wenn er die diskutierten Defizite vermeiden will: Erstens sollte so ein Begriff das Subjekt der Entwicklung weder auf die äußeren Bedingungen seiner Entwicklung reduzieren noch voraussetzen, daß dieses Subjekt davon völlig autonom ist. Der Entwicklungsbegriff muß zweitens den langfristigen und kumulativen Charakter der Wissensvermehrung erklärbar machen. Um der Tatsache unvorhersehbarer wissenschaftlicher Innovationen Rechnung zu tragen, muß er – drittens – jene Kontingenz berücksichtigen, die dafür verantwortlich ist, daß sich mit jedem Entwicklungsschritt reichere Möglichkeiten auf tun. Nur so wird schließlich Innovation im eigentlichen Sinne denkbar – und nicht nur als die Entfaltung von bereits im Ursprung angelegten Möglichkeiten.

Der Entwicklungsbegriff sollte deshalb prinzipiell die Möglichkeit alternativer Entwicklungspfade zulassen, auch wenn Pfade, die vom Hauptstrang der Entwicklung abweichen, in der Wirklichkeit der Wissenschaftsgeschichte immer nur über kürzere historische Distanzen beschränkt wurden. Die Dominanz eines Hauptstrangs der Entwicklung, wie er durch die Globalisierung westlicher Wissenschaft repräsentiert wird, weist ferner auf eine Eigenschaft der Wissenschaftsentwicklung hin, die für historische Entwicklungsprozesse generell charakteristisch ist. Diese Eigenschaft besteht darin, daß zufällige Randbedingungen sich zuweilen in nicht mehr hintergehbare

Entwicklungsvoraussetzungen transformieren. So war etwa der Einschlag eines zehn Kilometer großen Meteoriten auf Yucatán vor 65 Millionen Jahren ein zunächst rein äußeres Ereignis, das in keiner Weise mit der vorausgegangenen Erdgeschichte zu tun hatte. Aber durch das dabei verursachte Massensterben, insbesondere das Verschwinden der Dinosaurier, wurde der Meteoriteneinschlag für alle weitere Entwicklung des Lebens zu einer nicht mehr wegzudenkenden und andere Entwicklungspfade definitiv ausschließenden Voraussetzung. Ebenso wenig wie für die biologische Evolution ist es denkbar, daß eine alternative Entwicklung der Wissenschaft heute noch einmal dort ansetzt, wo sie vor Jahrtausenden abbrach, wie es etwa der chinesischen Wissenschaft erging, als der Qin-Kaiser bestimmte philosophische Schulen unterdrücken und ihre Schriften verbrennen ließ. Die Frage, was aus ihren Ideen noch hätte werden können, ist heute ebenso müßig wie die, ob die Nachkommen der Dinosaurier mit Messer und Gabel oder mit Stäbchen speisen würden.

Solche Analogien zwischen wissenschaftlicher und evolutionsbiologischer Entwicklung haben etwas Verführerisches, und groß ist die Versuchung, aus oberflächlichen Parallelen auf kausale Zusammenhänge zu schließen. Doch wer nie die vielen Zwischenstufen bedacht hat, die das von Zehntausenden von Jahren Kulturgeschichte geprägte Denken innerhalb und außerhalb der Wissenschaft von seinen biologischen Grundlagen trennen, gerät in die Gefahr spekulativer Kurzschlüsse – etwa den, daß sich die wesentlichen Strukturen dieses Denkens direkt aus der biologischen Evolution ableiten lassen könnten. Solch evolutionäre Erkenntnistheorien übersehen in der Regel, daß auch scheinbar intuitive Erkenntnisleistungen wie Orientierung im Raum oder heuristische Strategien zur Lösung praktischer Probleme durchaus Kulturleistungen sein können, die sich unter verschiedenen Randbedingungen wie Sprache oder Umwelt unterschiedlich entwickelt haben können. Ohne die Grundlage kulturell und historisch vergleichender Studien sind Rückschlüsse von heute zu beobachtenden gedanklichen Leistungen auf ihre biologischen Wurzeln jedenfalls wenig überzeugend.

Die Antwort auf die Frage, in welchem Sinne die Geschichte der Wissenschaft als eine Fortschrittsgeschichte zu begreifen ist, kann also keineswegs aus der Biologie kommen. Das heißt nicht, daß der eine oder andere Blick auf die biologische Evolutionstheorie nicht nützlich wäre. Dort könnte eine theoretisch fundierte Geschichte des Wissens zum Beispiel etwas über die Maßstäbe und Kriterien für einen angemessenen Entwicklungsbegriff lernen, denn eine Evolutionstheorie des Wissens, wenn sie denn überhaupt formulierbar ist, wird wohl kaum weniger komplex sein als die Implikationen des

Darwischen Ideengebäudes. Gegenstand einer solchen historischen Theorie ist aber nur das menschliche Wissen selbst, verstanden als ein zunächst nicht weiter reduzierbares Moment der historischen Entwicklung der Menschheit insgesamt. Dieses Wissen hat sich seit den Anfängen der menschlichen Geschichte in einem weit verzweigten, aber letztlich doch zusammenhängenden Prozeß entwickelt, ebenso wie sich das Leben auf der Erde trotz seiner schier unendlichen Vielfalt in einem zusammenhängenden planetaren Prozeß entfaltet hat. Aus dieser Perspektive ist die Wissenschaft Teil des Menschheitswissens – ähnlich wie die Gattung Homo ein abgrenzbarer, historisch spezifischer Teil der irdischen Biosphäre ist.

Materielle Mittel

Ein Teilaspekt der Wissensentwicklung – allerdings ein entscheidender – ist die Weitergabe von Kenntnissen über Herstellung und Gebrauch von Werkzeugen und anderer materieller Mittel. Solches Wissen konnte immer nur als ein gesellschaftliches Wissen überliefert werden. Bei aller heute noch sichtbaren individuellen Verschiedenheit einzelner Faustkeile ist ihre historische Rolle keine Frage der Geschichte großer Handwerkerpersönlichkeiten. Die langfristige Geschichte des Wissens ist eben eine Geschichte von Wissenssystemen, in denen es einerseits lange Perioden grundsätzlicher Stabilität und andererseits tiefgreifende Umwälzungen gab, Umwälzungen, die an den materiellen Repräsentanten des überlieferten Wissens, wie zum Beispiel am Übergang von Stein- zu Bronzewerkzeugen, ablesbar sind.

Werkzeuge sind andererseits mehr als ein Indiz für Kontinuität und Epochenschwellen im historischen Prozeß. Wenn wir noch einmal auf die Analogie zwischen der Kulturentwicklung der Menschheit und der Entwicklung des Lebens zurückgreifen, dann entspricht die Tradierung materieller Kultur einem Vererbungsprozeß, ohne den Kontinuität nicht denkbar ist. Wenn nicht jede Generation mit dem Aufbau von Gesellschaft und Zivilisation von vorne beginnen muß, ist dies vor allem der Tradierung der materiellen Kultur und des Wissens zu ihrem Gebrauch geschuldet. Diese Tradierung schließt natürlich die Mühen der Aneignung des Überlieferten mit ein, und diese umfassen ein breites Spektrum gesellschaftlicher Aktivitäten – von der Erziehung, über die Teilnahme an Arbeitsprozessen bis zur Schul- und Hochschulausbildung. Es gehört zum Wesen solcher Aneignungsprozesse, daß in ihrem Verlauf auch Innovationen möglich werden – und dieses Innovationspotential ist bereits im materiellen Charakter des von Generation zu Generation weitergegebenen Bestandes von Werkzeugen enthalten.

Denn der Horizont der möglichen Anwendungen eines Werkzeuges ist stets umfassender als der spezifische Zweck, zu dem es ursprünglich erfunden wurde. Eine Erkundung dieses Horizontes kann deshalb dazu führen, daß überraschende neue Anwendungsmöglichkeiten eines Werkzeuges entdeckt werden, an die der ursprüngliche Erfinder noch gar nicht gedacht hatte. Thomas Alva Edison beispielsweise hatte seinen Phonographen ursprünglich entwickelt, um damit flüchtige Gespräche aufzuzeichnen und somit ein Defizit des Telefons gegenüber der Kommunikation durch Briefe zu beheben. Erst später hat sich die Aufzeichnung von Musik als die durchschlagende Anwendung, als die „killer application“, seines Geräts erwiesen.

Die Tatsache, daß das Mittel oft allgemeiner ist als sein Zweck, hat Hegel als die „List der Vernunft“ bezeichnet und darin einen zentralen Mechanismus menschlicher Entwicklung gesehen. Andere Aspekte dieser List sind natürlich ebensowichtig für die Möglichkeit zivilisatorischen Fortschritts. Dazu gehört insbesondere, daß das Wissen, das zur Erfindung eines Werkzeuges notwendig ist, verschieden ist von jenem, das für seine Produktion erforderlich ist, und erst recht von dem Wissen, das man für seinen Gebrauch einsetzen muß. Ohne diese Verschiedenheit müßte jeder Fernsehzuschauer etwas von Halbleitertechnologie verstehen und jeder Elektroniker, der einen Transistor verwenden möchte, etwas von Quantentheorie. Fortschritt wird eben auch dadurch möglich, daß in Werkzeugen Wissen steckt, das nicht bei jeder Anwendung von neuem reproduziert werden muß, sondern implizit mitgeliefert wird.

In der Überlieferung von Werkzeugen oder anderen Manifestationen der materiellen Kultur einer Gesellschaft sind Tradition und Innovation, die Grundkomponenten langfristigen Fortschritts, eng miteinander verbunden. Fortschritt ist damit im Prinzip in jeder menschlichen Kulturentwicklung angelegt. Inwieweit diese Möglichkeit aber realisiert wird, hängt auch von äußeren Bedingungen ab. Diese können die Menschen nicht nur zur Erkundung des in Werkzeugen schlummernden Innovationspotentials ermutigen, sondern solche Erkundung auch bremsen, oder Traditionen unterbrechen und damit sogar den Erhalt einmal erworbenen Wissens über den Wechsel der Generationen hinweg unmöglich machen. Für solche Unterbrechungen gibt es in der Geschichte zahlreiche Beispiele, vom Untergang des Römischen Reiches bis zum Holocaust.

Eine historische Definition von Wissenschaft

Wissenschaft nimmt in unterschiedlichen kulturellen und historischen Kontexten völlig verschiedene Gestalten an. Immer bleibt aber die Erkundung des in der jeweiligen materiellen Kultur verkörperten Innovationspotentials der grundlegende Wesenszug dieser besonderen Form menschlichen Wissenserwerbs. Insofern könnte man Wissenschaft gerade als diese Erkundung definieren. Es wäre eine genuin historische Definition von Wissenschaft, vor dessen Hintergrund ihr bemerkenswerter Doppelcharakter verständlicher würde, der zu den bereits diskutierten konträren Interpretationen Anlaß gegeben hat: Wissenschaft als etwas, das einerseits ganz offensichtlich auf langfristigen Fortschritt angelegt ist und andererseits – und ebenso offensichtlich – den Einflüssen eines stets wechselhaften Zeitgeistes unterliegt.

Der lange Atem der Wissenschaft und ihre relative Stabilität gründen sich diesem Verständnis nach in ihrer Verwurzelung in den Technologien, mit deren Hilfe die Spezies Mensch sich ihre natürliche Umwelt immer weiter unterworfen hat. Ihre Kurzatmigkeit und relative Fragilität liegen dagegen an ihrer Abhängigkeit von der jeweils herrschenden gesellschaftlichen Motivationslage. Diese Fragilität wurde in den letzten Jahrhunderten zwar zunehmend dadurch begrenzt, daß Wissenschaft von einer Art Freizeitbeschäftigung zahlenmäßig kleiner Eliten selbst zu einem entscheidenden Moment der Reproduktion der Gesellschaft geworden ist. Das verbliebene Moment der Fragilität von Wissenschaft als gesellschaftlichem Unternehmen ist dafür allerdings auch besonders prekär geworden – und zwar gerade weil von ihrem Wohl oder Wehe mehr und mehr auch das zukünftige Überleben unserer Spezies abhängt.

Es mag verwundern, welche zentrale Rolle unsere historische Definition der Wissenschaft den Werkzeugen beimißt, auf den ersten Blick bloßen schnöden Mitteln zum Zweck. Doch wer die langfristigen Entwicklungen des Wissens betrachtet, der kommt an den Werkzeugen nirgends vorbei: Man denke nur an die Bedeutung von Instrumenten wie Zirkel und Lineal für die euklidische Geometrie, an die Rolle der Waage als zentraler Gegenstand der antiken und mittelalterlichen Mechanik oder an die folgenreiche Herausforderung, welche die Artillerie für die Entstehung der neuzeitlichen Bewegungslehre darstellte. In jedem Falle waren die Möglichkeiten des wissenschaftlichen Denkens von den Erfahrungen im Umgang mit den jeweils verfügbaren Technologien geprägt. Es ist offenbar auch kein Zufall, daß Instrumente wie Maßstäbe und Uhren noch für die Entstehung der Relativitätstheorie eine Schlüsselrolle gespielt ha-

ben, wie wir ausführlich besprechen werden. Einsteins Beschäftigung mit der Frage, ob Maßstäbe und Uhren sich in einem bewegten Laboratorium anders verhalten als in einem ruhenden, mag man auf den ersten Blick seiner Vorliebe für seltsame Gedankenexperimente zuschreiben. Diese Beschäftigung hätte aber wohl kaum derart tiefgreifende Auswirkungen auf unser Verständnis von Raum und Zeit haben können, wenn sie nicht die Grundlagen der Wissensgeschichte der Menschheit berührt hätte, in diesem Falle also das materielle Gerüst, an das sich unsere Begriffe von Raum und Zeit knüpfen. In der Tat hat die auf Konstruktionen mit Zirkel und Lineal beruhende Geometrie Euklids über rund anderthalb Jahrtausende hinweg unser theoretisches Verständnis räumlicher Verhältnisse bestimmt – so sehr, daß Philosophen ihre Begriffe sogar für Strukturen des menschlichen Denkens gehalten haben.

Wissenschaft als Spitze eines Eisberges

Über lange Zeiträume hinweg lieferte die materielle Kultur der Wissenschaft eine Erfahrungsbasis, die in einer Wissenschaftsgeschichte, die traditionell die theoretischen Errungenschaften in den Vordergrund stellt, gewöhnlich kaum berücksichtigt wird. Dabei ist theoretisches Wissen aber nur die Spitze eines gewaltigen Eisberges, zu dessen Substanz auch Wissensformen gehören, die in Theoriegebäuden nur gelegentlich explizit zum Ausdruck kommen. Dazu gehört insbesondere das praktische Wissen, das im Gegensatz zum theoretischen vor allem durch Teilnahme am Arbeitsprozeß und in mündlicher Überlieferung weitergegeben wird, ohne daß dafür schriftliche Fixierungen notwendig sind. Weiter gehört dazu das intuitive Wissen, mit dessen Hilfe wir uns im Alltag orientieren und das uns etwa sagt, daß überall dort, wo wir eine Bewegung wahrnehmen, auch eine Ursache dafür am Werk sein muß. Es wird von allen Menschen ohne die Vermittlung aufwendiger sozialer Prozesse während der kindlichen Entwicklung in der Auseinandersetzung mit einer mehr oder weniger gleichförmigen natürlichen Umwelt erworben.

Aus sozialhistorischer Sicht schafft das praktische Wissen geradezu unhintergehbare und notwendige Voraussetzungen, die aus der Sicht der Wissenschaft selbst natürlich eine gewisse Zufälligkeit besitzen. So wurde die mechanische Technologie der frühen Neuzeit etwa – von der Artillerie über die Architektur bis zum Schiffbau – für die zeitgenössische Wissenschaft zu einem Arsenal „herausfordernder Objekte“. Auf diese wendete sie – mit mehr oder minder großem Erfolg – ihre Begriffe an, die sie zum großen Teil aus der Antike übernahm, um schließlich den durch diese Begriffe gesetzten theoreti-

schen Horizont zu überwinden. Ohne das eingehende Studium spezifischer praktischer Probleme wie dem der Bewegung einer Kanonenkugel, hätten bestimmte theoretische Prinzipien der Mechanik wie der Trägheitssatz kaum eine solche zentrale Rolle für die weitere Entwicklung der Physik erhalten. Nach dem Trägheitssatz verläuft die Bewegung eines Körpers geradlinig und gleichförmig, solange keine äußere Kraft auf ihn einwirkt. Er steht damit in direktem Widerspruch nicht nur zum intuitiven physikalischen Wissen, nach dem Bewegungen von sich aus zur Ruhe kommen, wenn sie nicht durch eine fortwirkende Kraft aufrechterhalten werden. Der Trägheitssatz scheint auch der Beobachtung zu widersprechen, daß sich die Himmelskörper ohne die sichtbare Einwirkung äußerer Kräfte in ungleichförmiger Weise auf Bahnen fortbewegen, die alles andere als geradlinig sind. Andererseits eignet sich der Trägheitssatz hervorragend als Ausgangspunkt, wenn man eine Dynamik entwickeln will, auf deren Grundlage sich idealisierte irdische Bewegungen, wie die einer Kanonenkugel entlang einer Parabelbahn oder einer Billardkugel nach dem Stoß mit einer anderen Billardkugel, behandeln lassen. Auch zentrale theoretische Interpretationsschemata der Wissenschaft wie die Begriffe von Raum und Zeit verdanken sich also einer spezifischen historischen Entwicklung.

Solche Entwicklungen besitzen eine gewisse Notwendigkeit, wenn man die Wissenschaft als gesellschaftliches Teilsystem betrachtet. Die daraus hervorgegangenen wissenschaftlichen Begriffe verdanken ihre langfristige Gültigkeit der schieren Masse von Problemen, die mit ihrer Hilfe bewältigt werden konnten. Die Auswahl der Gegenstände, die in einer bestimmten historischen Epoche zu ihren herausfordernden Objekten wurden, hatte aus Sicht der Wissenschaft gleichwohl zufälligen Charakter. Doch gerade dies eröffnete die prinzipielle Möglichkeit, ihre Interpretationsschemata fundamental zu verändern. Im Falle des Trägheitsprinzips wurde diese Möglichkeit einer grundlegenden Veränderung schließlich durch Einsteins Relativitätstheorie realisiert. Wie aber ist die Dynamik solcher Veränderungen im Falle der Entwicklung des Wissens im einzelnen zu begreifen?

Das Prinzip des Aktualismus

Bei dem Versuch, diese Frage zu beantworten, lohnt sich wiederum der Blick auf andere Bereiche, in denen Entwicklungen untersucht werden. Auch Charles Darwins Verständnis der Evolution des Lebens hat schließlich von solchen Vergleichen profitieren können. Das gilt etwa für das heuristische Prinzip des Aktualismus, nach dem bei

der Erklärung historischer Veränderungen nur solche Prozesse zugelassen werden sollen, die auch in der Gegenwart noch zu beobachten sind. Im Falle Darwins war dieses von Charles Lyell für die Geologie eingeführte Prinzip von zentraler Bedeutung. Für sein Verständnis der Geschichte des Lebens bedeutete dieses Prinzip, die Veränderungen von Lebensformen nur mit Mechanismen zu erklären, die auch heute noch bei der Veränderung von Lebensformen wirksam sind. Darwin fand solche Mechanismen in der zeitgenössischen Züchterpraxis. So viele Schwierigkeiten sich einer Übertragung des Modells der vom Menschen vorgenommenen auf die natürliche Zuchtwahl auch in den Weg stellen sollten, die Zusammenführung des historischen und systematischen Wissens der Biologie mit dem praktischen Wissen der Züchter über aktuelle Veränderungsprozesse von Lebensformen war ein entscheidender Schritt bei der Entstehung der Darwinschen Evolutionstheorie.

Für eine Entwicklungsgeschichte des menschlichen Wissens ist eine solche Zusammenführung im Prinzip ebenso denkbar – wenn sie bisher auch kaum im einzelnen durchgeführt wurde. Denn zum einen gibt es auch hier so etwas wie Fossilien, nämlich die historischen Dokumente, die von vergangenen Formen des Wissens künden wie Knochen und Kalkgehäuse von ausgestorbenen Lebensformen. Zum anderen ist vieles über die Veränderung von Wissen in Lernprozessen bekannt, die sich heute beobachten lassen: aus den alltäglichen Bildungsprozessen in unserer Gesellschaft sowie auf wissenschaftlicher Ebene aus der Bildungsforschung, der Lernpsychologie und der Kognitionsforschung. Diese Disziplinen können dem Versuch, die historische Entwicklung des menschlichen Wissens zu verstehen, einen theoretischen und methodischen Rahmen liefern, in dem sich Strukturen und Veränderungsprozesse des Wissens präziser beschreiben lassen als in einer Ideengeschichte herkömmlicher Prägung.

Mentale Modelle

Gerade die Kognitionsforschung bietet für eine Geschichte des Wissens bisher kaum genutzte Werkzeuge, wie zum Beispiel den Begriff des „mentalen Modells“ – auch wenn sie selbst die hier aufgeworfenen Fragen nach Entstehung, Überlieferung und Veränderung kollektiver Wissensstrukturen normalerweise nicht stellt. Kognitionswissenschaftler interessieren sich ja vor allem für die Akte individueller Erkenntnis und wie dabei bestimmte kognitive Strukturen identifiziert und aus dem Gedächtnis aufgerufen werden. Für eine historische Theorie der Wissenschaftsentwicklung sind solche Struk-

turen dagegen Bestandteil einer überlieferten Makrostruktur des Wissens. Sie sind nur von Interesse, insofern sie zu einem gesellschaftlichen, das heißt intersubjektiv geteilten, Wissensreservoir gehören, aus dem sich das individuelle Wissen einerseits speist und zu dem es andererseits beiträgt.

Mentale Modelle stellen eine bestimmte Form der Repräsentation von Wissen dar, die besonders geeignet ist, Schlußfolgerungen und deren Veränderungen zu erfassen, die auf unvollständigen Informationen beruhen, so daß mit ihrer Hilfe gängige anachronistische Wertungen der Richtigkeit oder Fehlerhaftigkeit von Erkenntnissen in der Geschichte der Wissenschaft nebst dem durch sie konstituierten Bild einer linearen und kumulativen Erkenntnisentwicklung durch eine angemessenere Vorstellung der Entwicklung und Transformation von Wissen ersetzt werden kann. Mentale Modelle sind kontext-spezifisch und haben keine universelle Gültigkeit. Mit ihnen lassen sich deshalb Schlußfolgerungen erfassen, die die Kenntnis bestimmter Gegenstände und Kontexte voraussetzen. Mentale Modelle sind an neue Erfahrungen adaptierbar. Durch sie lassen sich daher Veränderungen von Schlußfolgerungen infolge von Veränderungen des Erfahrungskontexts erfassen. Mentale Modelle verknüpfen gegenwärtige mit vergangenen Erfahrungen, indem sie neue Erfahrungen in ein kognitives Netzwerk einbetten, das das Ergebnis vergangener Erfahrungen darstellt. Und mentale Modelle bilden schließlich ein Bindeglied zwischen verschiedenen Wissensformen – vom Handlungswissen der Praktikern bis zum theoretischem Wissen. Mit ihnen lassen sich nämlich auch implizite Schlußfolgerungen erfassen, die in der Handlungslogik von Praktikern verkörpert sind und keine explizite Darstellung in sprachlicher oder schriftlicher Form besitzen.

Vor dem Hintergrund des kognitionspsychologisch greifbaren intuitiven Wissens erklärt sich zum Beispiel, warum die aristotelische Naturphilosophie über Jahrtausende hinweg ihre Glaubwürdigkeit behalten hat – soweit, daß in klassischer Physik ausgebildete Schüler selbst heute noch Antworten auf Fragen nach der Verursachung oder dem Verlauf von Bewegungen geben, die dem aristotelischen Verständnis näher stehen als dem der Newtonschen Physik. In der Tat ist das aristotelische Prinzip, nach dem jede „gewaltsame“ Bewegung einer äußeren Ursache bedarf, viel plausibler als Newtons Trägheitsprinzip, nach dem eine Bewegung geradlinig und gleichförmig verläuft, solange keine Kraft auf sie einwirkt. Dieses im Lichte der Alltagserfahrung intuitiv plausible Erklärungsmuster der aristotelischen Physik liefert ein Beispiel für ein mentales Modell

wie wir es oben eingeführt haben. Es wird als das „Bewegung-impliziert-Kraft-Modell“ bezeichnet.

Dieses Modell geht davon aus, daß, wo immer eine Bewegung auftritt, auch eine Kraft vorhanden sein muß, die diese verursacht auch wenn diese Kraft selbst nicht unmittelbar in Erscheinung tritt. Auch für die Physik des Himmels erscheint die aristotelische Behauptung, daß die Planeten sich ohne äußeren Zwang bewegen, naheliegender als die Newtonsche Vorstellung, daß sie von ihrer eigentlich geradlinig gleichförmigen Bewegung durch eine geheimnisvolle Anziehungskraft der Sonne, die Gravitation, abgelenkt werden. Und schließlich liegt uns auch die aristotelische Vorstellung eines Raumes, in dem es qualitativ voneinander verschiedene Richtungen (wie oben und unten) und ebenso qualitativ verschiedene Regionen (wie die Sphären der himmlischen und der irdischen Bewegungen) gibt, intuitiv näher als Newtons unendlich ausgedehnter, isotroper und homogener Raum, der auf dem Raumbegriff der euklidischen Geometrie aufbaut.

Nichtmonotone Logik

Die nachhaltige Wirksamkeit solcher Vorstellungen zeigt, daß die Architektur des wissenschaftlichen Wissens neben seiner theoretischen Dimension auch das intuitive und das praktische Wissen als tieferliegende Schichten umfaßt, die mit Hilfe von Begriffen aus der Kognitionswissenschaft – wie eben dem des mentalen Modells – detailliert beschrieben werden können. Gerade dieser Begriff aber eignet sich darüber hinaus auch dazu, die Korrigierbarkeit wissenschaftlicher Schlüsse und ihre Erfahrungsabhängigkeit verständlich zu machen. Mentale Modelle stellen eine Anwendung der sogenannten nichtmonotonen Logik dar. Nichtmonotones Schließen erlaubt die Korrektur von Schlußfolgerungen, ohne dabei Ausgangsannahmen oder die Schlußregeln verändern zu müssen. Die Voraussetzungen der Schlüsse werden in der nichtmonotonen Logik bei einer Korrektur nicht negiert, sondern ergänzt. Dies unterscheidet sie von der klassischen Logik: Wenn dort ein bestimmter Ausdruck von einer Menge von Prämissen ableitbar ist, so kann dieser Schluß durch das Hinzufügen weiterer Prämissen seine Gültigkeit nicht verlieren. Man bezeichnet dies als die „Monotonie“ der klassischen Logik, weil zusätzliche Voraussetzungen das Spektrum der Schlußfolgerungen höchstens erweitert, aber nie vermindert. Menschliches Denken ist dagegen häufig nichtmonoton: Oft ziehen wir Schlüsse, die wir im Lichte erweiterter Information wieder aufgeben.

Das Standardbeispiel, mit dem Kognitionsforscher solches nicht-monotone Denken gerne erläutern, ist ein Vogel namens Tweety. Aus der Information, daß Tweety ein Vogel ist, ziehen wir den Schluß, daß Tweety fliegen kann, obwohl darüber explizit gar nichts ausgesagt ist. Wir wissen eben, daß Vögel normalerweise fliegen können. Erfahren wir dagegen zusätzlich, daß Tweety ein Pinguin ist, sind wir natürlich bereit, den früheren Schluß zurückzuziehen, ohne allerdings deshalb auf irgendeine unserer früheren Prämissen zu verzichten. Wir sind immer noch überzeugt, daß Tweety ein Vogel ist, und daß Vögel typischerweise fliegen können.

Das Tweety-Beispiel illustriert aber nicht nur die Korrigierbarkeit menschlicher Schlußfolgerungen, sondern auch deren Abhängigkeit von vorangegangenen Erfahrungen. Die Aussage, daß Vögel fliegen, wurde in diesem Beispiel nicht explizit gegeben, sondern aus unserer Erfahrung ergänzt. Sie stellt eine Standardannahme über die Eigenschaften von Vögeln dar, die es erlaubt, Schlußfolgerungen zu ziehen, welche über die aktuell verfügbare unvollständige Information hinausgehen. Solche Standardannahmen heißen in der nichtmonotonen Logik „Default-Annahmen“. Sie füllen bestimmte „Leerstellen“ des Modells und können aus früheren Erfahrungen stammen oder auch von mentalen Modellen höherer Ordnung „erbt“ sein. So erbt das mentale Modell eines Vogels bestimmte Default-Annahmen – etwa über die Notwendigkeit, Nahrung aufzunehmen – vom übergeordneten Modell eines Lebewesens.

Wer Erkenntnisfortschritte verstehen will, der hat es oft eher mit der nichtmonotonen Logik als mit der klassischen Logik zu tun. Denn wie reagiert ein Wissenschaftler, wenn ein erschlossenes Ereignis nicht eintritt, also etwa ein theoretisch vorhergesagtes Verhalten sich im Experiment nicht einstellt? Die klassische Logik erlaubt nur den Schluß, daß eine der Voraussetzungen falsch war – demnach müßte der Forscher also die Theorie verwerfen. Das tut er aber oft genau nicht – und in diesen Fällen beschreibt die nichtmonotone Logik, was tatsächlich geschieht, nämlich daß eine spezifischere Information die allgemeinere ersetzt. Die Theorie wird nicht verworfen, sondern nach Maßgabe der unerwarteten Beobachtung abgeändert. Auch und gerade im wissenschaftlichen Denken hat der Einzelfall Vorrang vor der allgemeinen Regel. Nehmen wir das Beispiel der Äthertheorie, wie sie im 19. Jahrhundert die Grundlage der Optik und des Elektromagnetismus darstellte. Nimmt man einen ruhenden Äther als Träger elektromagnetischer Wellen in Analogie zur Luft als Träger der Schallwellen an, dann sollte es eigentlich möglich sein, die Bewegung der Erde gegenüber diesem Äther experimentell festzustellen. Die fehlgeschlagenen Versuche, einen solchen Äther-

wind nachzuweisen, haben nun aber zunächst keineswegs dazu geführt, den Äther einfach abzuschaffen, sondern vielmehr dazu, ganz spezifische Annahmen über das Verhalten von Körpern im Äther einzuführen.

Ebensowichtig ist, daß die nichtmonotone Logik die Rolle von implizitem Wissen im wissenschaftlichen Denken verständlich macht. Nach der klassischen Logik gehen nur solche Voraussetzungen in eine wissenschaftliche Theorie ein, die explizit als Prämissen erscheinen. Die nichtmonotone Logik macht dagegen verständlich, wie wissenschaftliches Wissen mit anderem Weltwissen, also insbesondere dem bereits erwähnten intuitiven und praktischen Wissen, zusammenhängt, nämlich durch Default-Annahmen, welche die stets unvollständige Spezifizierung eines wissenschaftlichen Untersuchungsgegenstandes ergänzen.

Wissenschaftliche Kommunikation wäre ohne solche Default-Annahmen ebensowenig denkbar wie andere Bereiche menschlicher Kommunikation, die durch externe Repräsentationen wie Sprache oder Schrift vermittelt werden. Nehmen wir zum Beispiel an, wir wollten in Erfahrung bringen, ob es um 10.00 Uhr einen Zug von München nach Bonn gibt. Auf dem Bahnhof in München finden wir einen Fahrplan, in dem allerdings kein solcher Zug verzeichnet ist. Wir schließen daraus, daß um diese Uhrzeit kein Zug von München nach Bonn fährt, obwohl der Fahrplan keine explizite Aussage darüber enthält. In der Legende des Fahrplans ist nicht einmal vermerkt, daß Verbindungen, die nicht aufgeführt werden, nicht existieren. Man geht einfach davon aus, daß der Leser eines Fahrplans gelernt hat, die dort gemachten Angaben durch die Default-Annahme zu ergänzen, daß Verbindungen nicht existieren, wenn sie nicht aufgeführt sind.

Das lebensweltliche Wissen, das die Voraussetzung für das Verständnis wissenschaftlicher Theorien bildet, ist natürlich nicht auf solche einfachen Default-Annahmen beschränkt, sondern repräsentiert selbst ein gewaltiges, historisch gewachsenes Wissensfundament, das von der Wissenschaftsgeschichte allerdings normalerweise nicht beachtet wird, geschweige denn, daß seine Strukturen analysiert werden. Zu den Strukturen, die das wissenschaftliche Wissen in besonderem Maße prägen, gehören die mentalen Modelle. Sie werden hier im Sinne einer spezifischen Repräsentationsstruktur von Wissen verwendet, die es erlaubt, aus vorangegangener Erfahrung Schlüsse über komplexe Objekte und Prozesse zu ziehen, selbst wenn die über diese Objekte und Prozesse verfügbare Information unvollständig ist. Mentale Modelle können sowohl unhinterfragte, implizite Voraussetzungen für das Verständnis einer wissenschaftli-

chen Theorie bilden, als auch durch eine wissenschaftliche Theorie selbst geformt und verändert werden.

Reale Modelle

Mentale Modelle können entweder zum allgemeinen gesellschaftlichen Wissen oder zum gesellschaftlichen Wissen bestimmter Gruppen gehören. Auf dem Feld der Physik gibt es zunächst einmal eine Reihe von Basismodellen, die von allen Menschen in ihrer individuellen Entwicklung auf der Grundlage von Umweltbedingungen konstruiert werden. Sie ähneln sich in verschiedenen Kulturen und bleiben über lange historische Zeiträume stabil. Zu diesen Basismodellen gehören diejenigen, die das intuitive Verständnis von Kraft, Widerstand, festen Körpern, Raum und Zeit charakterisieren. Ein Beispiel für ein solches Basismodell ist das bereits erwähnte Bewegung-impliziert-Kraft-Modell. Eine andere Gruppe von mentalen Modellen bestimmt das Verständnis mechanischer Prozesse und Wechselwirkungen und gehört zum professionellen Wissen von mehr oder weniger spezialisierten Praktikern. Diese kontextspezifischen Modelle werden im Zusammenhang mit dem Gebrauch von Werkzeugen als Resultat praktischer Erfahrung aufgebaut und im Rahmen der beruflichen Ausbildung erlernt. Schließlich gibt es mentale Modelle, die integraler Bestandteil des wissenschaftlichen Wissens sind und durch explizite Beschreibung ihrer Struktur und der Bedingungen ihrer Anwendungen kommuniziert werden. In diesen Fällen sind Gegenstände wie Manuskripte, Patentschriften, Proben-sammlungen oder Instrumente die Grundlage für die historische Überlieferung wissenschaftlichen Wissens und daher die Voraussetzung für die Tradierung der entsprechenden mentalen Modelle.

Solche sogenannten „externen Repräsentationen“ gewährleisten die Kontinuität von Entwicklungsprozessen und spielen damit für eine historische Theorie des Wissens eine ähnliche Rolle wie Vererbungsmechanismen in der Biologie. Innovationen können dabei erst auf der Grundlage individueller Abweichungen der durch externe Repräsentationen überlieferten Wissensarchitektur entstehen. Die zentrale Rolle externer Repräsentationen ist auch der Grund, aus dem wir uns unter den Konzepten der Kognitionswissenschaften gerade auf das der mentalen Modelle konzentriert haben. Denn dadurch können wir ihm den Begriff des realen Modells als der korrespondierenden externen Repräsentation von Wissen zur Seite stellen: Ein reales Modell wie zum Beispiel ein Hebel unterstützt den Gebrauch des entsprechenden mentalen Modells, kann dieses aber nicht ersetzen. Schließlich kann es ja auch nicht wie ein

mentales Modell gedanklich auf ein Objekt oder einen Prozeß angewendet und dann ausgewertet werden, wie es beispielsweise bei der Anwendung des Hebelgesetzes der Mechanik geschieht. Auch spiegelt ein reales Modell im allgemeinen nicht den Unterschied zwischen stabilen Strukturelementen und solchen wider, die sich im Verlauf der Anwendung des Modells in kognitiven Prozessen ständig verändern. Auf der anderen Seite spielen reale Modelle eine entscheidende Rolle bei der Überlieferung des durch mentale Modelle strukturierten Wissens, das in vielen Fällen nur mit ihrer Hilfe erlernt, angewendet und weitergegeben werden kann.

Die Dynamik wissenschaftlicher Revolutionen

Die Kontinuität des Wissens läßt sich jedenfalls im wesentlichen durch den Fortbestand und die Tradierung der ihm zugehörigen materiellen Kultur einer Gesellschaft erklären, ebenso wie durch die materielle Natur unserer Lebenswelt. Um einzusehen, daß eine solche Kontinuität nicht auf eine Wiederkehr des ewig Gleichen hinausläuft, bedarf es allerdings nicht nur einer genaueren Analyse der Architektur des Wissens, sondern auch eines Verständnisses der Dynamik seiner Entwicklung. Eine Schlüsselrolle spielt dabei, wie wir gesehen haben, die „List der Vernunft“, die mit dem Innovationspotential der materiellen Kultur operiert. Doch die Einsicht, daß die Mittel allgemeiner verwendbar sind als der Zweck, zu dem sie erfunden wurden, erklärt zwar prinzipiell die Entstehung des Neuen in der Wissenschaft. Für sich genommen macht sie aber noch nicht verständlich, wie und warum das Neue so beschaffen ist, daß die über weite historische Strecken kontinuierlich verlaufende Entwicklung der Wissenschaft gelegentlich Sprünge aufweist.

Wissenschaftliche Revolutionen dagegen lassen sich vor dem Hintergrund der bisherigen Diskussion als Umstrukturierungen von Wissenssystemen verstehen, die einer charakteristischen Dynamik gehorchen. In der evolutionsbiologischen Analogie entspricht eine solche Neuorganisation der Entstehung einer neuen Spezies. Wie in der Evolution beruht auch in der Wissensentwicklung die Möglichkeit der Entstehung einer neuen Struktur zunächst auf der inneren Variabilität des Systems. In der Biologie ist diese Variabilität durch das Auftreten genetischer Mutationen gewährleistet, durch die Individuen mit neuen Eigenschaften entstehen. Die Variabilität eines Wissenssystems ist dagegen eine Folge der Erkundung seiner eigenen Grenzen mit Hilfe der verfügbaren materiellen Mittel. Solche Selbsterkundung leistet eine beständige innere Differenzierung des betreffenden Wissenssystems. Die wachsende innere Komplexität

wiederum vermehrt die Möglichkeiten, innerhalb eines Wissenssystems Resultate zu erzeugen – seien es experimentelle Ergebnisse oder theoretische Schlußfolgerungen – und damit zugleich den Anwendungsbereich des Wissenssystems beständig auszuweiten. Ähnlich wie neue Spezies aber erst dann entstehen, wenn bestimmte Ereignisse eine Abspaltung oder „Divergenz“ zwischen den Nachkommen verschiedener Individuen ermöglichen (insbesondere durch räumliche Trennung von Populationen), so bedarf auch die Entstehung eines neuen Wissenssystems bestimmter Bedingungen.

In der Biologie werden solche Ereignisse den divergierenden Populationen oft von außen aufgenötigt, etwa wenn fallender Wasserstand einen See in mehrer kleinere Seen zerfallen läßt, und damit den Genfluß zwischen den jeweiligen Teilpopulationen einer Fischart unterbindet. In der Dynamik der Wissensentwicklung kommt das entscheidende Moment für eine Divergenz dagegen von innen. Und zwar zum einen durch das Auftreten innerer Widersprüche des bestehenden Systems, die ebenfalls ein typisches Ergebnis der fortschreitenden Erkundung und inneren Vernetzung eines Wissenssystems sind und schließlich Entscheidungen über die sich ergebenden Alternativen erzwingen.

Zum anderen entsteht die für die Formierung eines neuen Wissenssystems notwendige Divergenz bei einem Umbau, der durch Reflexion, also durch Denken über das Denken, vollzogen wird. Solch ein Umbau macht bestimmte, oft problematische oder marginale Konsequenzen des bestehenden Systems zu Ausgangspunkten eines neuen Systems. Dieser Prozeß führt also dazu, daß randständige Elemente eines komplexen und von inneren Spannungen zerrissenen Wissensgebäudes zu neuen Fundamenten werden. Die entstehende Struktur ist zwar weitgehend neu, besteht aber im wesentlichen aus den bereits verfügbaren Bausteinen.

Man könnte den Reflexionsprozeß, der solch einen Umbau bewirkt, als ein „Vom-Kopf-auf-die-Füße-Stellen“ bezeichnen, oder – nach dem wohl berühmtesten wissenschaftshistorischen Vorbild für diese Art der Umgestaltung eines bestehenden Wissenssystems – schlicht als einen „Kopernikusprozeß“. Denn die reflexiven Umbrüche von Wissenssystemen, die wir hier als wissenschaftliche Revolutionen bezeichnen, sind ihrer Struktur nach sämtlich der astronomischen Revolution des Kopernikus vergleichbar. Er schuf bekanntlich ein neues Weltsystem, indem er ein zwar zuvor randständiges Gestirn, die Sonne, ins Zentrum rückte, dabei aber im wesentlichen das bereits ausgearbeitete komplexe Getriebe der planetaren Astronomie übernahm, statt mit einer *tabula rasa* zu beginnen.

Ganz ähnlich dazu vollzog sich auch der Umbau der in der aristotelischen Physik verwurzelten vorklassischen Mechanik Galileis und seiner Zeitgenossen in die klassische Mechanik der Ära Newtons – ein Beispiel, auf das wir noch öfter zurückkommen werden. So war in der vorklassischen Mechanik die Annahme, daß Körper, die keiner Kraft unterliegen, sich geradlinig und gleichförmig fortbewegen, eine zwar denkbare, aber höchst zweifelhafte und am Rande liegende Aussage. Sie war zwar plausibel, weil sie die einfachste Annahme darstellte, aus der sich die von Galilei als richtig erkannte Parabelform der Wurfbahn ableiten ließ. Sie war aber zugleich problematisch, weil sie genau genommen der aristotelischen Grundannahme widersprach, daß jede „gewaltsame“ Bewegung einer sie verursachenden Kraft bedarf. Erst Galileis Schüler haben diese Annahme als Trägheitsprinzip – in einem Prozeß der Reflexion über die Ergebnisse Galileis – zum Ausgangspunkt der mit dem Aristotelismus nicht mehr zu vereinbarenden klassischen Physik gemacht.

In den folgenden Kapiteln soll gezeigt werden, daß auch Einstein – ähnlich den Schülern Galileis – problematische Konsequenzen der physikalischen Theorien seiner Vorgänger zum Ausgangspunkt eines neuen Wissenssystems gemacht hat, welches zum einen ihr Erbe bewahrte, zum anderen aber – insbesondere durch die Einführung neuer Begriffe von Raum, Zeit, Gravitation, Materie und Strahlung – nicht mehr mit ihren Begriffen vereinbar war. Anhand der von Einstein initiierten Revolution der Wissenschaft wollen wir die hier skizzierte historische Entwicklungstheorie des Wissens beispielhaft darstellen. Dabei soll gezeigt werden, daß der Fortschritt in einem solchen Rahmen nicht nur seinen paradoxen Charakter verliert, sondern zugleich in die Sphäre menschlicher Gestaltungsmöglichkeiten zurückkehrt. Denn mit der Reflexion erweisen sich die Innovationsquelle der Wissenschaft und die Voraussetzung des verantwortlichen Umgangs mit ihren Möglichkeiten als letztlich wesensgleich.

Dieses Kapitel beruht auf Forschungsergebnissen, die am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte entstanden sind, und verdankt zentrale Einsichten den Arbeiten Peter Damerows und Wolfgang Lefèvres zur Rolle der materiellen Mittel intellektueller Arbeit für die Entwicklung der Wissenschaft.

Zum Weiterlesen empfohlen

Dieses Kapitel beruht insbesondere auf:

- Damerow, Peter und Wolfgang Lefèvre (Hrsg.). 1981. *Rechenstein, Experiment, Sprache: Historische Fallstudien zur Entstehung der exakten Wissenschaften*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- . 1998. „Wissenssysteme im geschichtlichen Wandel“. In *Enzyklopädie der Psychologie Abt. C2: Themenbereich C: Theorie und Forschung*. Serie II: Kognition Bd. 6: Wissen. Göttingen u.a.: Hogrefe, S. 77–113.
- Renn, Jürgen. 1995. „Historical Epistemology and Interdisciplinarity“. In K. Gavroglu, J. Stachel, und M. W. Wartofsky (Hrsg.) *Physics, Philosophy and the Scientific Community: Essays in the Philosophy and History of the Natural Sciences and Mathematics in Honor of Robert S. Cohen*. Dordrecht: Kluwer, S. 241–251.
- . 2000. „Mentale Modelle in der Geschichte des Wissens: Auf dem Wege zu einer Paläontologie des mechanischen Denkens“. In E. Henning (Hrsg.) *Dahlemer Archivgespräche* Bd. 6. Berlin: Archiv zur Geschichte der Max-Planck-Gesellschaft, S. 83–100.
- . 2003. „The Paradox of Scientific Progress: Notes on the Foundation of a Historical Theory of Knowledge“. In *Research Report 2002–2003*. Berlin: Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, S. 21–49.

Weitere in diesem Kapitel verwendete Literatur:

- Feyerabend, Paul K. 1986. *Wider den Methodenzwang*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Freudenthal, Gideon. 1982. *Atom und Individuum im Zeitalter Newtons. Zur Genese der mechanistischen Natur- und Sozialphilosophie*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Forman, Paul. 1974. „The Environment and Practice of Atomic Physics in Weimar Germany“. *Minerva* 12 (1): 39–66.
- Galison, Peter. 2003. *Einsteins Uhren, Poincarés Karten: Die Arbeit an der Ordnung der Zeit*. Frankfurt am Main: Fischer.
- Ginsberg, Matthew L. 1987. *Readings in Nonmonotonic Reasoning*. Los Altos, CA: Kaufmann.
- Pickering, Andrew. 1984. *Constructing Quarks: A Sociological History of Particle Physics*. Edinburgh: University Press.
- Popper, Karl R. 1935. *Logik der Forschung: Zur Erkenntnistheorie der modernen Naturwissenschaft*. Wien: Springer.
- Renn, Jürgen und Matteo Valleriani. 2001. „Galileo and the Challenge of the Arsenal“. *Nuncius* 2: 481–503.

Sagan, Karl. 1986. *Contact*. München: Droemer Knaur.

Zum Thema mentale Modelle und Kognitionswissenschaft:

Davis, Robert B. 1989. *Learning Mathematics: The Cognitive Approach to Mathematics Education*. London: Routledge.

Gentner, Dedre, Albert L. Stevens. 1983. *Mental Models*. Hillsdale, NJ u.a.: Erlbaum.

Gruber, Howard E. und Katja Bödeker (Hrsg.). 2005. *Creativity, Psychology and the History of Science*. Dordrecht: Springer (Boston Studies in the Philosophy of Science, Bd. 245).

Johnson-Laird, Philip Nicholas. 1983. *Mental Models: Towards a Cognitive Science of Language, Inference, and Consciousness*. Cambridge: Cambridge University Press.

Mental Models Website:

<http://www.tcd.ie/Psychology/Ruth_Byrne/mental_models>

Minsky, Marvin. 1990. *Mentopolis*. Stuttgart: Klett-Cotta.

Piaget, Jean. 1980. *Die Entwicklung des Erkennens*. 3 Bde. Stuttgart: Klett-Cotta.

Zur Wissenschaftsgeschichte allgemein:

Bernal, John D. 1970. *Wissenschaft in der Geschichte*. 4 Bde. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt.

D'Abro, A. 1952. *The Rise of the New Physics: Its Mathematical and Physical Theories*. 2 Bde. New York: Dover.

Dijksterhuis, E. J. 1956. *Die Mechanisierung des Weltbildes*. Berlin u.a.: Springer.

Kragh, Helge. 1987. *An Introduction to the Historiography of Science*. Cambridge: Cambridge University Press.

Renn, Jürgen (Hrsg.). 2005. *Albert Einstein – Ingenieur des Universums. Einsteins Leben und Werk im Kontext*. Berlin: Wiley-VCH.

Rosenberger, Ferdinand. 1965. *Die Geschichte der Physik*. 3 Bde. Hildesheim: Georg Olms Verlagsbuchhandlung.

Simonyi, Károly. 1995. *Kulturgeschichte der Physik: Von den Anfängen bis 1990*. Frankfurt am Main: H. Deutsch.

Toulmin, Stephen E. und June Goodfield. 1996. *Die Entdeckung der Zeit. Materie und Leben. Modelle des Kosmos*. München: Goldmann.

Preprintserie des Max-Planck-Instituts für Wissenschaftsgeschichte, siehe:

<http://www.mpiwg-berlin.mpg.de/de/forschung/preprints.html>

Zur Wissenschaftsgeschichte der frühen Neuzeit:

- Biagioli, Mario. 1999. *Galilei, der Höfling: Entdeckungen und Etikette: vom Aufstieg der neuen Wissenschaft*. Frankfurt am Main: Fischer.
- Damerow, Peter, Gideon Freudenthal u.a. 2004. *Exploring the Limits of Preclassical Mechanics*. New York: Springer.
- Kuhn, Thomas S. 1981. *Die kopernikanische Revolution*. Braunschweig: Vieweg.
- Heilbron, John L. 1982. *Elements of Early Modern Physics*. Berkeley u.a.: University of California Press.
- Lefèvre, Wolfgang. 1978. *Naturtheorie und Produktionsweise. Probleme einer materialistischen Wissenschaftsgeschichtsschreibung: Eine Studie zur Genese der neuzeitlichen Naturwissenschaft*. Darmstadt, Neu-wied: Luchterhand.
- Redondi, Pietro. 1989. *Galilei – der Ketzer*. München: Beck.
- Shapin, Steven. 1998. *Die wissenschaftliche Revolution*. Frankfurt am Main: Fischer.

Zur Entstehung der Evolutionstheorie:

- Gruber, Howard E. 1981. *Darwin on Man. A Psychological Study of Scientific Creativity*. Chicago, Ill.: University of Chicago Press.
- Lefèvre, Wolfgang. 1984. *Die Entstehung der biologischen Evolutionstheorie*. Frankfurt am Main u.a.: Ullstein.
- Michael Ruse. 1999. *The Darwinian Revolution: Science Red in Tooth and Claw*. 2. Ausg. Chicago: University of Chicago Press.

Zum Thema einer historischen Theorie des Wissens sowie zu langfristigen Entwicklungen in Geschichte und Wissenschaftsgeschichte:

- Damerow, Peter. 1996. *Abstraction and Representation. Essays on the Cultural Revolution of Thinking*. Dordrecht u.a.: Kluwer (Boston Studies in the Philosophy of Science, Bd.175).
- Daston, Lorraine. 2001. *Wunder, Beweise und Tatsachen: Zur Geschichte der Rationalität*. Frankfurt am Main: Fischer.
- Diamond, Jared M. 2005. *Arm und Reich: Die Schicksale menschlicher Gesellschaften*. Frankfurt am Main: Fischer Taschenbuch Verlag.
- Dux, G. und U. Wenzel. 1994. *Der Prozeß der Geistesgeschichte: Studien zur ontogenetischen und historischen Entwicklung des Geistes*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Elkana, Yehuda. 1986. *Anthropologie der Erkenntnis: Die Entwicklung des Wissens als episches Theater einer listigen Vernunft*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.

- Hacking, Ian. 1983. *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Heinrich, Klaus. 1986–2000. *Dahlemer Vorlesungen*. Basel: Stroemfeld/Roter Stern.
- Kuhn, Thomas S. 1993. *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. Frankfurt am Main: Suhrkamp (2. rev. und erg. Aufl.).
- Mach, Ernst. 1988. *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*. Hrsg. von Renate Wahsner und Horst-Heino von Borzeszkowski. Berlin: Akademie-Verlag.

Zur Ideengeschichte der Philosophie und Erkenntnistheorie:

- Cassirer, Ernst. 1991. *Das Erkenntnisproblem in der Philosophie und Wissenschaft der neueren Zeit*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Fraassen van, Bas C. 1980. *The Scientific Image*. Oxford: Clarendon Press.
- Köhnke, Klaus Christian. 1986. *Entstehung und Aufstieg des Neukantianismus: Die deutsche Universitätsphilosophie zwischen Idealismus und Positivismus*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Lange, Friedrich Albert. 1974. *Geschichte des Materialismus und Kritik seiner Bedeutung in der Gegenwart*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Nagel, Ernest. 1961. *The Structure of Science: Problems in the Logic of Scientific Explanation*. London: Routledge.
- Popper, Karl R. 1935. *Logik der Forschung: Zur Erkenntnistheorie der modernen Naturwissenschaft*. Wien: Springer.
- Salmon, Merrilee H. u.a. 1992. *Introduction to the Philosophy of Science*. Indianapolis u.a.: Hackett Publishing Co.
- Toulmin, Stephen. 1968. *Voraussicht und Verstehen: Ein Versuch über die Ziele der Wissenschaft*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.