

Paradigmenwechsel in der Physik

Tim Paehler

4. Oktober 1998

Inhaltsverzeichnis

1	Wozu Wissenschaftsgeschichte/-theorie?	2
1.1	Wissenschaftsgeschichte	2
1.2	Wissenschaftstheorie	3
2	Wissenschaftstheorie vor Kuhn	3
2.1	Induktivismus	4
2.2	Falsifikationismus	4
3	Fallstudie: Vom aristotelischen zum newtonschen Weltbild	5
3.1	Die Physik in der Antike	5
3.2	Mittelalter: Aufarbeitung und Verfeinerung des antiken Erbes	8
3.3	Die frühe Neuzeit: Kopernikus, Kepler, Galilei, Descartes	10
3.4	Newton: Vereinigung von irdischer Mechanik und Himmelsmechanik	12
4	Die Kuhnsche Wissenschaftstheorie	13
4.1	Paradigmen und normale Wissenschaft	14
4.2	Anomalien und Krisen in der Wissenschaft	16
4.3	Revolutionen und Wandlung des Weltbildes	20
5	Folgerungen für die Didaktik der Physik	26

Zusammenfassung

Dieser Aufsatz gibt einen kurzen Überblick über die wissenschaftstheoretischen Ergebnisse Thomas S. Kuhns, veröffentlicht in dem Buch “Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen” und zeigt ihre Anwendung in Beispielen auf. Ein besonderes Augenmerk soll dabei dem Bezug zur Didaktik gewidmet werden.

1 Wozu Wissenschaftsgeschichte/-theorie?

1.1 Wissenschaftsgeschichte

Betrachtet man ein modernes Lehrbuch der Physik, so findet man dort zwar zu jeder wichtigen Formel einen Hinweis, auf welche Person die durch sie beschriebene Beziehung zurückgeht, weitere historische Details werden jedoch im allgemeinen zugunsten fachlicher Erklärungen weggelassen. Dies erscheint zunächst auch sinnvoll, da die Theorie im Einklang mit dem modernen Weltbild dargestellt werden soll, welches sich von der seinerzeitigen Sicht der Wissenschaftler oftmals erheblich unterscheidet (So haben z.B. Descartes und Newton das optische Brechungsgesetz richtig formuliert, jedoch vom modernen Standpunkt aus falsch erklärt). Es stellt sich dabei aber die Frage, ob die geschichtliche Sicht gegenüber einer rein fachlich formulierten Darstellung (der sogenannten rationalen Rekonstruktion) nicht auch Vorteile bietet. Als solche werden z.B. die folgenden Punkte betrachtet¹:

- Im Hinblick auf ein einheitliches Kulturverständnis genügt es nicht, den aktuellen Stand einer Wissenschaft zu überblicken, sondern ihre Entwicklung zumindest so weit zu kennen, daß man die Dynamik des wissenschaftlichen Fortschritts und seine Verflechtungen mit dem Individuum und der gesellschaftlichen Entwicklung erkennt.
- Gerade unter didaktischen Gesichtspunkten kann die rationale Rekonstruktion einer Wissenschaft eine wichtige Frage nicht beantworten: Welche Sachverhalte sind intuitiv erkennbar und welche sind von höherem Anspruch? Den Newtonschen Bewegungsgleichungen z.B. wären sicherlich nicht über 2000 Jahre währende Bemühungen zur Beschreibungen von Bewegungen vorausgegangen, wenn ihre Bedeutung so intuitiv wäre, wie sie im Schulunterricht vielfach dargestellt wird.

Während das erste Argument sich vorwiegend dem weitgehend bekannten humanistischen Bildungsideal zuordnen läßt, verdient das zweite eine genauere Betrachtung. Ihm liegt die Idee zugrunde, daß die historische Entwicklung der Gesellschaft sich mit der geistigen Entwicklung des Individuums vergleichen läßt oder wie in [Sim86] eindrucksvoll festgestellt:

¹[Sim86], [Hor95]

“Genau so, wie der menschliche Embryo in neun Monaten die Entwicklungsgeschichte von vielleicht Milliarden Jahren durchläuft, so spielt sich - entsprechend beschleunigt - in der Entwicklung der physikalischen Begriffe eines Kindes die Physikgeschichte ab.”

Diese Hypothese wird vor allem durch die Untersuchungen des Entwicklungspsychologen (und zeitweise als Wissenschaftshistoriker wirkenden) Jean Piaget² an Kindern gestützt, auf die sich auch Kuhn beruft³: “Ich sagte zu ihm, von Piagets Kindern hätte ich die Physik des Aristoteles verstehen gelernt. Er antwortete, durch die Physik des Aristoteles habe er Piagets Kinder verstehen gelernt...”. Wir werden auf diesen Zusammenhang in den folgenden Kapiteln noch zurückkommen.

1.2 Wissenschaftstheorie

Ist das Studium der Wissenschaftsgeschichte nun für unsere Zwecke interessant, wie steht es dann mit der Wissenschaftstheorie? Zunächst sollte geklärt werden, was Wissenschaftstheorie ist⁴.

Die Wissenschaftstheorie ist als Zweig der Erkenntnistheorie in der Philosophie verwurzelt. Sie untersucht den Begriff der Wissenschaft und versucht, die Kennzeichen wissenschaftlichen Arbeitens herauszuarbeiten.

Um die Bedeutung der Frage, was Wissenschaft ausmacht, festzustellen, genügt es, die gesellschaftliche Bewertung von Wissenschaft in unserer westlichen Kultur zu betrachten: Das Ansehen, welches die Wissenschaft genießt, reicht weit über Universitäten und Forschungszentren hinaus in die Bereiche von Politik und Kommerz⁵. Kritische Stimmen (z.B. Feyerabend⁶) sprechen der heutigen Wissenschaft sogar dieselbe Rolle zu, die die Religion im Mittelalter innehatte.

Die Charakterisierung, was Wissenschaft ist, ist also ein Thema, welches hohe Beachtung verdient.

2 Wissenschaftstheorie vor Kuhn

Um die Wissenschaftstheorie Kuhns besser zu verstehen, ist es nach Obigem notwendig, kurz die vorhergehenden Strömungen in der Wissenschaftstheorie zu betrachten.

²[Pia50]

³[Ku78] S.72

⁴[Rom74], [Cha86]

⁵Nicht umsonst bedient sich z.B. die Werbung zur Erlangung von Glaubwürdigkeit Hinweisen wie “wissenschaftliche Untersuchungen haben nachgewiesen...”

⁶[Fey76]

2.1 Induktivismus

Die induktive Methode geht auf das Zeitalter der wissenschaftlichen Revolution des 17. Jahrhunderts (auf die wir im 4. Kapitel genauer eingehen) zurück. Ihre ersten Vertreter (Galilei, Descartes, Bacon) stellten der bis dahin anerkannten deduktiven Methode der Griechen das Experiment als konkrete Frage an die Natur gegenüber, durch dessen Auswertung Theorien über die Natur gebildet und bewiesen werden konnten. Dies war zweifellos ein Fortschritt gegenüber den autoritätsgeleiteten Aristotelikern, die ihr Weltbild eher in den festen Prinzipien der Antike verwurzelt sahen.

Problematisch blieb dabei jedoch unter anderem das Zusammenspiel zwischen Theorie und Experiment: Eine allgemeine Theorie konnte natürlich nicht durch eine endliche Anzahl von Versuchen bewiesen werden, allein die Widerlegung einer Theorie durch experimentelle Befunde war möglich.

2.2 Falsifikationismus

Der Falsifikationismus nahm sich dieser Problematik an: Jede Theorie sollte nur als vorläufiges Gesetz solange gelten, wie sie nicht durch ein Experiment widerlegt (falsifiziert) wird. Popper (1902 - 1994) formulierte seinen Falsifikationismus in [Pop34] folgendermaßen:

- Wissenschaft ist ein Prozeß, in dem Theorien aufgestellt werden, die durch Experimente falsifizierbar sein müssen. Theorien, die dies nicht tun (etwa die Konjunktiv-Aussagen der Astrologie), sind nicht wissenschaftlich.
- Eine Theorie gilt solange, wie sie nicht falsifiziert worden ist. Wird sie falsifiziert, muß sie durch eine Theorie ersetzt werden, die sowohl die durch die alte Theorie erklärten Sachverhalte abdeckt als auch den neuen, zuvor widersprüchlichen Sachverhalt erklärt.
- Die (vorläufig) beste Theorie ist die, die am besten geprüft ist, d.h. die am meisten falsifizierbare Aussagen macht, welche nicht falsifiziert worden sind.

Damit kennzeichnet Popper Wissenschaft als einen fortlaufenden akkumulativen Prozeß, in dem neue Theorien hervorgebracht, diese durch zahlreiche Experimente ausgetestet werden und schließlich durch neue Theorien erweitert werden, deren Anwendungsgebiet eine echte Obermenge des Gebiets der vorherigen bildet. Die Tätigkeit eines Wissenschaftlers stellt sich dar als das Bemühen, eine Theorie durch Überprüfung und Widerlegung zu erweitern.

Dieser Begriff der Wissenschaft ist in etwa der, der in wissenschaftlichen Lehrbüchern vermittelt wird, und es verwundert nicht, daß die von Popper vertretene Philosophie als *Kritischer Rationalismus* bezeichnet wird.

Eine Frage, die sich nun im Zusammenhang mit der historischen Betrachtung ergibt, ist die Folgende: Bestätigt die Wissenschaftsgeschichte (sie ist ja gewissermaßen die “experimentelle Überprüfung” der Wissenschaftstheorie) diese Theorie, oder sind rationale Rekonstruktion und Falsifikationismus ahistorisch? Wenn letzteres der Fall ist, kann der Falsifikationismus bestenfalls noch als Idealisierung angesehen werden und muß durch eine andere Theorie ersetzt werden.

Wir werden uns im folgenden mit den historischen Untersuchungen Kuhns beschäftigen, deren Ergebnis die oben genannten Vorstellungen von Wissenschaft revolutioniert. Dazu müssen wir aber zunächst einen aussagekräftigen Zeitraum der Wissenschaftsgeschichte - gewissermaßen als Musterbeispiel - betrachten.

3 Fallstudie: Vom aristotelischen zum newton-schen Weltbild

3.1 Die Physik in der Antike

Die Leistungen der antiken Denker bestehen vor allem in der zur damaligen Zeit revolutionären Überzeugung, die Welt lasse sich allein durch rationale Argumente ohne Zuhilfenahme mythischer Gestalten beschreiben und verstehen - eine Auffassung, die nach dem Untergang der hellenistischen Kultur in einem Zeitraum von über tausend Jahren erneut erarbeitet werden mußte und die auch heute noch in vielen Kulturen keine Selbstverständlichkeit darstellt. Diese “Wendung vom Mythos zum Logos” hat nach allgemeiner Auffassung⁷ ihren Anfang im Wirken von Thales von Milet (625 - 545 v. Chr.), der die Frage nach dem Urstoff alles Materiellen aufwarf und behauptete, dieser sei das Wasser. Es folgten darauf viele weitere Hypothesen von Philosophen, die sich mit Aufbau und Funktion der Welt auseinandersetzten, darunter z.B. die Atomlehre Demokrits (460 - 370 v. Chr.), die Bewegungsparadoxa der Eleaten und die Zahlenmystik der Pythagoräer, welche auch einen ersten Aufbau des Universums mit einer freischwebenden, beweglichen Erde diskutierten.

Die “griechische Explosion” fand ihren ersten Höhepunkt in dem Wirken der Philosophenlinie Sokrates-Platon-Aristoteles, wobei Sokrates (470 - 399 v. Chr.) durch seine kritische Methode und Platon (427 - 347 v. Chr.) durch seine Abstraktion und die Forderung nach der Vorherrschaft der Ideen hervorstach. Aristoteles’ (384-324 v. Chr.) einzigartige Leistung besteht vor allem in seiner umfangreichen Systematisierung und Beschreibung von Natur und Geisteswelt sowie ihrer Verbindungen. Mit seinen Werken wird erstmals die gesamte Denkweise der Antike in geordneter Form dargestellt. Wir wollen uns nun den Teil seiner Werke genauer ansehen, der die physikalische Beschreibung der Welt vornimmt, und dessen

⁷Hier und im folgenden wird auf Material aus [Sim86], [Ger92], [Dor96] und [DTV91] zurückgegriffen.

Inhalt fast zweitausend Jahre lang von höchster Autorität war.

3.1.1 Das aristotelische Weltbild: Die peripatetische Mechanik

Will man die peripatetische Mechanik⁸ verstehen, so sollte man zunächst versuchen, seine durch das newtonsche Weltbild geprägten Überzeugungen für einen Augenblick zu vergessen und sich gemäß obiger Vorstellung in die Lage eines kleinen Kindes versetzen, das die Ursache von Bewegungen ergründen will.

Beobachtet man nun die Natur, so erhält man den Eindruck, daß es Bewegungen gibt, denen eine äußere Ursache oder Fremdeinwirkung zugrundeliegt (z.B. eine Schubkarre, die sich bewegt, weil ein Mensch sie schiebt), und solche, die von selbst ablaufen (das Herunterfallen eines Gegenstandes). Beide Arten von Bewegungen haben jedoch im allgemeinen einen ruhenden Endzustand (die Schubkarre bleibt stehen, wenn der Mensch sie nicht mehr schiebt, der Gegenstand landet irgendwann auf dem Boden). Es liegt also nahe, Bewegung als einen kurzzeitigen Prozeß zu betrachten, der nach Verschwinden äußerer Einwirkung bzw. Erreichen eines natürlichen Endzustandes zum Erliegen kommt. Dies ist der Gedankengang der aristotelischen Mechanik: Zum Aufrechterhalten einer Bewegung ist entweder eine Kraft⁹ notwendig, oder die Bewegung folgt einem natürlichen Bestreben (Ein Stein fällt dabei z.B. durch die Luft auf die Erde, weil der natürliche Platz der Erde näher am Mittelpunkt der Welt ist, als der der Luft).

Es gibt jedoch eine Art der Bewegung, die unmittelbar beobachtbar ist und von anderer Qualität zu sein scheint: Die Bewegung der Himmelsgestirne, der Sonne, Planeten und Sterne. Hier scheint keine äußere Kraft zu wirken, die Bewegung ist gleichförmig und auf gewisse Weise wiederkehrend. Es ist nun kein großer Schritt, anzunehmen, daß die Bewegung der Gestirne sich fundamental von den Bewegungen auf der Erde unterscheidet und daß im Firmament eine andere physikalische Wirklichkeit vorherrscht: Den vier irdischen Elementen (Feuer, Luft, Wasser, Erde) wird bei Aristoteles ein himmlisches, die *quinta essentia*, gegenübergestellt, dessen natürliche Eigenschaft neben Unvergänglichkeit geometrische Aspekte wie die Bildung vollendeter Kugeln und das Umlaufen auf Sphären um den Weltmittelpunkt beinhaltet. (Wohl aufgrund ihrer abstrakten Klarheit wurde die Geometrie von den Griechen auf beispiellose Weise verehrt, weshalb sie die Welt nach allen Kräften auf geometrische Weise zu erklären versuchten.) Abb. 1 zeigt das aristotelische Weltbild im Überblick.

⁸Die Schule des Aristoteles wird auch peripatetische Schule genannt, vermutlich nach den Spazierwegen des Haines, in dem er bei Spaziergängen Wissen vermittelte (*περιπατοί*)

⁹Es ist dabei wichtig, daß mit dem Wort Kraft nicht der Kraftbegriff nach Newtonscher Vorstellung gemeint ist, auf die Problematik der Bedeutungsverschiebung bei physikalischen Begriffen kommen wir noch im 4. Kapitel zu sprechen.

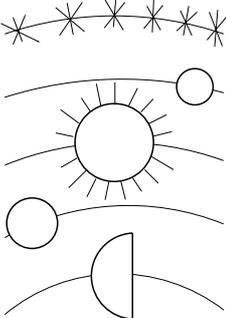
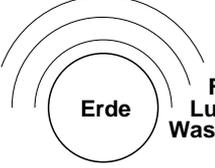
Kosmos abgeschlossen hierarchisch	Bewegung ein Prozeß, kein Zustand	Stoff stetig, nicht atomar
Alle Dinge haben ihren Platz, den sie ihrer Natur gemäß einzunehmen bestrebt sind		
 <p>Himmels- sphären, die von der Fix- sternsphäre eingeschlos- sen werden</p>	<p>Bewegung nach einer ewigen Harmonie: gleichförmige Kreisbewegung oder Resultierende aus gleichförmigen Kreisbewegungen</p>	<p>Unveränderlich, nicht entstehend und nicht vergehend: quinta essentia</p>
Himmlische Physik		
 <p>sublunare Welt</p> <p>Feuer Luft Wasser</p> <p>Erde</p>	<p>Natürliche Bewegung: schwere Körper streben nach unten, leichte nach oben</p> <p>Erzwungene Bewegung: zu jeder Bewegung gehört ein Bewegter, der mit dem Körper in unmittelbarem Kontakt stehen muß</p>	<p>Welt der Veränderungen, die sich aus der Mischung und Entmischung der Ur-elemente Erde, Wasser, Luft und Feuer ergeben</p>
Ein Vakuum ist sowohl physikalisch als auch begrifflich eine Unmöglichkeit		

Abbildung 1: Die Charakteristika des aristotelischen Weltbildes (nach [Sim86])

3.1.2 Die ptolemäische Beschreibung der Astronomie

Die Physik des Aristoteles beschrieb zwar die Prinzipien, nach denen die Himmelsmechanik funktionieren sollte, für die Praxis konnten die Kreisbahnen der Himmelskörper allerdings lediglich für Sonne, Mond und die Fixsternsphäre festgestellt werden. Die Bewegung der Planeten war aber, da sie sich nach dem newtonschen Bild in Ellipsen um die Sonne bewegen, aus Sicht der Erde komplizierter. Um, wie sich Platon ausdrückt, die "Erscheinungen zu retten"¹⁰, bedurfte es, wollte man das geozentrische Weltbild nicht verwerfen, einiger Korrekturen. Schon Eudoxos (400 bis 347 v. Chr.), ein Freund von Platon hatte ein Sphärenmodell entwickelt (s. Abb. 2), das die teilweise scheinbar rückläufigen Bewegungen der Planeten mit Hilfe einer Art Fourier-Analyse durch zusammengesetzte Kreisbahnen zu erklären versuchte.

Für die Praxis der Astronomen setzte sich jedoch das mit der gemessenen

¹⁰Dieses Zitat ist in Bezug auf das 4. Kapitel interessant.

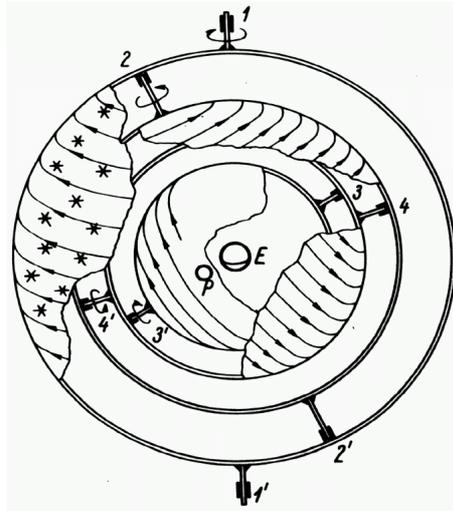


Abbildung 2: Der Kosmos nach Eudoxos: Die Schleifen der Planetenbewegung wird durch gegenläufige Drehung der Sphären erreicht ([Sim86]).

Wirklichkeit am genauesten übereinstimmende Modell des Ptolemäus (90 - 160 n. Chr.) durch, dessen Werk *Almagest* fast anderthalbtausend Jahre den Ansprüchen der Astronomen, Kalendermacher und Astrologen genügte.

Ptolemäus beschreibt die Bewegung der Planeten hierin durch zusammengesetzte Kreisbewegungen unter Verwendung von Epizykeln und Äquanten (s. Abb. 3). Letztere bezeichnen dabei Bewegungen, die auf Kreisen laufen, deren Winkelgeschwindigkeit jedoch gegenüber einem anderen Kreismittelpunkt konstant bleibt - eine Konstruktion, die vielen Anhängern der platonischen Forderung nach natürlicher Harmonie Unbehagen bereitete.

Wichtig ist es, zu bemerken, daß es neben dem damals vorwiegend anerkannten geozentrischen Weltbild auch ein heliozentrisches Modell gab, das auf Aristarchos von Samos (um 270 v. Chr.) zurückgeht, dieser hatte vermutlich aufgrund seiner Versuche zur Bestimmung des Sonnendurchmessers erkannt, daß die Sonne aufgrund ihrer Größe im Mittelpunkt des Planetensystems stehen müsse.

3.2 Mittelalter: Aufarbeitung und Verfeinerung des antiken Erbes

Das Mittelalter war wissenschaftlich gesehen vor allem durch die Vorherrschaft der Theologie geprägt, der sich nach dem damaligen Kulturverständnis die Naturphilosophie (als *ancilla theologiae*, "Magd der Theologie") unterzuordnen hatte. Mit der Rezeption und Aufarbeitung der antiken Werke, die sich teils auf Umwegen über die arabische Welt vollzog, entstand die Frage, ob man beim Auffinden von Wahrheiten der Vernunft oder dem Glauben Vorrang zu geben habe. Als

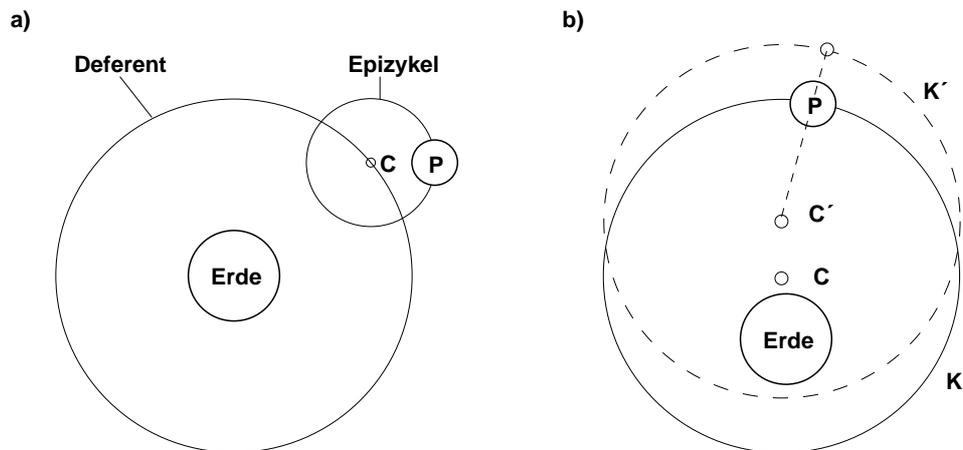


Abbildung 3: Elemente der ptolemäischen Astronomie: a) Epizykel: Der Planet P läuft auf einem Kreis um C , welcher seinerseits um die Erde kreist. b) Äquanten: der Planet P kreist um den Mittelpunkt C , hat aber bezüglich C' eine konstante Winkelgeschwindigkeit.

Vertreter der Vernunft wurde dabei vor allem Aristoteles angesehen, die christlichen Lehren wurden neben der Bibel vor allem auf die Werke des Augustinus (354-430 n. Chr.) gestützt. An Abb. 4 läßt sich gut erkennen, wie die Berufung auf Autoritäten die Schlußweise der Scholastiker beeinflusste.

Die irdische Physik wurde dabei weiterhin untersucht, und es wurde erstmals versucht, den qualitativen Überlegungen Aristoteles' quantitative Beschreibungen hinzuzufügen. Darunter fallen die Untersuchungen zur beschleunigten Bewegung von Nicole d'Oresme († 1382) und die Impetustheorie von Jean Buridan († 1358), die die Bewegung eines abgeworfenen Körpers beschreibt: Anders als in der aristotelischen Sicht, die beispielsweise den Flug eines Pfeiles dadurch zu erklären versucht, daß die Luft um den Pfeil herum beim Abschuß mitbeschleunigt wird und diese während des Fluges die Bewegung aufrechterhält (Fernwirkungen waren nach Aristoteles nicht möglich), sollte nun nach Buridan dem Körper ein Impetus (Schwung) übergeben werden, der durch den Widerstand der Luft aufgebraucht wird. Man kann dies nach heutiger Sicht durchaus mit der kinetischen Energie oder dem Impuls eines fliegenden Körpers vergleichen.

Die himmlische Physik des Aristoteles und die Astronomie des Ptolemäus wurden im Mittelalter dagegen nur wenig erweitert, hier wurden wesentliche Fortschritte in der Denkweise erst wieder durch Kopernikus formuliert.

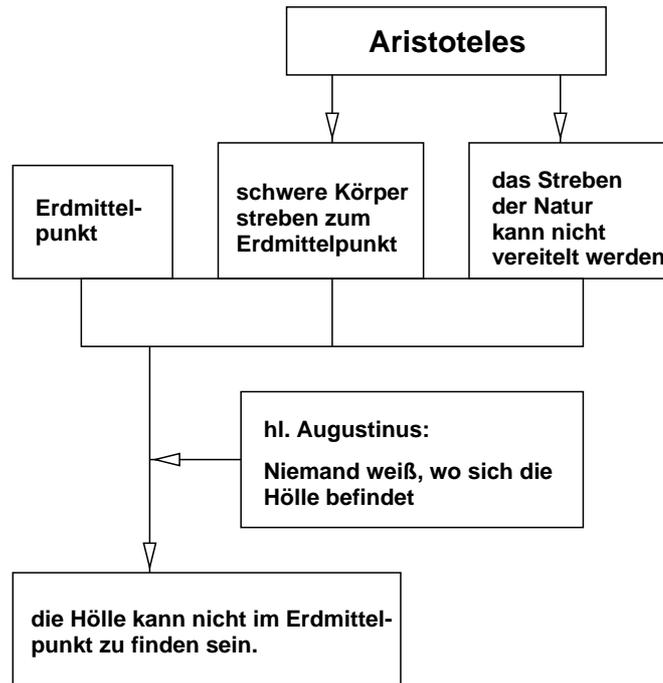


Abbildung 4: Die Schlußweise zu Zeiten der Scholastik: Thomas von Aquin beantwortet die Frage, ob die Hölle sich im Mittelpunkt der Erde befindet (nach [Sim86]).

3.3 Die frühe Neuzeit: Kopernikus, Kepler, Galilei, Descartes

Nikolaus Kopernikus (1473 - 1543) ist in seinen Studienjahren sehr wahrscheinlich mit den Auffassungen des Aristarchos von Samos konfrontiert worden. Da ihm das ptolemäische System bezüglich einer platonischen harmonischen Weltsicht nicht zusagte (es war vor allem die Einführung der Äquanten, also die Abkehr von reinen Kreisbahnen, die ihm nicht behagte), stellte er in seinem Werk *de revolutionibus orbium coelestium* die Hypothese eines heliozentrischen Weltbildes auf, in dem sich die Planeten in Kreisbahnen um die Sonne bewegen. Interessant ist dabei sicherlich die Argumentation Kopernikus': Er beschrieb sein Werk, das erst kurz vor seinem Tode veröffentlicht wurde, als eine Möglichkeit der Darstellung unter vielen, mathematisch äquivalent zu einem vereinfachten ptolemäischen geozentrischen Weltbild. Lediglich aus Gründen der Ästhetik und Einfachheit und unter Berufung auf antike Ideen verteidigt er seine Sicht. Es ist weiterhin zu bemerken, daß das kopernikanische System rechnerisch und in Bezug auf die Praxis keinen Vorteil brachte, was darauf beruht, daß die Planeten auf Ellipsenbahnen laufen, und Kopernikus ebenso wie Ptolemäus auf Ausgleichsepizykeln zurückgreifen mußte, um den Messungen zu entsprechen.

Das kopernikanische System hat daher zunächst lediglich in philosophischen Kreisen Resonanz gefunden (z.B. bei Giordano Bruno (1548 - 1600)), während die Astronomen weiterhin dem ptolemäischen Weltbild und ihrer Verfeinerung durch die genauen Messungen Tycho Brahes (1546 - 1601) anhängen.

Erst durch Brahes Schüler Johannes Kepler (1571 - 1630), der anhand der ihm vorliegenden genauen Daten und seines mathematischen Talents die noch heute in der Schule gelehrtens Keplerschen Gesetze entdeckte, wurde die kopernikanische Idee weiterentwickelt. Kepler brachte dabei seine Forschungen mit der Zahlenmystik der Pythagoräer und der platonischen Lehre von der Weltharmonie in Einklang. Trotz dieser - bei Kopernikus z.B. eher hinderlichen - Sichtweise war er ein genauer Beobachter und nahm die Meßergebnisse sehr ernst. Kepler suchte auch nach den physikalischen Prinzipien der Bewegungen der Himmelskörper (er vermutete einen Zusammenhang zu dem durch Gilbert (1544 - 1603) beschriebenen Phänomen des Erdmagnetismus), konnte sie letztlich aber nicht erklären, so daß sich Newton schließlich dieser Aufgabe annahm.

Der wohl populärste Konflikt zwischen dem aristotelischen Weltbild und der neuzeitlichen Physik entstand durch die Veröffentlichungen Galileo Galileis (1564 - 1642). Im *Dialogo*, eine von ihnen, rechnete er vor allem mit dem geozentrischen System und der Unterscheidung von himmlischer und irdischer Physik ab. Infolge seiner Äußerungen unter Hausarrest gestellt, verfaßte er die *Discorsi*, das zweite wichtige Werk, in dem er seine Untersuchungen zur Bewegungslehre veröffentlichte. Seine kinematischen Untersuchungen zum freien Fall mit Hilfe der schiefen Ebene stellen dabei einen entscheidenden Punkt in der Hinwendung zur modernen experimentellen Überprüfung von Theorien dar.

Die von Galilei praktizierte Methode wird dabei von den Philosophen René Descartes (lat. Cartesius, 1596 - 1650) und Francis Bacon (1561 - 1626) in ihren Werken über das wissenschaftliche Vorgehen bei der Wahrheitsfindung mit einer theoretischen Basis versehen. Descartes schuf auch seinerseits ein eigenes Weltbild, mit dem er das aristotelische abzulösen gedachte. In diesem Weltbild sollte die himmlische und irdische Physik gleichen Gesetzmäßigkeiten gehorchen und die Bewegung der Himmelsgestirne durch die Verwirbelungen eines allgegenwärtigen Äthers plausibel gemacht werden. Überhaupt war es das Ziel Descartes, jedes physikalische Phänomen auf eine Korpuskularmechanik zu reduzieren, in der es keine Fernwirkung, sondern lediglich durch Stöße übertragene Kräfte geben sollte. Diese Auffassung wurde auch von Huygens, einem herausragenden Experimentator wie Theoretiker verfolgt. Newton versuchte zunächst ebenfalls, die vom Standpunkt der Einfachheit reizvolle Forderung nach der Reduktion jeglicher Phänomene auf die Korpuskularmechanik in seine Theorien aufzunehmen, die Erscheinungen widersprachen diesem aber, so daß er die Gravitationskraft als gegeben und nicht weiter erklärbar postulieren mußte. Der von Descartes eingeschlagene Weg wird jedoch trotzdem für die moderne Physik als sehr wichtig angesehen, da er die

heute geläufige rationale Denkweise begründete.

3.4 Newton: Vereinigung von irdischer Mechanik und Himmelsmechanik

Um das durch die zahlreichen Angriffe brüchig gewordene aristotelische Weltbild nun vollends durch ein moderneres Weltbild zu ersetzen, mußten im wesentlichen die Ansätze von Kepler zur Himmelsmechanik mit den Ergebnissen Galileis zur irdischen Mechanik verbunden werden, wobei den jeweils kinematischen Beschreibungen der vormals getrennten Bereiche eine gemeinsame Physik zugrundegelegt werden mußte. Dies gelang bekanntermaßen Isaac Newton (1642 - 1727), dessen 1687 erschienenen *Philosophiae naturalis principia mathematica* vielfach als das bedeutendste Werk in der Wissenschaftsgeschichte überhaupt angesehen werden. In diesem stellt er zunächst seine bekannten drei Axiome auf und leitet aus ihnen im folgenden die Kraft her, die notwendig ist, um einen Körper auf einer Kreisbahn zu halten. Newton nimmt dann an, daß die Gravitationskraft genau diese Zentripetalkraft ist, die z.B. die Planeten auf ihrer Bahn um die Sonne hält. Mit Hilfe des dritten Keplerschen Gesetzes, das die Quadrate der Umlaufzeiten proportional zu den Kuben der Umlaufzeiten setzt, erhält er nun die reziprok quadratische Abhängigkeit von der Entfernung und damit das Gravitationsgesetz. Experimentell überprüft er seine Theorie durch Messung der Gravitationskraft auf der Erde mittels eines Pendels und der Berechnung der Kraft, die notwendig ist, den Mond auf seiner Bahn zu halten.

Die Tatsache, das dieses Vorgehen heute das übliche im Schulunterricht der Oberstufe ist, verschleiert, welche Genialität und Anstrengungen notwendig waren, um ein komplettes, stimmiges Weltbild zu schaffen, in dem sämtliche vorangehenden Entdeckungen eine theoretische Grundlage bekamen, die den vorhergehenden Vorstellungen radikal widersprach. Allein die Tatsache, daß Newton zur Entwicklung seiner Theorie, die Infinitesimalrechnung, den Grundstock der modernen Analysis, erfinden mußte, macht den gewaltigen Fortschritt deutlich, den sein Werk bedeutet.

Dieser kurze Blick in die Wissenschaftsgeschichte ist bereits eine stark vereinfachte Sicht der Entwicklung, macht aber dennoch klar, daß eine Wissenschaftstheorie, die den wissenschaftlichen Fortschritt ohne Berücksichtigung der historischen Gegebenheiten beschreibt, es schwer hat, den Fakten gerecht zu werden. Deshalb soll im folgenden mit Kuhns Wissenschaftstheorie ein historisch fundierter Ansatz vorgestellt und mit der rationalistischen Theorie verglichen werden.

4 Die Kuhnsche Wissenschaftstheorie

War das Vorgehen Kopernikus' nach rationalen Gesichtspunkten wissenschaftlich? Aus heutiger Sicht sicherlich nicht, da er nach platonischem Vorbild weiterhin Kreisbahnen forderte, für die es keine experimentelle Bestätigung gab. Zudem unterschied sich sein geozentrisches Modell nach Hinzunahme von Ausgleichsepizykeln hinsichtlich der Komplexität vom ptolemäischen nicht mehr sonderlich (s. Abb. 5).

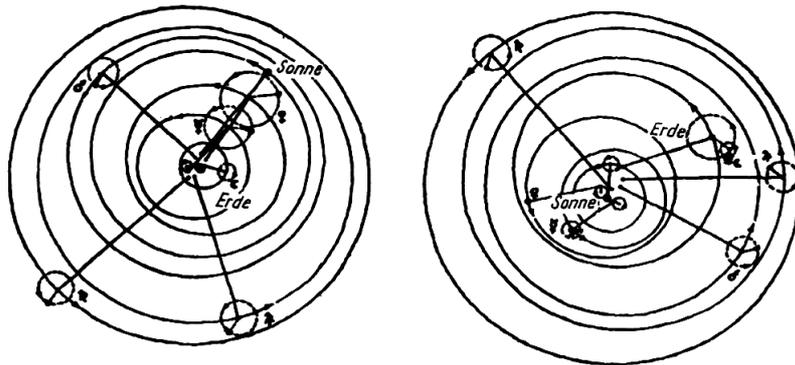


Abbildung 5: Vergleich zwischen ptolemäischen (links) und kopernikanischen Weltbild (rechts) bei Hinzunahme von Epizykeln ([Sim86]).

Die von Kopernikus gewünschte Einfachheit und Ästhetik ergab sich also nur für ein System, das die gemessene Wirklichkeit nicht beschrieb. Dazu folgten innerhalb des aristotelischen Weltbildes aus einem nicht geozentrischen System weitere Ungereimtheiten: Wieso suchten Gegenstände ihren natürlichen Platz im Erdmittelpunkt, wenn dieser nicht mit dem Mittelpunkt des Kosmos zusammenfiel? Wieso bemerkte man die Bewegung der Erde nicht? Das Trägheitsgesetz hätte zur Beantwortung dieser Frage hinzugezogen werden müssen, es war jedoch noch nicht formuliert. Kopernikus konnte die aristotelische Theorie nicht nach dem falsifikationistischen Prinzip um ein heliozentrisches Weltbild erweitern, da dies zu obigen Widersprüchen geführt hätte. Erst Newton konnte das aristotelische Weltbild als Ganzes verwerfen und durch ein neues ersetzen, dies wäre ihm jedoch ohne die Voruntersuchungen Kopernikus', Keplers und Galileis unmöglich gewesen, wobei diese ihrerseits wiederum auf das aristotelische Weltbild als Grundlage ihrer Forschungstätigkeit angewiesen waren.

Die Kopernikanische Wende¹¹ ist nach Kuhn ein Standardbeispiel für einen *Paradigmenwechsel*: Das Paradigma des aristotelischen Weltbildes wird solange beibehalten, bis die experimentellen Befunde ihm derart stark widersprechen, daß

¹¹Es ist interessant, daß aufgrund des vorher Gesagten vielfach eher von einer galileisch-cartesischen ([Dor96]) bzw. galileisch-keplerschen Wende ([Rom74]) die Rede ist.

es durch ein neues Weltbild abgelöst werden muß, wobei der Übergang mehrere Zeichen einer Revolution trägt. Wir wollen nun die Begriffe der Kuhnschen Wissenschaftstheorie genauer erläutern.

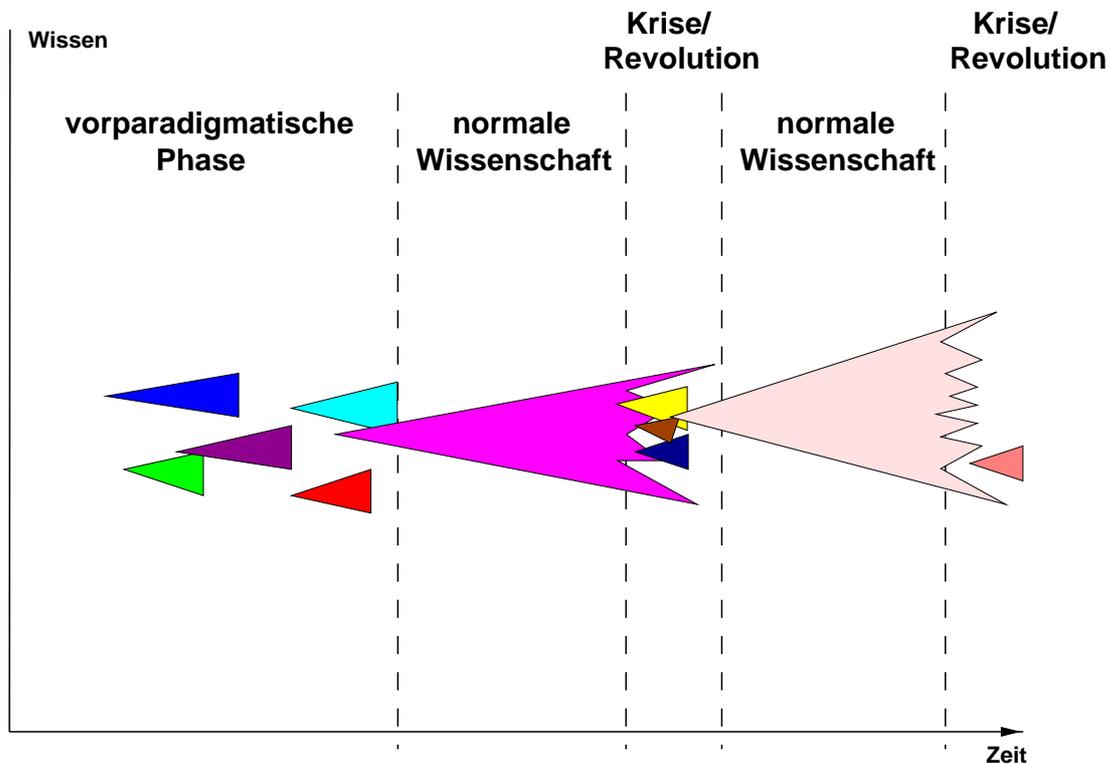


Abbildung 6: Die verschiedenen Phasen im Fortschritt der Wissenschaft nach Kuhn

4.1 Paradigmen und normale Wissenschaft

4.1.1 Normale Wissenschaft

Betrachtet man die Naturphilosophie der Griechen in der Zeit vor Aristoteles, so findet man zahlreiche Beschreibungen von Aufbau und Verhalten der Natur, wobei viele der Beschreibungen miteinander konkurrieren (z.B. “Das Seiende ist unbeweglich, Bewegung ist Täuschung” (Eleaten) und “Alles fließt und nichts bleibt” (Heraklit)). Eine solches Nebeneinander zahlreicher Theorien wird nach Kuhn als *vorparadigmatische Wissenschaft* bezeichnet. Diese charakterisiert eine Periode, in der es noch keine einheitliche Lehrmeinung darüber gibt, innerhalb welchen Modells Forschung voranzuschreiten habe. Lernt dagegen heutzutage ein Student oder Schüler eine bestimmte Naturwissenschaft, so wird ihm in der Regel

unabhängig von seinen speziellen Lehrern und Lehrbüchern ein bestimmtes Bild dieser Wissenschaft vermittelt; Kuhn würde sagen, er wird in die Paradigmen der jeweiligen wissenschaftlichen Gemeinschaft eingearbeitet.

Ein solches Paradigma wurde z.B. geschichtlich durch die Werke des Aristoteles eingeführt, die durch ihre systematische Abhandlung und den Aufbau eines Weltbildes den Respekt der folgenden Forschergenerationen erwarb. Was unterscheidet nun die Forschung innerhalb eines Paradigmas, die sogenannte *normale Wissenschaft* (im Sinne von wissenschaftlicher Tätigkeit innerhalb einer bestimmten Norm) von der vorparadigmatischen Phase einer Wissenschaft?

Die normale Wissenschaft bietet der Forschung einen klaren Rahmen, wodurch bestimmte Fragestellungen sich gegenüber anderen hervorheben (z.B. wurde durch die Forderung nach geometrischen, wiederkehrenden Bahnen für die Himmelskörper die geometrische Beschreibung dieser Bahnen zu einem wichtigen Ziel; nicht zu untersuchen - und damit für Forscher uninteressant - war dagegen die Frage, *warum* die Himmelskörper auf diesen Bahnen laufen, dies wurde durch das Paradigma vorgegeben). Dadurch kann ein einzelner Forscher sich auf eine innerhalb dieses Paradigmas gestellte Frage konzentrieren und Ergebnisse ausarbeiten - Kuhn bezeichnet dieses Vorgehen als das Lösen von *Rätseln*, die das Paradigma stellt. Die so ermittelten Ergebnisse - und dies ist das zweite wichtige Charakteristikum - sind nun innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft weiterverwendbar, da das Paradigma eine einheitliche Verständigungsbasis schafft, ja die wissenschaftliche Gemeinschaft wird gewissermaßen erst durch ein gemeinsames Paradigma *gebildet*.

Dies alles hat zur Folge, daß das Entstehen einer normalen Wissenschaft durch die Systematisierung des Fachgebiets mit der Möglichkeit zur Spezialisierung einerseits und die Bündelung der Kräfte andererseits zu einem großen Gewinn an Effektivität im wissenschaftlichen Fortschritt gegenüber der vorparadigmatischen Wissenschaft führt. Oder wie Francis Bacon pointiert bemerkt hat: "Die Wahrheit geht viel leichter aus einem Irrtum als aus der Verwirrung hervor."

Ein Beleg dafür sind z.B. die Berechnung der Himmelskörperbahnen durch Ptolemäus, welche einen gewaltigen Fortschritt in der Astronomie bedeutete. Es war nur durch die zugrundegelegte Physik des Aristoteles möglich, die zu diesem Zeitpunkt schon gemeinhin akzeptiert war, daß Ptolemäus sich auf die Details seiner Berechnungen konzentrieren konnte und nicht erneut die Fragen nach den Grundlagen des Kosmos beantworten mußte¹². Ebenso kann die These des Thales, daß die Welt sich allein mit Mitteln der Vernunft erklären läßt, als Paradigma der Wissenschaft schlechthin betrachtet werden, innerhalb dessen sich alle Wissenschaftler bewegen, wenn sie z.B. metaphysische und emotionale Aspekte aus ihren Untersuchungen auszuklammern versuchen.

¹²[Sim86]: S. 98

4.1.2 Der Begriff des Paradigmas

Da der Begriff des Paradigmas, wie Kuhn ihn in seinen Ausführungen benutzt, einiges an Verwirrung erzeugt hat, ist es wichtig, seine Bedeutung(en) enger zu fassen¹³. Das Wort Paradigma ist nach Kuhn von zweifacher Bedeutung. Zum ersten kennzeichnet er die Paradigmen in engem Bedeutungszusammenhang mit dem Begriff der wissenschaftlichen Gemeinschaft als deren konstituierende Elemente, wobei zunächst noch unerwähnt bleiben soll, was diese genau sind. (Man erkennt, daß die Kuhnsche Wissenschaftstheorie damit eine starke soziologische Komponente erhält, was sie von der logisch orientierten Wissenschaftstheorie seiner Vorgänger scharf abgrenzt¹⁴.)

Die zweite Bedeutung des Paradigmas lehnt sich an an die wörtliche Übersetzung des Musterbeispiels. Es läßt sich genauer bezeichnen als mustergültiges Vorgehen bei der Lösung eines speziellen Problems. Betrachtet man nämlich ein Lehrbuch der Physik, so wird im allgemeinen die Mächtigkeit einer Theorie durch einige Lösungsbeispiele belegt, z.B. die Berechnung des Mondbahnradius aus der Erdmasse als Anwendungsbeispiel für die Newtonsche Mechanik oder die Lösung von Randwertaufgaben mit Hilfe der Maxwellschen Gleichungen in der Elektrodynamik.

Das praktische Erlernen einer Wissenschaft besteht nach Kuhn nun vor allem in dem Lösen von Übungsaufgaben, deren Ähnlichkeit mit dem Musterbeispiel vom Studenten oder Schüler herausgearbeitet werden muß, um die Aufgabe selbständig zu lösen.

Die Gleichsetzung der ersten Bedeutung des Paradigmas mit der zweiten durch Kuhn zeigt, daß die konstituierenden Elemente der Wissenschaftler vor allem in ihrer gemeinsamen Ausbildung durch Adaption von Musterbeispielen zu finden sind.

4.2 Anomalien und Krisen in der Wissenschaft

4.2.1 Anomalien und die Reaktion der Wissenschaftler

Wenn von den Paradigmen eine so starke Bindung der Wissenschaftler ausgeht, wie dies oben beschrieben ist, dann erscheint die Frage bedeutsam, wie experimentelle Befunde, die den Vorhersagen der Paradigmen widersprechen, - sogenannte Anomalien - von Wissenschaftlern behandelt werden.

Untersucht man diese Frage jedoch genauer, so fällt auf, daß es nicht ohne weiteres möglich ist, experimentelle Tatsachen eindeutig als einer Theorie widersprechend zu erklären. So konnte man zunächst hoffen, die Ungenauigkeiten der ptolemäischen Planetenbahnbeschreibung durch die Erhöhung der Anzahl von

¹³[Ku69]: Postskriptum, [Ku78]: *Neue Überlegungen zum Begriff des Paradigmas*

¹⁴Kuhn selbst hat sich in dem Aufsatz *“Logik oder Psychologie der Forschung?”* ([Ku78]) ausführlich mit der Gegenüberstellung von seinen und Poppers Thesen befaßt.

Ausgleichskreisen in den Griff zu bekommen, dem ähnlich war die Beschreibung fliegender Körper innerhalb der aristotelischen Physik durch Einführung des *virtus movens*, der bewegten Luft um den Körper, die die Geschwindigkeit aufrecht erhält.

Weiterhin würde ein Wissenschaftler, der im Rahmen eines bestimmten Paradigmas Messungen durchführt, bei einem unerwarteten Ergebnis lange zögern, bevor er die absoluten Grundlagen seines Tuns - und nichts anderes stellt das Paradigma aufgrund seiner jahrzehntelangen Ausbildung in diesem dar - angreift. Es wäre nämlich für den wissenschaftlichen Betrieb kontraproduktiv, bei der Unfähigkeit, ein Rätsel zu lösen, dem Rätsel, bzw. dem Paradigma, welches das Rätsel formuliert, die Schuld zuzuschreiben.

Der nach Kuhn bezeichnende Spruch "Das ist ein schlechter Zimmermann, der seinem Werkzeug die Schuld gibt." beschreibt das Dilemma, in der sich ein Wissenschaftler im Ansehen seiner Kollegen befindet, wenn er zu einem Problem keine Lösung angeben, sondern nur die Grundlagen seines bisherigen Vorgehens in Frage stellen kann.

Ein ähnliches Szenario im Umgang mit Anomalien entwirft Imre Lakatos (der sich als Rationalist in der Nachfolge Poppers zu Kuhns Thesen ansonsten eher kritisch äußert) pointiert in [Lak74]:

“Die Geschichte betrifft einen imaginären Fall planetarischer Unart. Ein Physiker in der Zeit vor Einstein nimmt Newtons Mechanik und sein Gravitationsgesetz N sowie die akzeptierten Randbedingungen A und berechnet mit ihrer Hilfe die Bahn eines eben entdeckten kleinen Planeten p . Aber der Planet weicht von der berechneten Bahn ab. Glaubt unser Newtonianer, daß die Abweichung von Newtons Theorie verboten war und daß ihr Beweis die Theorie N widerlegt? - Keineswegs. Er nimmt an, daß es einen bisher unbekanntem Planeten p' gibt, der die Bahn von p stört, Er berechnet Masse, Bahn etc. dieses hypothetischen Planeten und ersucht dann einen Experimentalastronomen, seine Hypothese zu überprüfen. Aber der Planet p' ist so klein, daß selbst das größte vorhandene Teleskop ihn nicht beobachten kann: Der Experimentalastronom beantragt einen Forschungszuschuß um ein noch größeres Teleskop zu bauen. In drei Jahren ist das Instrument fertig. Wird der unbekannte Planet p' entdeckt, so feiert man diese Tatsache als einen neuen Sieg der Newtonschen Wissenschaft. - Aber man findet ihn nicht. Gibt unser Wissenschaftler Newtons Theorie und seine Idee des störenden Planeten auf? Nicht im mindesten! Er mutmaßt nun, daß der gesuchte Planet durch eine kosmische Staubwolke vor unseren Augen verborgen wird. Er berechnet Ort und Eigenschaften dieser Wolke und beantragt ein Forschungsstipendium, um einen Satelliten zur Überprüfung seiner Berechnungen abzuschicken. Vermögen die Instrumente des Satelliten (darunter völlig

neue, die auf wenig geprüften Theorien beruhen) die Existenz der vermuteten Wolke zu registrieren, dann erblickt man in diesem Ergebnis einen glänzenden Sieg der Newtonschen Wissenschaft. Aber die Wolke wird nicht gefunden. Gibt unser Wissenschaftler Newtons Theorie, seine Idee des störenden Planeten und die Idee der Wolke, die ihn verbirgt auf? - Nein! Er schlägt vor, daß es im betreffenden Gebiet des Universums ein magnetisches Feld gibt, das die Instrumente des Satelliten gestört hat. Ein neuer Satellit wird ausgesandt. Wird das magnetische Feld gefunden, so feiern Newtons Anhänger einen sensationellen Sieg. Aber das Resultat ist negativ. Gilt dies als eine Widerlegung der Newtonschen Wissenschaft? - Nein. Man schlägt entweder eine neue, noch spitzfindigere Hypothese vor, oder ... die ganze Geschichte wird in den staubigen Bänden der wissenschaftlichen Annalen begraben, vergessen und nie mehr erwähnt."

Dieses Szenario mag auf den ersten Blick absurd erscheinen, bei genauerer Betrachtung jedoch zeigt es genau das wissenschaftstheoretische Dilemma, nach dem eine Anomalie nach objektiven Gesichtspunkten nicht klar zu definieren ist - wodurch ein weiteres Argument gegen eine rein falsifikationistische Sicht geliefert wird.

4.2.2 Das Entstehen von Krisen

Aus den Beispielen dürfte klar werden, daß einzelne Anomalien im allgemeinen mit dem Hinweis auf die Unzulänglichkeiten der Messung oder die Nichtberücksichtigung aller Effekte zurückgewiesen werden können. So reagiert die wissenschaftliche Gemeinschaft im allgemeinen auch eher gelassen auf das Auftreten von Anomalien und stellt diese Probleme zurück bis genauere Messungen, ein fortgeschrittenerer mathematischer Apparat oder weiterführende Ergebnisse aus Nachbargebieten vorliegen. Ein Vorgehen, wie man es häufig in der angewandten Mathematik vorfindet und das in vielen Fällen - wenn auch manchmal erst nach längerer Zeit (z.B. die Lösung der Fermatschen Vermutung oder des Vierfarben-Problems) - belohnt wird.

Manchmal kann eine Anomalie aber auch zu einer Krise in der zugehörigen Wissenschaft führen. Dafür gibt es mehrere mögliche Gründe: Zum einen kann sich eine Anomalie wiederholt vielversprechenden Eingliederungsversuchen widersetzen, wie dies z.B. bei der Beschreibung des Lichts als Welle und Korpuskel in der klassischen Physik geschehen ist. Zum anderen kann eine Theorie durch adhoc-Modifikationen, derart unhandlich werden, daß für einen geringen Zuwachs an Exaktheit ein hohes Maß an Komplexitätszuwachs notwendig ist. Dies geschah z.B. Ende des Mittelalters mit der aristotelischen irdischen Physik und der ptolemäischen Astronomie, deren Modifikationen an einer Stelle zumeist Widersprüche an anderen Stellen hervorriefen, wodurch die Theorie erneut nachgebessert werden mußte.

Dazu können auch äußere Umstände den Brennpunkt des Interesses auf eine Anomalie lenken. Zu diesen zählen häufig wirtschaftliche Bedürfnisse, denen die wissenschaftlichen Ergebnisse als Grundlagen dienen, von der Forderung der Kalendermacher und Astrologen zur Zeit des Kopernikus nach einer genaueren Astronomie bis zur Erkenntnis, daß die moderne Informationstechnologie dringend Ergebnisse aus der Informatik und Physik benötigt.

Wie äußert sich nun eine Krise in einer Wissenschaft? Da durch die Anomalie die Autorität des Paradigmas untergraben wurde, werden nun die vormals strikten Regeln der normalen Wissenschaft aufgeweicht. Es tauchen häufig mehrere konkurrierende Ansätze auf, die das Problem zu lösen versuchen. Dieser Zustand, den Kuhn im Gegensatz zur normalen Wissenschaft als *außerordentliche Wissenschaft* bezeichnet, gleicht in vielerlei Hinsicht der vorparadigmatischen Periode einer Wissenschaft, mit dem Unterschied, daß das Gebiet der Betrachtungen durch das Versagen des Paradigmas auf diesem klar eingegrenzt ist. Die entstehende Verwirrung wird aber anders als zu vorparadigmatischen Zeiten von den paradigmatisch geschulten Wissenschaftlern als sehr unangenehm empfunden. So schrieb z.B. Kopernikus:

“[Die Astronomen waren]... so im Ungewissen, daß sie die ewige Größe des vollen Jahres nicht abzuleiten und zu beobachten vermögen ... sondern es erging ihnen so, als wenn jemand von verschiedenen Orten her Hände, Füße, Kopf und andere Körperteile, zwar sehr schön, aber nicht in der Proportion eines bestimmten Körpers gezeichnet, nähme und, ohne daß sie sich irgendwie entsprächen, mehr als ein Monstrum als einen Menschen daraus zusammensetzte.”

Und Wolfgang Pauli wünschte zur Zeiten der Wirren um die Quantenmechanik, er wäre “Filmschauspieler oder etwas Ähnliches und hätte von der Physik nie etwas gehört”.

Angesichts der wachsenden Ratlosigkeit in der Wissenschaft werden die Ansätze zur Lösung der Anomalie mit dem Fortschreiten der Krise in Bezug auf das alte Paradigma immer kühner. Dies läßt sich erneut am Beispiel der Astronomie belegen: Kopernikus nimmt trotz seines heliostatischen Weltbildes weiterhin Kreisbahnen für die Planeten an. Kepler fordert lediglich Ellipsen, bleibt aber der platonischen Überzeugung treu und Descartes und Newton schließlich brechen vollständig mit der antiken Tradition und suchen nach Erklärungen auf tiefer liegenden Ebenen. Der Angriff auf die Fundamente eines Paradigmas erfolgt dabei letztlich, wenn alle vorhergehenden Versuche, die Anomalie auf höherer Ebene in den Griff zu bekommen, gescheitert sind. Es vollzieht sich dann ein Prozeß, der alle Kennzeichen einer Revolution trägt.

4.3 Revolutionen und Wandlung des Weltbildes

4.3.1 Die Struktur einer wissenschaftlichen Revolution

Was geschieht bei einer Revolution? Eine bestehende Institution wird durch eine neue ersetzt, wobei sich der Übergang nicht innerhalb der durch die Institution festgelegten Regeln vollzieht, sondern durch äußere Faktoren wie Propaganda oder Gewalt entschieden wird. Dies ist auf den Wechsel eines wissenschaftlichen Paradigmas übertragbar; wir wollen die Parallelen genauer untersuchen.

Wie im politischen Bereich ist der Ausgangspunkt einer wissenschaftlichen Revolution für gewöhnlich eine Krise, in der eine wachsende Anzahl von Individuen spürt, daß die vorherrschende Institution nicht in der Lage ist, die - meist durch sie selbst geschaffene - Situation in den Griff zu bekommen. Der zunehmende Verfall der Autorität läßt daraufhin den Grundkonsens der Gemeinschaft schwinden und eröffnet neuen Ideen Spielraum, wobei jedes Individuum für sich entscheiden muß, ob es weiterhin der alten Institution anhängen oder an der Errichtung einer neuen teilhaben will. Dabei ist klar, daß diese Ziele nicht miteinander vereinbar sind, und sich die gebildeten Teilgruppen demzufolge bekämpfen. Der Streit zwischen der Kirche als Vertreter der ersten Gruppe und Galilei als Vertreter der zweiten Gruppe konnte nicht mit einem Kompromiß enden, bei dem beide Seiten ihr Ziel erreichten. Ebenso waren die Argumentationen in diesem Streit nicht miteinander vereinbar, da sie zu verschiedenen Paradigmen gehörten. Die Berufung auf die aristotelisch geprägte Scholastik der Kirche war in den Augen Galileis ebensowenig eine gültige Argumentationsweise, wie die mathematischen Berechnungen und experimentellen Befunde Galileis in den Augen der Kirche. Der letzte Punkt ist von besonderer Wichtigkeit für die Kuhnsche Wissenschaftstheorie, da hierin ein starker Reibungspunkt zu der vorher üblichen Sichtweise der Wissenschaft besteht: Es gibt *keine* Möglichkeit, wissenschaftlich über die Vorzüge einer Theorie gegenüber einer anderen zu argumentieren. Dies ist deshalb der Fall, weil die Paradigmen eine unterschiedliche Auffassung vom Begriff der Wissenschaftlichkeit beinhalten. Kuhn bezeichnet das Verhältnis der jeweiligen Argumentationen als "inkommensurabel", also als nicht mit gleichem Maß meßbar. Dazu zwei Beispiele:

- Schon die Eleaten hatten in bewundernswerter Konsequenz die Sinneswahrnehmungen als Täuschung des Geistes dargestellt und somit der Deduktion gegenüber für gegenstandslos erklärt. Eine nach heutigen Gesichtspunkten naturwissenschaftliche Argumentation, die experimentelle Befunde als Belege für die Richtigkeit einer Theorie erklärt, würde nach der obigen Auffassung als unwissenschaftlich gelten. Ebenso ist es unmöglich, die Unwissenschaftlichkeit der deduktiven Schule in einer für diese akzeptablen Weise nachzuweisen, da eine solche Argumentation induktive Elemente beinhalten würde, welche für einen Vertreter der deduktiven Schule unwissenschaftlich sind.

- Ein weiteres Beispiel zeigt die Wissenschaftsgeschichte im Zeitraum bis Newton. In der aristotelischen Physik war die Frage nach dem “Wesen” eines Dings grundlegend. So fiel ein Stein, weil ihm sein Wesen zum Mittelpunkt des Universums trieb und die Sterne drehten sich auf Kreisbahnen um die Erde, weil es das Wesen ihrer Substanz war, Kreisbahnen zu vollziehen. Diese Auffassung wurde vor allem durch Descartes’ Weltbild gekippt, das eine Reduktion der Phänomene auf Stöße von Korpuskeln forderte. Molière z.B. verspottet seiner Zeit gemäß in seinen Aufzeichnungen einen Arzt, der die Wirksamkeit des Opiums als Schlafmittel mit “seiner einschläfernden Kraft” erklärt. Vielmehr wurde nun die einschläfernde Kraft ihrerseits durch die “runde Form der Opiumelementarteilchen, die sich um die Nerven herumbewegten” erklärt. Dies ist zwar nach heutiger wissenschaftlicher Auffassung nicht richtig, erscheint aber als eine wissenschaftlichere Erklärung, die Fortschritte bei der weiteren Untersuchung verheißt. Betrachtet man jedoch das newtonsche Weltbild im Vergleich zum cartesischen, so ist die Einführung der Gravitationskraft, nach der Korpuskulartheorie genau eine Rückkehr zum aristotelischen Wesensbegriff: Es war nun das Wesen aller Materie, sich gegenseitig anzuziehen. Dies machte Newtons Theorie in den Augen vieler zunächst unwissenschaftlich. Erst als man nicht mehr ohne die Annahme der Gravitation als unerklärtes Phänomen herumkam, nahm man sie schließlich als gegeben hin. Eine ähnliche Verschiebung der grundlegenden Gegebenheiten gab es auch in anderen Bereichen der Physik, z.B. die Verbannung des Begriffs eines Äthers, dessen Eigenschaften jedoch nach heutigen Gesichtspunkten denen des leeren Raumes in gewisser Weise ähnlich sind.

Wenn die Wahl zwischen zwei Paradigmen nicht nach wissenschaftlichen Gesichtspunkten zu entscheiden ist, nach welchen Gesichtspunkten wird die Entscheidung dann gefällt? Wie bei einer politischen Revolution erhält letztlich der Kandidat am meisten Zuspruch, dem die wissenschaftliche Gemeinschaft am ehesten die Lösung der heraufbeschworenen Krise zutraut, wobei mit Blick auf die nicht eindeutig beantwortbare Frage nach dem Gegebenen erneut zu betonen ist, daß diese Entscheidung auf subjektiven bzw. gruppodynamischen Phänomenen beruht, die keiner Logik gehorchen, sondern nur im Kontext des geschichtlichen Hintergrundes zu verstehen sind. Es gibt jedoch einige Gemeinsamkeiten bei der Lösung der Krise, die wir betrachten wollen.

Jedes neue Theoriegebäude taucht zuerst in den Ideen eines oder mehrerer Individuen auf. Diese Individuen sind in der Regel jung, und haben noch keine starke Bindung an alte Paradigmen entwickelt. Newton z.B. formulierte seine ersten Ideen des Gravitationsgesetzes, der Infinitesimalrechnung und der Bewegungsgesetze im Alter von 24 Jahren, Einstein veröffentlichte seine spezielle Relativitätstheorie mit 26.

Der nun einsetzende Prozeß ist vergleichbar mit der Dynamik einer Lawine:

Zunächst werden weitere aufnahmefähige Wissenschaftler von den ersten Ansätzen der ihrer Kollegen überzeugt und verschreiben sich dem neuen Paradigma. Ihre weiter ausgearbeiteten Ergebnisse wiederum überzeugen weitere Wissenschaftler und schließlich wird durch das Anwachsen der wissenschaftlichen Arbeiten unter dem neuen Paradigma die Arbeit unter dem alten Paradigma verdrängt. Da dieser Prozeß sich wie z.B. in der Kopernikanischen Revolution über einen langen Zeitraum erstrecken kann, ist es dabei nicht notwendig, daß alle Wissenschaftler überzeugt werden. Viele Wissenschaftler sind im allgemeinen so stark dem alten Paradigma verhaftet, daß sie gar nicht die Möglichkeit haben, sich von ihm zu trennen. So schätzt Charles Darwin in seinem revolutionären Werk *The Origin of Species* die wissenschaftliche Gemeinschaft richtig ein, wenn er behauptet:

“Obgleich ich von der Richtigkeit der ... in diesem Werke mitgeteilten Ansichten durchaus überzeugt bin, erwarte ich keineswegs auch die Zustimmung solcher Naturforscher, deren Geist von Tatsachen erfüllt ist, die sie jahrzehntlang von einem entgegengesetzten Standpunkt aus ansahen ... [A]ber ich sehe mit großem Vertrauen in die Zukunft. Junge, aufstrebende Naturforscher werden unparteiisch die beiden Seiten der Frage prüfen können.”

Und Max Planck bemerkt mit Rückblick auf seine wissenschaftliche Laufbahn bedauernd, daß sich wissenschaftliche Wahrheiten nicht durch Überzeugung ihrer Gegner, sondern durch Aussterben derselben durchzusetzen pflegen. Man kann es auch mit Kuhn spitzer formulieren und sagen “daß derjenige, der auch dann noch Widerstand leistet, wenn die ganze Fachwissenschaft schon konvertiert ist, *ipso facto* aufgehört hat, ein Wissenschaftler zu sein.

4.3.2 Wandlung des Weltbildes

Wenn die verschiedenen Paradigmen miteinander inkommensurabel sind, so muß der Wechsel des Paradigmas eine Änderung des Weltbildes mit sich bringen, die keinen definierten Übergang erlaubt. Kuhn veranschaulicht dies mit dem psychologischen Begriff des *Gestaltwandels*, der z.B. bei der längeren Betrachtung eines zweideutigen Bildes stattfindet. Betrachtet man z.B. Abb. 7, so sind zwei Betrachtungsweisen möglich: Entweder man sieht in dem Bild eine Ente oder man sieht ein Kaninchen. Beides ist nicht möglich, und es dürfte schwerfallen, jemandem, der in dem Bild vorwiegend eine Ente sieht, von der Richtigkeit der Sicht des Kaninchens zu überzeugen.

Ein vergleichbarer Effekt vollzieht sich mit dem wissenschaftlichen Weltbild im Verlauf eines Paradigmenwechsels. Obwohl die Welt als Untersuchungsgegenstand sich nicht geändert hat, wird sie doch in einem völlig anderem Licht betrachtet. Nur so ist es zu erklären, wie unterschiedlichen Paradigmen eine neue, oftmals von Grund auf andere Bewertung der gleichen Fakten zur Folge haben. Die himmlische ewige Physik wird plötzlich durch den Wechsel von Aristoteles zu Newton

eins mit der unvollkommenen irdischen, obwohl man nicht behaupten kann, daß sich am Himmel oder auf der Erde für einen neutralen Beobachter irgendetwas geändert habe. Ebenso könnte man sagen, daß sich die Masseneigenschaft eines Körpers mit dem Übergang von der newtonschen zur einsteinschen Masse nicht geändert hat. Hier stellt sich jedoch erneut das Problem eines theorieunabhängigen Massenbegriffs ein. Insofern könnte man auf die Idee kommen - und Kuhn tut dies auch - nicht nur von einer Wandlung des Weltbildes, sondern von einer Wandlung der Welt an sich zu sprechen, ebenso, wie man von einer Wandlung der Gestalt in Abb. 7 sprechen kann.

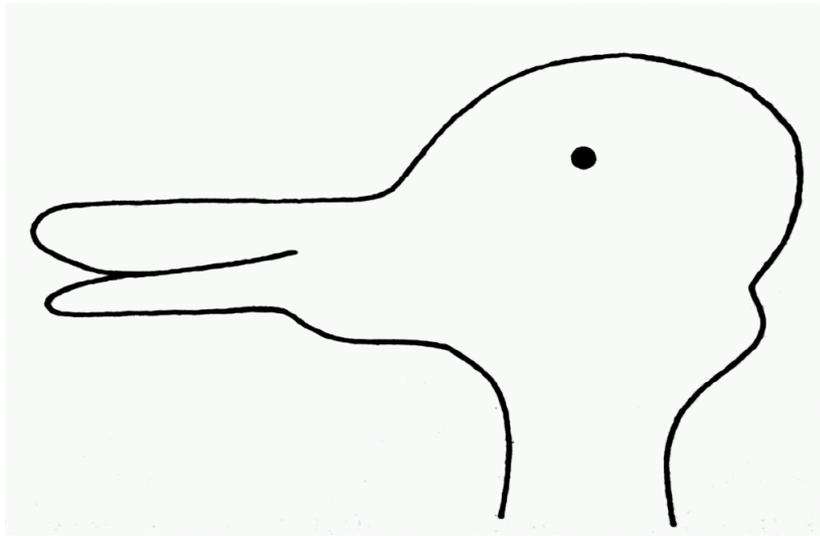


Abbildung 7: Ein Gestaltwandel: Ente oder Kaninchen? ([Chr96])

Als Beispiele für Gestaltwandel in der Wissenschaft führt Kuhn interessanterweise auch die Ausbildung eines Studenten in einer bestimmten Wissenschaft an: sieht z.B. ein Student der Medizin zum ersten mal in seiner Ausbildung ein Röntgenbild eines Brustkorbs, so fällt ihm das Bild der Rippen und der Wirbelsäule auf. Ein ausgebildeter Arzt wird darin aber vielleicht eher das für normale Augen schwach erkennbare Bild der Lunge betrachten und Vermutung über deren Zustand anstellen, der einem Experten auf dem Gebiet wiederum sogar direkt ins Auge springen mag. Ebenso sieht ein ausgebildeter Astronom sicherlich etwas Anderes, wenn er in den nächtlichen Himmel blickt, als ein Anfänger auf diesem Gebiet. Daß sich dieser Effekt auch auf die wissenschaftliche Untersuchung überträgt, belegt die Tatsache, daß in der westlichen Kultur, die durch die Überzeugung geprägt war, daß die Himmelskörper etwas Ewiges, Unvergängliches darstellten, neue Sterne und Kometen sehr viel später (z.B. erst durch Tycho Brahe) entdeckt wurden als in China, wo die herrschende Auffassung Veränderungen im Kosmos nicht ausschloß.

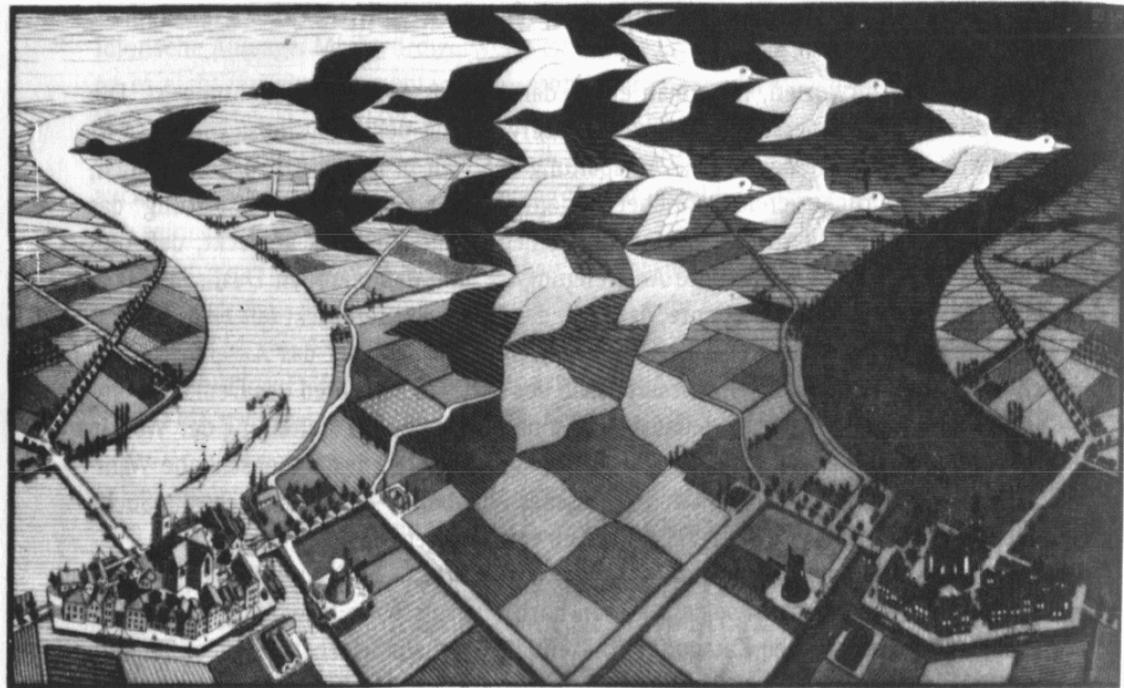


Abbildung 8: Die Hysterese der Wahrnehmung bei einem kontinuierlichen Gestaltwandel: Schweift der Blick auf dem Bild von einer Kante zur anderen, so bemerkt das Gehirn erst ein Stück hinter dem Mittelpunkt den eingetretenen Gestaltwandel. (M.C. Escher: Tag und Nacht)

Auch dieser Zusammenhang findet sich in dem von uns vorrangig betrachteten Zeitraum der kopernikanischen Wende als Anekdote wieder: Galilei forderte den bedeutendsten Theologen seiner Zeit, Kardinal Robert Bellarmin (1542 - 1621) auf, durch das Fernrohr zu sehen, um seine Ergebnisse mit eigenen Augen nachzuvollziehen. Bellarmin sah jedoch nicht das, was Galilei sah und konnte so nicht überzeugt werden. Es wäre einfach zu behaupten, daß Bellarmin sehr wohl dasselbe sah wie Galilei, es aber nicht glauben oder zugeben wollte (eine solche Überzeugung würde der gefährlichen Tendenz folgen, ein Urteil darüber fällen zu wollen, wer in der Geschichte *Recht* gehabt hat und wer nicht, tatsächlich kann man aber lediglich feststellen, welche Auffassung sich *durchgesetzt* hat, was die Vertreter anderer Auffassungen nicht automatisch zu Dummköpfen abstempeln muß). Nimmt man jedoch die Ergebnisse der Psychologie (die man mit dem Selbstexperiment am Enten-/Kaninchenbild nachvollziehen kann) ernst, so sieht man, daß Sinneswahrnehmungen höchst abhängig von den persönlichen Erwartungen und Gedankengängen sind. Nun könnte man sich auf die Objektivität von Meßergebnissen berufen, die man als von Sinneswahrnehmungen unabhängig einstuft. Doch auch hier sieht man aus den Betrachtungen zur Anomalie in 4.2.1,

daß Meßergebnisse nicht im theoriefreien Raum auswertbar sind, ja häufig der experimentelle Aufbau bereits bestimmte Erwartungen realisiert.

Aus Obigem folgt nun, daß die Welt nicht in objektiven Maßstäben beschrieben oder gemessen werden kann. Folglich ist es legitim, nicht bloß von der Wandlung des Weltbildes, sondern von der Wandlung der Welt an sich zu sprechen.

4.3.3 Die Unsichtbarkeit der Revolutionen

Wir haben gesehen, daß die Begriffswelt des alten Paradigmas mit der seines Nachfolgers nicht vereinbar ist. Folglich ist es verständlich, daß die wissenschaftliche Gemeinschaft im Bestreben, möglichst effiziente Forschung zu betreiben, das Historische aus ihren Lehrbüchern verbannt. Was an ihre Stelle tritt, ist die geschlossene Darstellung der Begriffswelt des neuen Paradigmas, wobei die Fakten diesem entsprechend geordnet dargestellt werden. Diese ahistorische Beschreibung hat - wie eingangs festgestellt - den Zweck, die Schüler oder Studenten im Gedankengebäude des geltenden Paradigmas heimisch zu machen, um sie im Hinblick auf die normale Wissenschaft möglichst effizient auszubilden. Dabei wird meist nicht auf Hinweise auf die Geschichte der jeweiligen Wissenschaft und die herausragenden Leistungen früherer Personen verzichtet, die Darstellung geschieht jedoch ebenso wie die Auswahl der vorgestellten Experimente im Hinblick auf die Erhöhung der Autorität der zugrundeliegenden Theorie.

Dies ist auch in den wissenschaftlichen Arbeiten der großen Physiker nicht anders (die damals die Funktion innehatten, die heute ein Lehrbuch einnimmt): z.B. hat Newton in seinen Principia darauf hingewiesen, bereits Galilei habe entdeckt, daß die konstante Schwerkraft eine Ortsveränderung proportional zum Quadrat der Zeit erzeugte. Tatsächlich nimmt Galileis kinematischer Lehrsatz diese Form an, wenn er in das System von Newtons eigenen dynamischen Begriffen eingebettet wird. Galilei selbst jedoch hat nichts Entsprechendes gesagt. Seine Erörterung über fallende Körper erwähnt kaum Kräfte, geschweige denn eine gleichbleibende Schwerkraft.

Betrachten wir schließlich die Kuhnsche These in ihrem eigenen Licht: Wie kommt es, daß wissenschaftliche Revolutionen innerhalb der Wissenschaftstheorie lange Zeit unbetrachtet blieben? Zum einen liegt dies sicherlich in der philosophischen Grundtradition der Wissenschaftstheorie als Geisteswissenschaft, die sich mehr mit der logischen Konstruktion und weniger mit der historischen Rekonstruktion der Wissenschaft beschäftigt. Die meisten Menschen, die sich mit Wissenschaftstheorie beschäftigt haben, waren selbst Wissenschaftler und damit durch eine paradigmatische Ausbildung der rationalen Konstruktion gegenüber besonders nahestehend. Kuhn, der zunächst als theoretischer Physiker forschte, berichtet im Vorwort zu [Ku78], daß dies in früherer Zeit auch auf ihn zutraf. Erst durch das Studium der Wissenschaftsgeschichte kamen ihm die grundlegenden Ideen zu seiner historisch fundierten Theorie.

5 Folgerungen für die Didaktik der Physik

Wir wollen nun kurz die Möglichkeiten der Verwertung der Kuhnschen Wissenschaftstheorie für die Didaktik anreißen. Für ein genaueres Studium wären sicherlich die Werke Piagets und anderer Entwicklungspsychologen von Interesse. Wie wir gesehen haben, spielen in der Kuhnschen Wissenschaftstheorie nicht nur soziologische, sondern auch psychologische Betrachtungen eine große Rolle. Es wird also nicht der Begriff der Wissenschaft als Ansammlung von mathematisch definierbaren Begriffen und logischen Operationen in den Mittelpunkt gestellt, sondern das Individuum des Wissenschaftlers und die wissenschaftliche Gemeinschaft stehen im Zentrum der Betrachtungen.

Der Bezug zur Didaktik ist dabei offensichtlich: Auch hier ist die Beziehung zwischen Mensch und Wissenschaft Hauptthema. Greifen wir also den im ersten Kapitel geäußerten Gedanken wieder auf, daß die Entwicklungsgeschichte der Gesellschaft mit der Entwicklungsgeschichte des Individuums vergleichbar ist, so durchläuft auch ein einzelner Mensch in seiner Ausbildung verschiedene Paradigmen. In der Physik findet dies z.B. im Wechsel vom newtonschen zum einsteinischen oder quantenmechanischen Weltbild statt, die in der Regel aufeinanderfolgend gelehrt werden. Dabei muß zwar im Hinblick auf die normalwissenschaftliche Ausbildung bemerkt werden, daß von der Newtonschen Sicht nur der Teil übernommen wird, der im Hinblick auf die heutige Physik Gültigkeit behalten hat (das ursprüngliche Newtonsche Paradigma erstreckte sich auf einen viel größeren Bereich als die Mechanik) *Empfunden* wird die Einführung von Quantenmechanik und Relativitätstheorie jedoch sicherlich als Änderung der Grundlagen. Ebenso dürfte die Einführung der newtonschen Physik in der Schule einem vorher in Mechanik ungebildeten Schüler zunächst Probleme bereiten, da entweder ein vorheriges Weltbild (welches etwa ein intuitives Äquivalent zur aristotelischen Physik darstellen könnte) zerstört werden muß oder zumindest einzelne widersprechende Empfindungen aus der alltäglichen Erfahrung (z.B. die Notwendigkeit einer Kraft zur Aufrechterhaltung einer Geschwindigkeit) von Seiten des Schülers neu bewertet werden müssen.

Es stellt sich nun die Frage, inwieweit die Ausbildung zur normalen Wissenschaft gewünscht ist. D.h. werden die Inhalte einer Theorie als so selbstverständlich wie möglich dargestellt, so daß unkompliziertes Arbeiten mit ihnen möglich ist und der Schüler/Student sich schnell in dem Theoriegebäude heimisch fühlt und es sicher anwenden kann? Oder soll bei jedem Lernschritt reflektiert werden, ob das angewandte Verfahren überhaupt sinnvoll ist und ob es andere mögliche Arbeitsweisen gibt? Die Frage kann natürlich nicht eindeutig beantwortet werden, da sie von den Zielsetzungen der Lernenden abhängt.

Für eine Ausbildung zum Forscher innerhalb einer klar definierten Disziplin bietet sich sicherlich das Erlernen der normalwissenschaftlichen Tätigkeit an. Steht jedoch die Allgemeinbildung des Schülers im Vordergrund, sollte vermehrt Gewicht

auf eine metaparadigmatische Sicht gelegt werden, die die Wichtigkeit konkreter Ergebnisse (etwa die Berechnung von Planetenbahnen nach den Newtonschen Regeln) gegenüber der phänomenologischen Betrachtungen (z.B. die Entwicklung des Massenbegriffs von Newton zu Einstein) zurückstellt. Dies hätte z.B. für die Praxis zur Folge, daß ein Leistungskurs gegenüber einem Grundkurs nicht nur ein größeres Ausmaß an Stoff präsentiert bekäme, sondern daß die Art der Darstellung eine spürbar andere sein müßte (wobei die These, daß ein Leistungskurs Physik in erster Linie zum naturwissenschaftlichen Studium hinleiten soll, sicherlich zu überprüfen wäre). Im Sinne der Schulung des kritisch-reflektierenden Denkens und Handelns beim Lernenden ist jedoch - und damit kehren wir zu der anfänglich formulierten These zurück - ein gewisser metaparadigmatischer Anteil in der Ausbildung unabdingbar. Insofern darf die historische Sicht einer Wissenschaft zu ihrem tieferen Verständnis nicht fehlen.

Literatur

- [Ku69] Thomas S. Kuhn. Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen, zweite revidierte und um das Postskriptum von 1969 erweiterte Auflage. Suhrkamp 1976
- [Ku78] Thomas S. Kuhn. Die Entstehung des Neuen. Suhrkamp 1978
- [Pop34] Karl R. Popper. Die Logik der Forschung. Tübingen: Mohr 1982
- [Lak74] Imre Lakatos. Falsifikation und die Methodologie wissenschaftlicher Forschungsprogramme. In: I. Lakatos & A. Musgrave (Hrsg.). Kritik und Erkenntnisfortschritt. Vieweg 1974
- [Fey76] Paul K. Feyerabend. Wider den Methodenzwang: Skizze einer anarchistischen Erkenntnistheorie. Suhrkamp 1976
- [Rom74] Heinrich Rombach (Hrsg.). Wissenschaftstheorie. Bd.1: Probleme und Positionen der Wissenschaftstheorie. Herder 1974
- [Chr96] Ulrich Charpa. Grundprobleme der Wissenschaftsphilosophie. Schöningh 1996
- [Cha86] A. F. Chalmers. Wege der Wissenschaft - Einführung in die Wissenschaftstheorie. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1986
- [Dor96] Charles Van Doren. Geschichte des Wissens. Birkhäuser Verlag Basel 1996
- [Sim86] Károly Simonyi. Kulturgeschichte der Physik. Verlag Harri Deutsch, Thun/Frankfurt am Main 1995
- [Ger92] Helmuth Gericke. Mathematik in Antike und Orient. Mathematik im Abendland. Fourier Verlag 1992
- [DTV91] dtv-Atlas zur Philosophie. Deutscher Taschenbuch Verlag 1991
- [Hor95] Horus Gets in Gear. Beginners Guide to Research in the History of Science <http://www.kaiwan.com/~lucknow/horus/guide/tp1.html>
- [Pia50] Jean Piaget. Die Entwicklung des Erkennens. Bd.2: Das physikalische Denken. Ernst Klett Verlag 1950
- [Pia73] Jean Piaget. Einführung in die genetische Erkenntnistheorie. Ullstein 1972.
- [Pöp85] Ernst Pöppel. Grenzen des Bewußtseins - Über Wirklichkeit und Welterfahrung. Deutsche Verlags-Anstalt 1985