

**Reprint of:**

Ulrich Kühne (1997): „Gedankenexperiment und Erklärung“, *Bremer Philosophica*, Vol. 1997/5, pp. 1-51.

**Title:**

Thought Experiment and Scientific Explanation

**Abstract:**

This essay evaluates the epistemic potential of the scientific method of ‘thought experiments’, i.e. how far one can progress in science by just thinking about experimental situations without doing real empirical research. The analysis of many episodes from the history of science suggests that thought experiments play an essential role in the formation of new conceptual and normative frames during phases of revolutionary theory change. Thought experiments do not tell us, how things are, but how they might be explained, thus allowing us to reflect the intentional components within scientific theories.

The author later wrote a *Dr.-phil.*-thesis on this subject: “*Die Methode des Gedankenexperiments. Untersuchung zur Rationalität naturwissenschaftlicher Theoriereformen.*” (Bremen University, submitted October, 5<sup>th</sup> 2001, *summa cum laude*) an abridged version of which has been published in the book: Ulrich Kühne, *Die Methode des Gedankenexperiments*. Frankfurt am Main: Suhrkamp Verlag 2005. 410 pages, ISBN: 978-3-518-29342-3.

**Author:**

Ulrich J. Kuehne, KUHNE@UNI-BREMEN.DE

## GEDANKENEXPERIMENT UND ERKLÄRUNG

- I Einleitung
  - II Probleme mit der Definition von Gedankenexperimenten
  - III Zur historischen Rolle von Gedankenexperimenten in der Physik
  - IV Thesen zur Neuinterpretation
  - V Die intentionale Komponente naturwissenschaftlicher Erklärungen
  - VI Zur Dynamik von Erklärungen und dem Fortschritt der Naturwissenschaft
- Literatur

### I. Einleitung

Gedankenexperimente sind in der modernen Literatur aller Wissenschaftsdisziplinen so weitverbreitet, daß man leicht das Provokante an ihnen vergessen könnte. Die Vorstellung von einem Experiment, das man ohne Beobachtung der Natur allein in Gedanken ausführen kann, ist jedoch dem landläufigen Verständnis der *empirischen* Wissenschaften völlig fremd. Es dürfte wie eine *contradictio in adiecto* klingen, wenn jemand behauptete, *Naturwissenschaft* mit *Gedankenexperimenten* zu betreiben.<sup>1</sup> Trotz seiner vermeintlich offensichtlichen Absurdität, aber wegen der hohen Popularität von Gedankenexperimenten unter praktizierenden Naturwissenschaftlern ist seit einigen Jahren der Versuch, die Rolle und Funktion von Gedankenexperimenten in den Naturwissenschaften aufzuklären, zu einem zentralen Thema wissenschaftsphilosophischer Auseinandersetzung geworden.

<sup>1</sup> Außerhalb der Disziplinen der Naturwissenschaft hat sich die Bezeichnung „Gedankenexperiment“ als neuer Name für in diesen Disziplinen altbekannte Methoden erst durchgesetzt, als nach dem allgemeinen Verständnis die Behauptung akzeptabel war, daß in der Physik Gedankenexperimente zum üblichen, erfolgreichen und legitimen methodischen Instrumentarium gehören. Inwieweit die Übertragung der naturwissenschaftlichen Gedankenexperimentalmethode in andere Disziplinen, z.B. die Moralphilosophie, die Philosophie des Geistes oder die Semantik, gerechtfertigt oder überhaupt vergleichbar ist, soll hier nicht das Thema sein. Offensichtlich fehlen jedoch solchen berühmten philosophischen Gedankenexperimenten wie „Searles Chinesisches Zimmer“ (Searle, 1980) oder „Putnams Gehirn im Tank“ (Putnam, 1981) die Provokation des Anspruchs, durch rein gedankliche Mittel etwas über die *Natur* aussagen zu wollen.

Der Begriff „Gedankenexperiment“ ist heute ein Modewort, aber neu ist er nicht. In das naturwissenschaftliche und wissenschaftsphilosophische Vokabular wurde er um 1900 durch verschiedene Schriften von Ernst Mach<sup>2</sup> eingeführt. Die erste theoretische Arbeit über Gedankenexperimente veröffentlichte sogar schon 1811 der dänische Naturwissenschaftler und Naturphilosoph Hans Christian Ørsted<sup>3</sup> (1777 - 1851); seine in der Tradition Kants stehende Wissenschaftsmethodologie wurde jedoch wenig beachtet und schnell vergessen. Nach Mach beschäftigten sich, um hier nur die bekanntesten Namen zu nennen, auch Duhem (1906), Planck (1935), Popper (1959), Koyré (1960) und Kuhn (1964) mit der Wissenschaftsphilosophie von Gedankenexperimenten, jeweils jedoch eher am Rande ihrer philosophischen Arbeiten. Die ersten Monographien zur Wissenschaftsmethodologie von Gedankenexperimenten wurden erst in unserem Jahrzehnt veröffentlicht<sup>4</sup>.

Was ist ein Gedankenexperiment? Dazu sollten wir uns ein Beispiel anschauen von jemanden, der ein Buch über Gedankenexperimente geschrieben hat. James Robert Brown gibt auf der ersten Seite von „The Laboratory of the Mind - Thought Experiments in the Natural Sciences“ (1991) seine Paraphrase des wohl berühmtesten Gedankenexperiments der Wissenschaftsgeschichte:

Let's start with the best (i.e., my favourite). This is Galileo's wonderful argument in the *Discorsi* to show that all bodies, regardless of their weight, fall at the same speed. It begins by noting Aristotle's view that heavier bodies fall faster than light ones ( $H > L$ ). We are then asked to imagine that a heavy cannon ball is attached to a light musket ball. What would happen if they were released together?

Reasoning in the Aristotelian manner leads to an absurd conclusion. First, the light ball will slow up the heavy one (acting as a kind of drag), so the speed of the combined system would be slower than the speed of the heavy ball falling alone ( $H > H+L$ ). On the other hand, the combined system is heavier than the heavy ball alone, so it should fall faster ( $H+L > H$ ). We now have the absurd consequence that the heavy ball is both faster and slower than the even heavier combined system. Thus, the

<sup>2</sup> Mach (1883), (1897) und (1905)

<sup>3</sup> Ørsted (1811). Diesen Text hat Ørsted verschiedentlich neu editiert und selbst (1822) ins Deutsche übersetzt. Diese Übersetzung ist meines Wissens nach die erste Fundstelle des Worts „Gedankenexperiment“ in der Literatur. Schon vorher hatte jedoch Lichtenberg die Formulierung „mit Gedanken experimentieren“ gebraucht, dies jedoch nicht in einem wissenschaftsmethodischen Sinn, sondern lediglich als „über einzelne Dinge Fragen aufzusetzen: z.B. Fragen über Trinkgläser, ihre Verbesserung, Nutzung zu anderen Dingen etc., und so über die größten Kleinigkeiten“ (1793-96, 308). - Ørsted's Bezug auf Kants „Experimente der Vernunft“ (KrV, Vorrede zur zweiten Auflage) und *Transzendentalen Methodenlehre* ist naheliegender.

<sup>4</sup> Brown (1991a), Sorensen (1991b), Buschlinger (1993), Horowitz & Massey (1991); siehe aber auch Krimsky (1970)

Aristotelian theory of falling bodies is destroyed.

But the question remains, 'Which falls fastest?' The right answer is now plain as day. The paradox is resolved by making them equal; they all fall at the same speed ( $H = L = H+L$ ).

Diese Argumentation hat etwas bestechendes und ihr Ergebnis ist offensichtlich neu: Aristoteles' Theorie, daß die Geschwindigkeit<sup>5</sup> von frei fallenden Körpern proportional zu ihrem Gewicht ist, wurde widerlegt und Galileis neues Fallgesetz, „Alle Körper fallen gleich schnell“, wurde bewiesen. Der Beweis bestand schlicht darin, daß man sich ein konkretes experimentelles Szenario vorstellt - ohne daß eine reale Ausführung des Experiments noch nötig erscheint: Ein schwerer und ein leichter Körper bilden zusammengebunden einen schwereren Körper, als der schwere Körper allein darstellte. Nach Aristoteles' Theorie müßte die zusammengebundenen Körper also schneller fallen, als der schwere Körper allein. Aber andererseits würde ein langsamerer Körper einen schnelleren bremsen, wenn er mit diesem verbunden wird. Beide Argumente zusammengekommen führen zu einem Widerspruch: |<sub>3</sub> die zusammengebundenen Körper können nicht gleichzeitig schneller und langsamer als der schwere Körper allein fallen. Und die Lösung des Widerspruchs besteht darin zu sagen, schwere Körper fallen weder schneller noch langsamer als leichte, sondern gleich schnell.

Wenn diese Beweisführung stichhaltig wäre, hätte die Provokation ihres Namens eine Berechtigung. Gedankenexperimente wären mehr als nur ein Modewort; sie könnten tatsächlich - wie reale Experimente - Neues über die Natur verraten, denn die Erkenntnis, daß Aristoteles' Fallgesetz falsch ist und statt dessen alle Körper gleich schnell fallen, hat offensichtlich einen empirischen Gehalt. Es wäre dann die erste Aufgabe, eine allgemeine Gebrauchsanweisung für die Konstruktion von so erfolgreichen Gedankenexperimenten wie diesem zu schreiben, schon allein um die gewaltigen Forschungsausgaben der Experimentalphysik einsparen zu können.

Eine Darstellung der Galileischen Beweisführung in der Art, wie Brown dies tut, findet sich in nahezu jedem wissenschaftsphilosophischen Text über Gedankenexperimente. Nahezu alle Autoren sehen in dem gerade vorgestellten Gedankenexperiment einen gültigen, logisch zwingenden *Beweis*. Dies ist jedoch eine Fehleinschätzung, die wir sogleich korrigieren müssen. Daß das Ergebnis von Galileis Beweisführung keine logisch notwendige Tatsache ist, ergibt sich aus der Einsicht in die begrenzten Möglichkeiten der Disziplin „Logik“. Die Logik ist nicht in der Lage, empirische - und das heißt: logisch kontingente - Wahrheiten zu beweisen. Um das am konkreten Beispiel zu sehen genügt es, sich eine Welt vorzustellen, in der Aristoteles' Fallgesetz wörtlich wahr ist. In dieser Welt würden zwei nebeneinander fallende Steine

<sup>5</sup> Mit „Geschwindigkeiten“ ist in diesem Zusammenhang bei Aristoteles und Galilei der Quotient aus (gleicher) Fallstrecke und (verschiedener) Fallzeit gemeint („Durchschnittsgeschwindigkeiten“).

sich beschleunigen, sobald man sie verbindet. Eine solche Vorstellung erscheint uns vielleicht kurios, aber diese Vorstellung enthält keinen logischen Widerspruch. Das Gedankenexperiment kann diese Möglichkeit nicht widerlegen, denn in dieser „aristotelischen“ Welt ist eine der Prämissen des Gedankenexperiments falsch: nicht in jedem Falle würde in dieser Welt ein langsamer Körper einen schnellen bremsen und ein schneller einen langsamen beschleunigen, wenn man beide verbindet.

Das von Brown präsentierte Ergebnis des Gedankenexperiments ist nicht nur in möglichen, sondern auch in unserer realen Welt falsch. Wie auch Galilei selbst kurz hinter dem Gedankenexperiment in den *Discorsi* ausführt<sup>6</sup>, ist es offensichtlich, daß ein Stück Blattgold wesentlich langsamer zu Boden „flattert“ als ein Goldklumpen fällt. Galileis Fallgesetz besagt, daß alle Körper in einem *idealen Vakuum* - frei von allen Störungen durch äußere Ursachen wie der Luftreibung - gleich schnell fallen. Ein Vakuum läßt sich jedoch nur angenähert realisieren. Und zu Galileis Zeiten gab es selbst für die Herstellung eines schlecht angenäherten Vakuums keine Technik.<sup>7</sup> Um so erstaunlicher ist es, daß das Fallgesetz von Galilei selbst in der heutigen Physik noch immer vorausgesetzt wird. Vielen physikalischen Theorien nach Galilei ereilte das Schicksal, zwischenzeitlich von neueren Theorien abgelöst zu werden. Aber die Behauptung, daß sich alle Körper unabhängig von ihrem Material und Gewicht unter der reinen Wirkung eines Gravitationsfelds gleichartig bewegen, ist als eine der Voraussetzungen der allgemeinen Relativitätstheorie auch heute noch aktuell. Schon dieser Umstand rechtfertigt, daß wir uns die Gedankenexperimentalmethode genauer anschauen. Auch wenn ihre Ergebnisse keine logisch zwingenden Schlüsse sind: sie sind oft erstaunlich gut.

## II. Probleme mit der Definition von Gedankenexperimenten

Den meisten Beiträgen zur Wissenschaftsphilosophie des Gedankenexperiments liegt diese *Standardauffassung* zugrunde: Daß Gedankenexperimente analog den Möglichkeiten der realen Experimente uns dazu befähigen, die Geheimnisse der Natur zu entreißen. Diese Standardauffassung birgt einige Probleme. Das erste Problem ist die Definition von „Gedankenexperiment“ in diesem Rahmen. Die Definition ist auf der Grundlage der Standardauffassung so schwierig, weil man - je nach Art der Analogie zwischen realem Experiment und Gedankenexperiment - nur die Wahl zwischen zwei Extremen hat.

<sup>6</sup> Galilei (1638, 59) - er paraphrasiert in dieser Stelle (zustimmend) Aristoteles.

<sup>7</sup> Das erste Barometer (mit einem Vakuum oberhalb einer Quecksilbersäule) baute Galileis Schüler Torricelli 1643; Otto von Guericke's Experimente mit dem Vakuum wurden 1672 veröffentlicht. Die Rolle des Vakuums in Galileis Physik war der wesentliche Anlaß für diese realen Experimente.

Das eine Extrem liegt darin, das Unmögliche zu definieren, d.h. eine Definition zu liefern, deren Extension die leere Menge ist. Wie gerade ausgeführt ist es unmöglich, auf der Grundlage der Logik allein, kontingente, empirische Tatsachen zu beweisen. Wenn Gedankenexperimente das trotzdem bewerkstelligen sollen, so führt das unweigerlich zu dem „paradox of thought experiments“, dessen Lösung Tamara Horowitz und Gerald J. Massey zur (unerfüllten) Aufgabe ihres 1991 herausgegebenen Sammelbands „Thought Experiments in Science and Philosophy“ machen. In einem Satz ausgedrückt ist das „Paradox“<sup>8</sup>

the initially puzzling fact that thought experiments often have novel empirical import even though they are conducted entirely inside one's head, so to speak.

In dieses Paradox verfängt sich z.B. die „Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie“, wenn sie „Gedankenexperiment“ in den empirischen Wissenschaften definiert als<sup>9</sup>

ein ↑Experiment, dessen Ablauf methodisch entwickelt ist, das jedoch aus technisch-kontingenten (Kosten des technischen Aufwands etc.) oder prinzipiellen (Dimension der gedachten Versuchsgerate, moralische Grenzen beim Umgang mit Versuchspersonen etc.) Gründen nicht ausgeführt wird.

Und wenn man unter dem Eintrag „Experiment“ nachschaut, wird dieses andererseits erklärt als das<sup>10</sup>

planmäßige Herbeiführung von (meist variablen) Umständen zum Zwecke wissenschaftlicher ↑Beobachtung.

In der Kombination ergibt das die kuriose Konsequenz, daß ein Gedankenexperiment ein Experiment ist, das seinen Zweck verfehlt - auf das die Definition des Experiments nicht zutrifft.

In das andere Extrem fällt man, wenn man die Definition schwächer faßt und nur verlangt, daß Gedankenexperimente durch Denken zu Erkenntnissen führen. Eine  $\downarrow_5$  solche Definition bietet keine Handhabe dagegen, *alle* intellektuellen Leistungen der Menschheitsgeschichte als Resultate von Ge-

<sup>8</sup> Horowitz & Massey (1991, 1)

<sup>9</sup> Mittelstraß (1980, 712)

<sup>10</sup> Mittelstraß (1980, 621f)

dankenexperimenten zu erklären. Der Begriff „Gedankenexperiment“ würde ins Nutzlose inflationiert, wenn von den vorsokratischen Spekulationen<sup>11</sup> über die scholastischen *Obligationes*<sup>12</sup> bis zu den heutigen Computersimulationen<sup>13</sup> jede kontrafaktische Behauptung, Hypothese, Modellrechnung, argumentative Illustration, jeder Satz im Konjunktiv ein Gedankenexperiment ist. Tatsächlich gibt es, seitdem der Begriff Gedankenexperiment *auch* zu einem Modewort verkommen ist, die Tendenz, den Gebrauch des Begriffs umgangssprachlich auf all das auszuweiten. Und nicht wenige Autoren versuchen sich in dem Unterfangen, diesem unbegrenzten Konglomerat von Wortbedeutungen gerecht zu werden, indem sie es mit botanischer Akribie in Gattungen und Spezies zergliedern, als gelte es, das ganze Projekt menschlichen Denkens in eine Taxonomie der Gedankenexperimente zu fassen.<sup>14</sup>

In diesem Abschnitt soll der Irrweg dieser Standardauffassung vorgeführt werden. Die restlichen Abschnitte dieses Textes versuchen sich an einen Ausweg. Ein Ausweg ist nur dann einer - soll hier schon angemerkt werden, weil das die Grundlage für das Zurückweisen der Standardauffassung ist -, wenn er,

- dem Begriff des Gedankenexperiments soviel Substanz gibt, daß dieser (wie gesagt: relativ neue und unfestgelegte) Fachterminus nicht zu einem überflüssigen Pseudonym für längst etablierte Begriffe der Wissenschaftsphilosophie wird. Hier liegt eine ernste Gefahr: Es wurden schon viele kluge Arbeiten über die Rolle von Argumenten, Modellen, Hypothesen etc. in der Wissenschaft geschrieben. Wenn ein Gedankenexperiment nicht mehr ist, als das eine oder andere oder eine Kombination davon, dann sollte man seine Gedanken zur Wissenschaftsphilosophie lieber ohne den Begriff „Gedankenexperiment“ artikulieren. Schon allein um Mißverständnissen vorzubeugen.
- die Rolle und Funktionsweise von Gedankenexperimenten in der Wissenschaftsgeschichte angemessen beschreiben kann.

Argumentationen wie die von Galilei finden sich in großen Mengen in der Wissenschaftsgeschichte; man kann sich des Eindrucks kaum erwehren, daß fast jede Großtat zumindest der Physik mit einem Gedankenexperiment von der Art, wie Brown Galilei darstellt, verbunden ist. Ein paar Beispiele in Stichworten:

- Das Gesetz der schiefen Ebene und Stevins Gedankenexperiment von einer ruhenden Kette auf einer dreieckigen Unterlage.

<sup>11</sup> cf. Rescher (1991)

<sup>12</sup> cf. King (1991)

<sup>13</sup> cf. Humphreys (1993)

<sup>14</sup> Die aufwendigste Taxonomie findet sich schon in Krimsky (1970).

- Die statistische Thermodynamik und Maxwells Dämon.
- Die spezielle Relativitätstheorie und Einsteins Gedankenexperiment über die Gleichzeitigkeit von zwei Blitzen an der Spitze und am Ende eines fahrenden Zugs aus der Sicht eines Beobachters in der Mitte des Zugs und eines neben dem Bahndamms auf gleicher Höhe stehenden Beobachters.
- Die allgemeine Relativitätstheorie und Einsteins Aufzug. | 6
- Die Quantentheorie und Schrödingers Katze oder Heisenbergs Gammastrahl-Mikroskop. Und die unzähligen Gedankenexperimente der berühmten Einstein - Bohr Debatte.

Diese Liste ließe sich weit fortsetzen. Auch gegenwärtig, vielleicht sogar in zunehmendem Maße, werden neue Gedankenexperimente entwickelt und diskutiert. Ein Beispiel eines gegenwärtig noch immer kontroversen physikalischen Problems, das weitgehend mittels Gedankenexperimenten behandelt wird, ist die relativistische Thermodynamik: Die Thermodynamik ist die letzte große physikalische Theorie, für die noch keine allgemein akzeptierte lorentzinvariante Formulierung gefunden wurde; reale Experimente, d.h. Temperaturmessungen an (makroskopischen) Körpern, die sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit bewegen, sind technisch nicht durchführbar, und so sind alle Vorschläge zur relativistischen Erweiterung der Thermodynamik aus der Untersuchung von gedankenexperimentellen Szenarien hervorgegangen.<sup>15</sup>

An den wissenschaftshistorischen Beispielen von Gedankenexperimenten müssen sich alle Versuche, Gedankenexperimente sinnvoll zu definieren, messen. Das ist eine ziemlich klar begrenzte Aufgabe. Wir haben zwar sehr viele Beispiele von Gedankenexperimenten (und nachdem der Begriff zu einem Modewort geworden ist, kann man wie gesagt alles dazu zählen) - aber unter diesen Beispielen läßt sich leicht ein „harter Kern“ ausmachen, der die Grundlage für eine extentionale Definition von Gedankenexperimenten bildet. Dieser harte Kern besteht aus einigen wenigen *paradigmatischen Gedankenexperimenten*, wie ich sie nennen möchte, die sich nicht nur dadurch auszeichnen, daß sie in der Literatur am häufigsten erwähnt werden. Sie konstituieren den kleinsten gemeinsamen Nenner aller Arbeiten über Gedankenexperimente - und in vielen Fällen die einzige Rechtfertigung für die Annahme, daß mit dem Begriff „Gedankenexperiment“ ein Inhalt verbunden ist. Selbst wenn jemand Computerkunst zum Gedankenexperiment erklärt (und sich im übrigen ausschließlich mit ästhetischen Fragen beschäftigt), fehlt nicht der übliche Hinweis auf die Gedankenexperimente in der Quantenmechanik, Relativitätstheorie oder bei Galilei.<sup>16</sup>

<sup>15</sup> Einen detaillierten Überblick zum Stand der Diskussion um die relativistische Thermodynamik gibt Bartels (1994), Kap. 4.

<sup>16</sup> cf. Dietrich (1987, 316f)



Das zentrale Problem mit den Gedankenexperimenten und der ganze Sinn sich wissenschaftsphilosophisch mit ihnen auseinanderzusetzen liegt - wie ich es sehe - darin, daß nach der weitgehend gemeinsamen *Intuition* aller, die sich mit der Interpretation der Naturwissenschaft auseinandersetzen, in einigen markanten, zentralen Argumentationen von bedeutenden Naturwissenschaftlern etwas *Besonderes* steckt, das als ein *genuiner* Teil des wissenschaftsmethodischen Instrumentariums verstanden werden muß und nach der gleichen Intuition treffend mit dem Namen „Gedankenexperiment“ bezeichnet wird. Die Aufgabe besteht demnach darin, dieses Besondere treffend zu explizieren und seine Rolle im Gesamtprozeß der Naturwissenschaft einzuordnen. Die Aufgabe besteht nicht darin, einem Kunstwort „Gedankenexperiment“, das sich seit einigen Jahrzehnten in Naturwissenschaft, Wissenschaftsphilosophie, Sozialwissenschaft, Philosophie des Geistes, Moralphilosophie etc. etabliert hat, einen Sinn hineinzuiinterpretieren, der mit dem allgemeinen Verständnis von Wissenschaft, Erkenntnis und Methode verträglich ist.

Das Problem, Gedankenexperimente zu interpretieren, ist damit klar verschieden von dem Problem, die Kulturgeschichte des menschlichen Denkens seit den Vorsokratikern zu verstehen. Es genügt, sich mit einigen paradigmatischen Gedankenexperimenten aus der Physikgeschichte auseinanderzusetzen. Über Analogien zu anderen Denkleistungen kann man danach separat arbeiten. Gegenwärtig muß man jedoch feststellen, daß die paradigmatischen Gedankenexperimente bei weitem noch nicht genug erforscht wurden. Wir werden uns hier nur mit den durch die paradigmatischen Gedankenexperimente verursachten wissenschaftsphilosophischen Problemen beschäftigen.

Gemeinsam ist diesen Gedankenexperimenten, daß jeweils ein hypothetisches Szenario eines experimentellen Arrangements vorgestellt wird und aus diesem Schlüsse gezogen werden, deren Gültigkeit ohne reale experimentelle Überprüfung (die zumeist auch an technischen oder z.T. sogar prinzipiellen Problemen scheitern würde) behauptet wird. Die Gültigkeit dieser Schlüsse wird nicht nur für den Fall behauptet, daß dieses fiktive Szenario eines Tages realisiert wird, sondern auf einen wesentlich breiteren Anwendungsbereich verallgemeinert. Nach der obengenannten Standardinterpretation des Gedankenexperiments ist genau dies, die Gewinnung von verallgemeinerungsfähigen Erkenntnissen, die Funktion von Gedankenexperimenten: Ein Mensch hat eine bestimmte Wissensbasis, bestehend aus Aussagesätzen über Tatsachen und Naturgesetze von denen er weiß, ob sie wahr oder falsch sind. Dann macht er das Gedankenexperiment. Und nach dem erfolgreichen Ende des Gedankenexperiments hat der Mensch eine revidierte, verbesserte Wissensbasis. Die neue Wissensbasis wurde entweder durch mindestens eine neue, für wahr gehaltene Aussage bereichert, oder aber eine vorher zu den wahren Aussagen gezählte Tatsache findet sich jetzt bei den unwahren. Um welche Arten von Aussagen geht es hierbei?

Wir können die Aussagen der Wissensbasis einteilen, je nach der Methode, mit der man sich von ihrer Wahrheit überzeugen kann. Nennen wir „RE“

die Menge aller Aussagen, die der Besitzer der Wissensbasis aufgrund von realen Experimenten oder Beobachtungen für wahr hält, und „GE“ die Menge aller Aussagen, die er durch Gedankenexperimente gefunden hat. Was läßt sich über die Menge GE sagen?

Nach der vorliegenden Standardauffassung erweitern Gedankenexperimente die Möglichkeiten des realen Experiments, haben aber eine große Schnittmenge mit ihnen. Ein Element in der Schnittmenge (q) kann das Ergebnis eines realen Experiments sein, aber auch (nach der Standardauffassung) unabhängig von realen Experimenten durch ein Gedankenexperiment gefunden werden. Ökonomische Gründe mögen in diesem Fall für die Wahl von Gedankenexperimenten sprechen. Es wird auch nicht bestritten, daß ein zusätzlich durchgeführtes reales Experiment (mit dem gleichen Ergebnis) die Gewißheit der Wahrheit von q vergrößert. Oft sei man sogar (nach dieser Auffassung), solange man noch kein Gedankenexperiment gefunden hat, ganz auf reale Experimente angewiesen. Tatsächlich läßt Galilei im Originaltext des genannten Gedankenexperiments (den in Dialogform verfaßten *Discorsi*) den mit der Rolle des Aristotelikers belegten Simplicio zuerst nach einer *experimentellen* Überprüfung verlangen, nachdem sein Gesprächspartner Salviati behauptete, Aristoteles habe sich mit seinem Fallgesetz (Geschwindigkeit proportional zum Gewicht) geirrt. Daraufhin trägt Salviati das oben beschriebene Gedankenexperiment mit dem Hinweis vor: „*Ohne viel Versuche* können wir durch eine kurze, bindende Schlussfolgerung nachweisen, wie unmöglich es sei, dass ein größeres Gewicht sich schneller bewege, als ein kleineres [...]“<sup>17</sup> Die Tatsache „Die Fallgeschwindigkeit ist nicht proportional zum Gewicht“<sup>18</sup> würde also in die Schnittmenge von GE und RE passen: der eher mittelmäßig begabte Simplicio weiß sich nur mit realen Experimenten zu helfen, um die Wahrheit über das Fallverhalten von Körpern zu ergründen; dagegen kann der fortschrittliche Salviati *genau die gleichen* Fragen auch durch ein bloßes Gedankenexperiment entscheiden.

Niemand, der über Gedankenexperimente schrieb, behauptet, daß sich *alle* durch reale Experimente überprüfbaren Tatsachen (zumindest im gegenwärtigen Stand der Kunst) auch durch Gedankenexperimente finden lassen. Die

<sup>17</sup> Galilei (1638, 57), meine Hervorhebung.

<sup>18</sup> Negative und positive Tatsachenbehauptungen sind, weil beide ein Wissen ausdrücken, für die vorliegende Untersuchung gleich zu behandeln. Poppers Theorie des Gedankenexperiments (1959, Neuer Anhang Nr. xi.) kann ich in diesem Punkt nicht nachvollziehen: Er unterscheidet zwischen negativen und positiven Tatsachenbehauptungen als Ergebnisse von Gedankenexperimenten und erachtet nur die Gedankenexperimente, die negative Tatsachenbehauptungen produzieren, für legitim („kritischer Gebrauch“). Gedankenexperimente, die positive Tatsachenbehauptungen aufstellen, hält er dagegen für unwissenschaftlich („apologetischer Gebrauch“). Offensichtlich jedoch verschwindet der empirische Gehalt einer Aussage nicht dadurch, daß man sie negiert. Die negative Aussage, z.B., „Es wird morgen nicht regnen“ kann genauso von der Empirie widerlegt werden wie die positive „Das Wetter wird morgen trocken sein.“ Der empirische Gehalt der Aussage „Aristoteles’ Fallgesetz ist falsch“ ist natürlich geringer als in der Aussage „Galileis Fallgesetz ist wahr“; dieses Problem soll hier aber nicht zur Diskussion stehen.

Tatsache z.B. „Gold hat ein spezifisches Gewicht von  $19,29 \text{ g/cm}^3$ “ hat ihren berechtigten Platz in der Menge RE und nicht in GE. Dagegen wird üblicherweise der Gedankenexperimentalmethode auch die Möglichkeit zugeschrieben, Tatsachen zu entdecken, die sich nicht durch reale Experimente gewinnen lassen, und zwar nicht nur in Fällen, bei denen technische oder finanzielle Schwierigkeiten gegenwärtig eine experimentelle Überprüfung ausschließen, sondern auch dann, wenn aufgrund von Idealisierungen, Verallgemeinerungen oder kontrafaktischen Annahmen die empirische Bestätigung prinzipiell unmöglich ist. Z.B. wird Galileis Trägheitsgesetz gelegentlich als Resultat eines Gedankenexperiments beschrieben<sup>19</sup>: In realen Experimenten untersucht Galilei die Bewegung von Kugeln unter dem Einfluß von größerer und kleinerer Reibung. Und dann schließt er in einem kühnen, von allen Störeinflüssen der realen Welt abstrahierenden Gedankenexperiment, daß ein einmal angestoßener Körper sich gleichförmig und endlos fortbewegen würde, wohl wissend, daß in keinem realen Experiment die Reibung völlig ausgeschaltet werden kann. Das Trägheitsgesetz wäre demnach in der Menge GE, aber nicht RE.

Ich habe einleitend den Anspruch auf Erkenntnisgewinn durch Gedankenexperimente „provokant“ genannt. Worin genau liegt diese Provokation? *Nicht* in den folgenden Punkten:

Die Tatsache, daß es Tatsachen gibt, die man experimentell überprüfen kann, aber nicht experimentell überprüfen muß, um sich ihrer Wahrheit zu versichern, ist nicht generell provokant. Z.B. kann man gewissermaßen experimentell (durch nachzählen) überprüfen, wie viele Äpfel in einem Sack sind, nachdem man zu den sieben, die vorher drinnen waren, fünf hinzu geschüttet hat. Man braucht es aber nicht; es werden zwölf sein. Dazu genügt die Arithmetik. Die wunderbare Anwendbarkeit der Arithmetik in der Empirie ist nicht ohne philosophische Probleme, diese gehören jedoch nicht zum vorliegenden Thema. Die bloße Anwendung der Arithmetik führt |, nicht zu qualitativ neuen Ergebnissen<sup>20</sup>. Die Entstehung von *nichttrivialen*, neuen, empirisch relevanten Tatsachen über die Natur, wie von den paradigmatischen Gedankenexperimenten präsentiert werden, läßt sich so nicht erklären. Neu

<sup>19</sup> Sorensen (1992, 8f)

<sup>20</sup> Die neuerliche Möglichkeiten von Computersimulationen scheint diese Aussage einzuschränken. Computersimulationen zeigen in vielen Fällen qualitativ unerwartete Ergebnisse („emergente“ „Epiphanomene“), die man zweifellos „nichttrivial“ nennen kann, obwohl sie durch bloße (aber mengenmäßig aufwendige) Anwendung von mathematischen Regeln gewonnen wurden. Tatsächlich hat Humphreys (1992 und 1993) Computersimulationen als beste Definition von Gedankenexperimenten vorgeschlagen (siehe unten). Das Problem mit dieser Interpretation von Gedankenexperimenten ist, daß sie offensichtlich an der historischen Bedeutung vorbeigeht und für die paradigmatischen Gedankenexperimente unanwendbar ist. Im Gedankenexperiment von Galilei wurde zwar auch Gebrauch von der Arithmetik gemacht (z.B. wurde das Gewicht einer 100 Pfund schweren Kanonenkugel zu dem einer halb-pfündigen Flintkugel addiert), aber in den Regeln der Addition liegt sicherlich nicht der Schlüssel zum Verständnis des Gedankenexperiments.

und empirisch relevant können Ergebnisse eines Rechengvorgangs sein, aber sie sind gewissermaßen zu unsubstantiell um zu mehr als einer trivialen Theorie des Gedankenexperiments führen zu können. - Dieser Einwand gilt gleichermaßen für die ganze Mathematik, für alle logischen Deduktionen oder für semantische Analytizität. Ebenso gilt dieser Einwand für alle Ableitungen von schon bekannten Naturgesetzen - kurz: für alle Ableitungen von Regeln, deren Gültigkeit schon vor dem Gedankenexperiment anerkannt wird.

Und ebenso ist die Behauptung wenig anstößig, durch Gedankenexperimente ließen sich Wahrheiten finden oder bestätigen, die sich einer experimentellen Überprüfung prinzipiell entziehen. Natürlich läßt sich dann darüber streiten, inwieweit solche Ergebnisse von Gedankenexperimenten als „Wahrheiten“ zu bezeichnen nicht bloß ein sprachlicher Mißbrauch sei - aber da ja die Überschneidung mit experimentellen Tatsachen von vornherein ausgeschlossen wird, kann das nichts Schlimmeres als eine bloß sprachliche Provokation sein.

Provokant sind aber die Fälle von Gedankenexperimenten, auf die der Namensbestandteil „Experiment“ am besten paßt, in denen nämlich ein Ergebnis gewonnen wird, das wir, wenn es keine Gedankenexperimente gäbe, ausschließlich durch die Erfahrung kennen. Schärfer formuliert: Ein Ergebnis, das nach allem, was uns durch Logik, Mathematik, schon bekanntem Wissen oder durch Kombination davon erschließbar ist, *auch falsch sein könnte*, aber (wie gesagt ohne Gedankenexperimente) allein deshalb für wahr gehalten wird, weil es durch reale Experimente und Beobachtungen der Natur bestätigt ist. Auch wenn Brown und die meisten anderen Rezensenten des Galileischen Gedankenexperiments das nicht besonders hervorheben: die Ergebnisse des Gedankenexperiments über das Fallgesetz sind genau von dieser Art, nämlich nicht zwingend.

Für die Wahrheit des Galileischen Fallgesetzes kann, wie wir oben gesehen haben, nicht die Logik allein verantwortlich gemacht werden. Anderslautende Fallgesetze sind nicht nur konsistent denkbar, sondern auch mit unserer Alltagserfahrung verträglich. Abgesehen davon, daß Galilei selbst nach dem eigentlichen Gedankenexperiment noch viele Seiten mit weiteren Begründungen füllt, ist bis heute die experimentelle Bestätigung des Galileischen Fallgesetzes ein durchgehend aktuelles Thema der Experimentalphysik. Die überhaupt nicht abwegige Möglichkeit, daß die Fallgeschwindigkeit von einer materialabhängigen Größe nach Art einer Ladung abhängig sein könnte, wird in immer neuen Variationen und mit immer größeren Genauigkeiten, bis hin zu extrem teuren, satellitengestützten Meßapparaten, experimentell geprüft. Die Experimente von Eötvös (1889 und viele weitere Veröffentlichungen) zu dieser Frage sind allgemein bekannt. Solche Experimente würde man sich natürlich einsparen, wenn es hier um die experimentelle Überprüfung einer Vernunftnotwendigkeit ginge.

Trotzdem wird das Resultat dieses Gedankenexperiments auch heute noch akzeptiert; die unzähligen realen Experimenten haben kein anderes Resultat erbracht. Wenn man nicht in einer theorie-antirealistischen Tradition

überhaupt fundamentalen Gesetzen wie „Alle Körper fallen gleich schnell“ die Wahrheit abspricht, weil sie sich nur mit vielen *ceteris paribus* Klauseln und Approximationen experimentell überprüfen lassen<sup>21</sup>, dann ist Galileis Fallgesetz wahr. Wie konnte Galilei einen solchen Glückstreffer eines Naturgesetzes erzielen, das sich bis heute über 350 Jahren lang bewährt hat? War das ein Zufall oder lag es an der Gedankenexperimentalmethode? Oder anderes gefragt: Was hindert ein Gedankenexperiment daran, falsche Ergebnisse zu produzieren?

Wenn man die Frage so stellt, gibt es im wesentlichen nur zwei Antworten, eine positive und eine negative. Die positive Antwort - i.e. zu sagen, es gibt einen systematischen Grund für die Annahme, daß Gedankenexperimente wahre Erkenntnisse über die Natur entdecken lassen - machen die Annahme eines Gesetzesplatonismus' unvermeidlich; offen haben sich von den Autoren über Gedankenexperimente Koyré (1960) und der schon genannte James Robert Brown (1991) zum Platonismus bekannt. In Kurzform lautet die platonistische Antwort: Die Natur folge Gesetzen, die wir *apriori* allein durch unsere Vernunft erkennen können, wenn wir uns als einem (sozusagen) Sinnesorgan für die *apriori* gültigen Naturgesetze der Gedankenexperimentalmethode bedienen. Dieser Standpunkt hat den Vorteil, konsequent zu sein. Jedoch muß ein Vertreter des Platonismus' wissen, daß er bei seinen heutigen Lesern im allgemeinen auf eine kritische Grundhaltung trifft, die ihn zwingen sollte, besonders ausführlich und genau zu argumentieren. Dies ist bei den vorliegenden Ausarbeitungen nicht zu bemerken. Aus der platonistischen Interpretation von Gedankenexperimenten folgt bisher nicht mehr, als bloß rhetorische Emphase über das *apriori* der Natur. Es ist ja offensichtlich nicht so, daß aus jeder vernünftelnden Spekulation eine wahre, experimentell bestätigbare Erkenntnis über die Natur gewonnen werden könnte. Hegel, z.B., glaubte durch einen Vernunftschluß beweisen zu können, unser Sonnensystem habe notwendig genau zehn Planeten.<sup>22</sup> Wenn sich jemand zum Platonismus bekennt, können wir von ihm verlangen, uns einen Demarkationsstandard anzugeben, um solche Irrtümer von verbindlichen Einsichten in die Natur (wie der Galileis) zu unterscheiden. Brown verweist in diesem Punkt lediglich auf die Parallelität zur Fehlbarkeit unserer (üblichen) Sinneswahrnehmungen bei optischen Täuschungen und Ähnlichem. Da wir uns auch gelegentlich bei unserer visuellen Wahrnehmung mittels der Augen durch den Schein täuschen lassen, dürften wir nicht verlangen, daß unsere Wahrnehmung der Naturgesetze mittels der Gedankenexperimente fehlerfrei und unrevidierbar sein muß. Hier kann man jedoch einwenden, daß über optische Täuschungen ausgiebige empirische Untersuchungen und weitreichende sinnespsycho- und physiologische Theorien vorliegen, dagegen ist die Brownsche Theorie der Naturgesetzwahrnehmung mittels Gedankenexperimente

<sup>21</sup> z.B. Cartwright (1983)

<sup>22</sup> Hegel (1801)

noch nicht so weit entwickelt, um auch nur eine einzige hanebüchene Spekulation als (Selbst-) Täuschung zurückweisen zu können.<sup>23</sup>

Die negative Antwort lautet: Es gibt nichts, was ein Gedankenexperiment bei einer Schlußfolgerung auf eine empirische Tatsache vor einem Irrtum schützen kann. Das war die erste Reaktion von Seiten von Duhem (1906) und Meinong (1907) auf Machs Arbeiten über den großen Nutzen von Gedankenexperimenten in der Naturwissenschaft (1883, 1897, 1906). Mach war natürlich weit davon entfernt, sich zum Platonismus zu bekennen. Aber gerade das ist den Kritikern aufgestoßen: Daß in der Wissenschaft überhaupt und in Machs eigenem Verständnis von ihr insbesondere Gedankenexperimente nichts zu suchen haben. Gedankenexperimente fallen in das Feld des Psychologischen und sollten deshalb aus den exakten empirischen Wissenschaften verbannt werden. Die Naturwissenschaft geht deduktiv vor, ausgehend von Prämissen, die ausschließlich durch den Gesamterfolg aller abgeleiteten Tatsachen gerechtfertigt werden. Die Suche nach neuen Prämissen ist eine Frage von Kreativität und (im Gegensatz zu der impliziten Unterstellung in Machs Arbeiten über das Gedankenexperiment) nicht weiter rational rekonstruierbar. Wenn die Gedankenexperimentalmethode scheinbar Erfolge produziert, so ist das eine Augenwischerei oder ein Selbstbetrug (wenn ein Gedankenexperiment tatsächlich nur bekanntes Wissen referiert).

Der Punkt ist nicht ganz von der Hand zu weisen, daß die Darstellung von Galileis Argumentation *als ein Gedankenexperiment* die Gefahr des Selbstbetrugs (in psychologischer Terminologie: der Rückschaukonstruktion) enthält. Tatsächlich ist für Galilei das Ergebnis des Gedankenexperiments bei weitem nicht so eindeutig, wie Brown oder Mach dies darstellen. Der Dialog über die Fallgesetze ist deutlich länger als das Gedankenexperiment. Viele Einwände werden vorgebracht und anhand des vorhandenen Wissens geprüft. In Fällen, bei denen das vorhandene Wissen keine Entscheidung ermöglicht (z.B. der Frage, ob die Luft ein Gewicht hat und damit für die empirischen Unterschiede in der Fallgeschwindigkeit verantwortlich gemacht werden darf) diskutiert Galilei die Möglichkeit von zukünftigen realen Experimenten, um diese Voraussetzungen zu überprüfen. Solche Kontrollen hielt aber Galilei (im Gegensatz zu Brown) für absolut unerlässlich - viele Seiten nach der Vorstellung des Gedankenexperiments schreibt Galilei noch immer über die Behauptung, daß verschiedene Körper „keinen Unterschied in der Geschwindigkeit beim Falle zeigen“: „diese Lehre [...] ist vollkommen neu und auf den ersten Anblick recht unwahrscheinlich [...]; denn obwohl ich die Sache nun schon habe meinen Lippen entchlüpfen lassen, so muss ich doch noch die beweisenden Experimente nachholen.“<sup>24</sup> Es ist offensichtlich: Galilei selbst hat nie behaupten wollen, durch das bloße Gedankenexperiment sei eine Naturtatsache *bewiesen* worden; und auch der Vorwurf von Duhem,<sup>25</sup> mit

<sup>23</sup> cf. auch Norton (1993b)

<sup>24</sup> Galilei (1638, 74)

<sup>25</sup> Duhem (1906, 272)

Gedankenexperimenten bloße Vermutungen für Tatsachen auszugeben, trifft auf Galileis eigene Darstellung des Gedankenexperiments nicht zu. Wenn man Galileis Gedankenexperiment im Rahmen der Standardauffassung historisch angemessen beschreiben will, muß man den Erkenntnisgewinn durch das Gedankenexperiment sehr bescheiden formulieren. Durch das Gedankenexperiment wurde nichts bewiesen, aber auf einer vagen, psychologischen Ebene läßt sich behaupten: Es hat Zweifel an Aristoteles aufkommen lassen und die Suche nach einem besseren Fallgesetz auf einen fruchtbaren Weg geleitet, auf dem jedoch noch eine lange, unabhürz- |<sub>12</sub> bare Strecke experimenteller Arbeit liegt, bevor man zu dem kommen darf, was Brown als das sofortige Resultat, „plain as day“, des Gedankenexperiments präsentiert. Die Kritik von Duhem ist aber gerade, daß in der Darstellung wissenschaftlicher Arbeiten sämtliche psychologisierenden Beschreibungen deplaziert sind. D.h., indem man die Argumentation von Galilei zu einem *heuristischen Instrument* erklärt, anstatt sie in Postulate und Deduktionen zu analysieren, verfälscht man die Physik.

Das Problem mit Duhems skeptischen Standpunkt liegt in der dann erstaunlichen Persistenz der Gedankenexperimentalmethode bei durchaus seriösen und erfolgreichen Naturwissenschaftlern. Die Physiker kümmern sich einfach nicht um die wohlmeinenden Hygienevorschriften der Wissenschaftsphilosophen. Es mutet wie ein Treppenwitz der Gedankenexperimentalliteratur an, daß unmittelbar bevor Duhem seinen Bannfluch über die Gedankenexperimente aussprach - und damit übrigens durchaus Mach überzeugte, der wie gesagt die Begeisterung der Physiker für diesen Begriff zu verantworten hat: er bedankte sich freundlich für Duhems Warnung und vermied in allen späteren Veröffentlichungen das Thema<sup>26</sup> - von Duhem unbemerkt die nächsten wissenschaftlichen Revolutionen mit einem ganz ungenierten Gedankenexperimentieren angezettelt wurde: Einsteins spezielle Relativitätstheorie und seine Lichtquantenhypothese. Man kann sich des Eindrucks nicht erwehren, daß Naturwissenschaftler auf Gedankenexperimente in einer Form, die Duhem entgangen ist, nicht verzichten können. Wenn Gedankenexperimente nur ein heuristisches Instrument wären, könnten die Wissenschaftler wenigstens in ihren Fachpublikationen (im Gegensatz zu den populärwissenschaftlichen Darstellungen) auf sie verzichten.

Diese Alternative - Brownscher Platonismus oder Duhemscher Skeptizismus - folgt wie gesagt ziemlich zwangsläufig, wenn man die Aufgabe von Gedankenexperimenten darin sieht, wahre, nichttriviale, experimentell überprüfbare Tatsachen und Naturgesetze herzuleiten. Die Alternative läßt sich umgehen, jedoch zum hohen Preis der eigenen Trivialität. Trivialität soll nicht heißen, daß die Alternative zur Alternative falsch wäre, sondern daß sie wissenschaftsphilosophisch betrachtet überflüssig ist.

<sup>26</sup> Mach (1905), Fußnote auf Seite 188. Die Fußnote findet sich erst ab der 2. Auflage, 1906

Man findet in der Literatur zwei Tendenzen, dem Begriff „Gedankenexperiment“ einen Sinn zu geben, deren Nutzen für das Verständnis von Naturwissenschaft aber schwer nachzuvollziehen ist, unabhängig davon, daß die Details dieser Versuche, normalerweise wenig anstoßerregend sind und auch durchaus interessante und wichtige Elemente enthalten. Zum einen geschieht dies, indem der Begriff des Gedankenexperiments wissenschaftsphilosophischen Debatten aufoktroziert wird, die man bisher auch sehr gut ohne diesen Begriff führen konnte (und tatsächlich von der überwiegenden Menge der anderen Autoren ohne diesen Begriff weitergeführt werden). Zum anderen, wenn der Begriff des Gedankenexperiments ohne nachvollziehbaren Bezug zu seinen Vorbildern in der Wissenschaftsgeschichte (Stevin, Galilei, Einstein, etc.) als Fachbegriff neu erfunden wird. Hier nur ein kurzer Überblick über diese Optionen:

„Gedankenexperiment“ sei der Name für einen Teil des Komplexes „reales Experiment“; soll heißen: der mehr oder weniger verselbständigbare Teil der Planung eines realen Experiments oder der Nachbearbeitung nach einem solchen. Bekanntermaßen ist ein reales Experiment nicht nur ein physischer Akt, sondern benötigt das Denken. So wußte schon Kant, daß man, um ein Experiment durchzuführen, eine *Frage an die Natur*<sup>27</sup> stellen muß und das heißt, sich über die Bedeutung möglicher |<sub>13</sub> Antworten der Natur vorher klar wird. Auch der Schritt von den Daten zu einer Theorie ist ganz offensichtlich gedanklicher Natur. - Nach dieser Theorie des Gedankenexperiments lassen sich die Denkleistungen bei der Durchführung realer Experimente in Grenzfällen weitgehend von der (Notwendigkeit zur) realen Ausführung entkoppeln, z.B. wenn man bei der Planung eines realen Experiments entdeckt, daß die für möglich gehaltenen Antworten der Natur schon durch das bekannte (Alltags-) Wissen auf eine einzige eingegrenzt werden kann.<sup>28</sup>

In die gleiche Richtung gehen die Versuche, die Gedankenexperimentalmethode mit gleichermaßen bekannten, aber vom realen Experiment unabhängigen Wissenschaftsmethoden zu identifizieren, insbesondere dem wissenschaftlichen Gebrauch von Argumenten auf der Basis von vorher bekanntem, aber eventuell durch das Gedankenexperiment aktualisiertem Wissen.<sup>29</sup> Als vorzeigbare Ressourcen für aktualisierbares Wissen kann man, z.B., auf die Alltagserfahrung, bzw. die durch den alltäglichen Umgang mit der Natur geübte Intuition zeigen. Oder, etwas komplizierter, auf die an den erfolgreichen Umgang mit der Natur angepaßte Grammatik unserer Umgangs-

<sup>27</sup> KrV, Vorrede zur zweiten Auflage, B XIII f.

<sup>28</sup> cf. z.B. Mach (1906, 188f): „Der Ausfall eines Gedankenexperiments, die Vermutung, die wir an die in Gedanken variierten Umstände knüpfen, kann so bestimmt und entschieden sein, daß dem Autor - mit Recht oder Unrecht - jede weitere Prüfung durch das physikalische Experiment unnötig scheint. Je schwankender, unbestimmter aber dieser Ausfall ist, desto mehr drängt das Gedankenexperiment zu dem physischen Experiment als seiner natürlichen Fortsetzung, welche nun ergänzend, bestimmend einzugreifen hat.“

<sup>29</sup> cf. Norton (1991)



sprache.<sup>30</sup> Dieser Gedanke - die *Aktualisierung von verborgenem Wissen durch Gedankenexperimente* - ist ein wichtiger Beitrag zum Verständnis von Gedankenexperimenten. Leider wird dieser Ansatz regelmäßig in einer Weise entwickelt, die wenig für das Verständnis von etwas spezifisch Gedankenexperimentellen dienlich ist, nämlich als Hintergrunderklärung für die Rekonstruktion der logischen Struktur eines Gedankenexperiments.<sup>31</sup> D.h. die konkreten Erfahrungsinhalte die durch ein Gedankenexperiment aus vorher unbeachteten Ressourcen in die aktuelle naturwissenschaftliche Diskussion eingeführt werden, werden einfach als Gegeben vorausgesetzt oder bestenfalls im Dunstkreis des Psychologischen entwickelt. So jedoch dienen diese Theorien des Gedankenexperiments dann nur als Beiträge zum unerschöpflichen Thema, wie man von gegebenen - im vorliegenden Fall nicht durch ein neues Experiment, sondern durch ein Wiedererinnern gegebenen - Daten zu Theorien kommt. Alle Aspekte von Theorien des Gedankenexperiments in diesem und dem letzten Absatzes können sich mit Recht auf die Tradition von Mach berufen, der die Gedankenexperimente dem Thema „Anpassung der Gedanken an die Tatsachen und aneinander“ zuordnet.

Gedankenexperimente wurden auch mit Modellrechnungen, Computersimulation oder idealen Rechnungen identifiziert,<sup>32</sup> d.h. mit Methoden, die bestehende Theorien an die Grenzen ihres Anwendungsbereichs führen, manchmal auch vorher unbekannte Epiphänomene von bekannten Gesetzen offenbaren, aber ansonsten nicht über die bestehenden Theorien hinausführen. Das wäre zwar eine substantielle Begriffsdefinition für Gedankenexperimente, nur würde diese die bekannteren Gedankenexperimente der Wissenschaftsgeschichte, z.B. das Galileische, ausschließen. Außerdem könnte man einwenden, daß der Begriff „Computersimulation“ weit treffender für <sup>14</sup> seine Bedeutung steht, als wenn dieser durch das Wort „Gedankenexperiment“ ersetzt würde. Einschränkend muß man jedoch erwähnen, daß neuerdings einige Wissenschaftler ihre Computersimulationen und Modellrechnungen selbst als Gedankenexperimente bezeichnen<sup>33</sup>.

### III. Zur historischen Rolle von Gedankenexperimenten in der Physik

Wenn man die Aufgabe von Gedankenexperimenten darin sieht, neues, nichttriviales Wissen über die Natur durch Denken allein zu generieren, hat man das Problem, zwischen unbefriedigenden Standpunkten wählen zu müssen:

<sup>30</sup> cf. Wittgenstein (1930, 52)

<sup>31</sup> cf. die modallogischen Rekonstruktionen von Gedankenexperimenten bei Rehder (1980a und 1980b) und Sorensen (1992)

<sup>32</sup> Humphreys (1992 und 1993)

<sup>33</sup> cf. z.B. Telser (1977) oder White (1990)

- Einem Gesetzesplatonismus und dem Problem, trotzdem nicht angeben zu können, wie die Vernunft die Natur apriori erkennt, ohne sich bei erster Gelegenheit einen Bären aufbinden zu lassen.
- Einem Verbot für Gedankenexperimente in den empirischen Wissenschaften und dem Problem, sich damit gegen die Wissenschaftsgeschichte zu stellen. Oder
- einer Reduktion der Gedankenexperimentalmethode auf weniger provokanten Wissenschaftsmethoden und der Gefahr, damit das Thema zu verfehlen.

Was ist das Thema? Das augenfällige Auftreten von Gedankenexperimenten in bedeutenden wissenschaftlichen Arbeiten von berühmten Physikern, die sich nach einem landläufigen Verständnis eigentlich mit der Auswertung der Daten von realen Experimenten hätten beschäftigen sollen. Welche Rolle spielen diese Gedankenexperimente in der Wissenschaftsgeschichte (wenn, wie oben behauptet, die Versuche, die Gedankenexperimentalmethode auf weniger provokante Wissenschaftsmethoden zu reduzieren, ihrer historischen Rolle nicht gerecht werden)? Ich möchte hier im wesentlichen eine These zur Rolle von Gedankenexperimenten in der Wissenschaftsgeschichte formulieren, die mit einigen Erläuterungen und Beispielen illustriert werden soll.

Diese Vorgehensweise bedarf einer Erläuterung: Es geht hier in erster Linie um den Versuch, einem Begriff „Gedankenexperiment“ einen Sinn zu geben, der in die Interpretation der Wissenschaftsgeschichte erst relativ kürzlich eingeführt wurde. Und zwar einem Begriff, von dem im letzten Abschnitt klar geworden ist, daß er gegenwärtig noch so divers und unscharf gebraucht wird, daß man sich heute in einer wissenschaftsphilosophischen Diskussion keineswegs lächerlich machen würde, wenn man ihm jede Bedeutung rundweg abspricht. Wie oben erklärt, liegt das einzige wirklich gute Argument, warum man das nicht voreilig tun sollte, in der starken Intuition, die von vielen Naturwissenschaftlern und Wissenschaftsphilosophen geteilt wird: Daß in den paradigmatischen Gedankenexperimenten etwas Besonderes und Wichtiges zu finden ist, was sich nicht auf die übrigen Methoden der Naturwissenschaft reduzieren läßt und deshalb einen genuinen Namen verdient, auch wenn das Besondere an den Schlußfolgerungen in den Gedankenexperimenten bisher noch nicht überzeugend individuiert wurde. Was in diesem Abschnitt versucht werden soll, ist also nicht, die Geschichte der Naturwissenschaft durch die Gedankenexperimente der Naturwissenschaftler neu zu erklären, sondern innerhalb der Wissen- |<sub>15</sub> schaftsgeschichte das Thema zu entdecken, bei dem die intuitiv schon so genannten Gedankenexperimente auftreten. Die freie Variable in diesem Abschnitt ist die Bedeutung des Begriffs „Gedankenexperiment“, nicht die Interpretation der Wissenschaftsgeschichte. Die Aufgabe besteht auch darin, den Anwendungsbereich des Begriffs „Gedankenexperiment“ in der wissenschaftshistorischen Literatur zu

beschränken, indem nur *ein* durchgehendes Thema der Wissenschaftsgeschichte aufgezeigt wird, bei dem regelmäßig von Gedankenexperimenten Gebrauch gemacht wurde. Dieser sinnvolle Gebrauch des Begriffs „Gedankenexperiment“ in der Wissenschaftsgeschichte umfaßt durchaus mehr als die strengste Auswahl der obengenannten *paradigmatischen* Gedankenexperimente - aber weit weniger, als in der Vereinigungsmenge aller Sekundärliteratur als „Gedankenexperiment“ gehandelt wird. Aus Platzgründen muß ich hier die Aufgabe unbehandelt lassen, den vielen anderen Vorschlägen der Literatur, Gedankenexperimente in der Wissenschaftsgeschichte zu lokalisieren, nachzuweisen, daß sie die Bedeutung des Begriffs ungeeignet inflationieren. Ich glaube, von dem hier charakterisierten Ort der Gedankenexperimente in der Wissenschaftsgeschichte ausgehend, läßt sich nicht nur, wie ich im nächsten Abschnitt zu zeigen versuche, die Bedeutung von Gedankenexperimenten klar definieren, sondern dann auch umgedreht, von der Wissenschaftsphilosophie zurück zur Wissenschaftsgeschichte, die Rationalität der Wissenschaftsgeschichte ein Stück weiter aufklären.

Gedankenexperimente, so lautet die These, haben eine Funktion beim Prozeß der Theorienentwicklung und -ablösung (also während dessen, was Kuhn „Revolution“ nennt), nicht jedoch (oder höchstens noch als didaktisches Hilfsmittel für Schüler und Studenten, die gerade eine Revolution ihres privaten Naturverständnisses erfahren) beim normalen Fortschreiten der Wissenschaft.

Zu dieser Einsicht kommt man durch die Beobachtung, daß alle berühmten Gedankenexperimente, der obengenannte „paradigmatische“ Kern der Sekundärliteratur, aus Kuhnschen Revolutionsphasen stammen: den griechischen Anfängen der Naturphilosophie, der Entwicklung der klassischen Mechanik in der Renaissance, den Umbrüchen der Physik in unserem Jahrhundert (Relativität und Quanten).

Für diese These spricht auch, daß diese paradigmatischen Gedankenexperimente nur dann einen Sinn machen, wenn es noch keine akzeptierten Theorien gibt, mit denen man über die in ihnen vorgestellten experimentellen Szenarien eindeutig entscheiden kann. Könnte man über ein hypothetisches Szenario mittels einer anerkannten Theorie eindeutig entscheiden, würde man so etwas wohl sinnvollerweise eine „Beispielrechnung“ oder eine „Übungsaufgabe im Physikunterricht“ nennen. Aus heutiger Sicht, also in Kenntnis der Newtonischen Mechanik und der nachfolgenden Theorien, und mit diesen einhergehend, einem modernen Gefühl für die Normalität der Natur, ist man tatsächlich leicht verführt, Gedankenexperimente für Deduktionen der einen oder anderen Art zu halten. („Der einen“ soll heißen: aus Theorien und Prämissen, die man heute für selbstverständlich hält; „der anderen“: aus einer natürlichen Vernunft heraus.) Aus heutiger Sicht lassen sich einige Gedankenexperimente tatsächlich als Beweise ihrer Ergebnisse formulieren, in der Art ihrer Durchführung nicht anders als eine Aufgabe in einer Physikklausur.

Jedoch dürfen wir bei der Untersuchung der Rolle, die Gedankenexperimente in der Wissenschaftsgeschichte spielen, nicht aus den Augen verlieren,

daß viele Prämissen, die für eine logische Deduktion ihrer Ergebnisse vorausgesetzt werden müssen, zu den Zeiten, da die Gedankenexperimente erstmals vorgetragen wurden, bei weitem kein Allgemeingut waren. Zu Stevins und Galileis Zeiten gab es noch keine <sup>16</sup> theoriegebundenen, differenzierten Bedeutungen für Begriffe wie Kraft, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Impuls und den ganzen anderen scharf definierten Fachbegriffen, die zum selbstverständlichen sprachlichen Inventar eines jeden gehören, der sich heute mit statischen und dynamischen Problemen auseinandersetzt oder Aufsätze über die Gedankenexperimente in den Naturwissenschaften verfaßt. Stevins Gedankenexperiment<sup>34</sup> hat zu einer Zeit seine gebildeteren Kollegen von seinem Gesetz der schiefen Ebene überzeugt, als noch niemand, auch er selbst nicht, eine allgemeinverbindliche Vorstellung von Erhaltungssätzen hatte. Eine der Voraussetzungen des Gedankenexperiments, die Unmöglichkeit eines *Perpetuum Mobiles*, widersprach direkt dem praktischen Bemühen unzähliger gelehrter Zeitgenossen (und über Jahrhunderte noch seiner Nachfolger). Galileis obiges Gedankenexperiment wurde Lesern vorgesetzt, die vorher nicht zwischen Momentangeschwindigkeit und Durchschnittsgeschwindigkeit differenzieren konnten, geschweige denn eine heute vertraut klingende Idee über die Wirkung einer vektoriellen Addition von Kräften und Geschwindigkeiten hatten. Sogar Galilei selbst war noch in vielen Bereichen der Mechanik ganz in einer scholastischen Vorstellung verfangen, die sich gravierend von den nach-newtonischen und im modernen Physikunterricht gelehrt Theoriengebäude unterscheidet. - Was folgt daraus? Die Vorstellung ist unplausibel, Gedankenexperimente würden auf eine Art Beweis ihres Ergebnisses hinauslaufen, d.h. auf eine Deduktion durch Standards und aufgrund von Prämissen, *die schon vor dem Präsentieren des Gedankenexperiments explizit vorgelegen haben*.

John Norton hat überzeugend nachgewiesen, daß sich Gedankenexperimente generell als Argumente rekonstruieren lassen (1991, 1993a, 1993b). Aber das ist nur ein Teil der Antwort auf die Frage, was ein Gedankenexperiment ist; der größere Teil des Problems wird durch diese Analyse von Norton erst deutlich: nämlich die Einsicht, *daß die Prämissen auf denen ein solches als Argument rekonstruiertes Gedankenexperiment beruht, zumindest zum Teil im historischen Kontext ihres ersten Auftretens in der wissenschaftlichen Literatur unbekannt waren*. Und dann stellt sich die Frage, ob überhaupt, und wenn ja, welche Beweiskraft die Gedankenexperimente im Kontext ihrer Ersterfindung unter dieser Voraussetzung hatten. Die Erklärung der besonderen Überzeugungskraft (im Gegensatz zu: Beweiskraft) der paradigmatischen Gedankenexperimente (im Vergleich mit anderen unvollständigen Argumenten) bleibt durch den bloßen Verweis auf die Argumentationsstruktur in ihnen offen.

Die These, mit der ich diese Frage beantworten möchte, lautet: Die Definition der Rolle von Gedankenexperimenten muß gerade umgekehrt zu dem stattfinden, was in der obengenannten Standardauffassung vorausgesetzt

<sup>34</sup> Die Darstellung dieses Gedankenexperiments fehlt hier aus Platzgründen, findet sich aber z.B. in Mach (1883, 24ff)

wurde. Das Ziel eines Gedankenexperiments im historischen Kontext ist nicht die Suche nach neuen empirischen Tatsachen und Gesetzen, ohne dafür die Natur beobachten zu müssen. Sondern das Ziel des Vorbringens von Gedankenexperimenten ist es, solche Prämissen in den Naturwissenschaften zu *etablieren*, die eine Interpretation von empirischen Daten in erklärungs-fähigen Naturtheorien überhaupt erst ermöglichen. Gedankenexperimente entwickeln und selektieren durch Vergleich und Abwägung diejenige Menge von Prämissen, die als Erklärungsstandards die Funktion von *normativen Randbedingungen* bei der Formulierung von naturwissenschaftlichen Theorien aus dem empirischen Datenmaterial einnehmen. Systematisch wird dieser Gedanke im nächsten Abschnitt entwickelt; hier schauen wir uns die wissenschaftshistorischen Konsequenzen an. |<sup>17</sup>

Das o.g. Gedankenexperiment wurde von Galilei demnach nicht vorgebracht, um zu beweisen, daß alle Körper gleich schnell fallen, sondern um Normen zu etablieren, anhand derer sich konzeptionelle Mängel in Aristoteles' Fallgesetz aufzeigen lassen, und zwar solche Mängel unter denen sein neues Fallgesetz nicht leidet - man darf hinzufügen: mit einem solchen Erfolg hat Galilei diese Normen in die Naturwissenschaft eingeführt, daß James Robert Brown diese für *apriori* gültig hält. Dieser Vorgang, die Veränderung der begrifflichen Grundlagen und normativen Randbedingungen des Naturverständnisses („Paradigmen“), ist genau das, was Kuhn „Revolution“ nennt.<sup>35</sup>

Die obengenannte These kann auf der Grundlage der skizzierten Interpretation naheliegenderweise verschärft werden.: Wenn Gedankenexperimente in der Lage sind, die begrifflichen Grundlagen und normativen Randbedingungen des Naturverständnisses zu reformieren, sollten sie ein wesentlicher Bestandteil *aller* Paradigmenwechsel im Kuhnschen Sinne sein.<sup>36</sup> Daraus

<sup>35</sup> Mit dieser Definition des Gedankenexperiments läßt sich auch umgekehrt ein Vorschlag zur Klärung des zwar reichlich behandelten, aber noch immer unscharfen Begriff des „Paradigmas“ machen: Das „Paradigma“ einer gegebenen Epoche der Wissenschaftsgeschichte ist die Menge aller (expliziten und impliziten) Prämissen aller Gedankenexperimente, die in dieser Epoche in ihrer Beweisführung als gültig anerkannt werden.

<sup>36</sup> Dies ist *nicht* Kuhns eigene Interpretation der Funktion von Gedankenexperimenten, wie er sie in (1964) beschreibt. Nach seinem Verständnis entwickeln Gedankenexperimente Anomalien der begrifflichen Basis von Theorien mit der gleichen Wirkung auf die Theoriendynamik, wie empirische Anomalien. Mit dieser Analogie zwischen realem und Gedankenexperiment bezüglich der Produktion eines Erkenntnisgewinns (hier: Entdeckung von „Anomalien“) gehört seine Interpretation zu der obengenannten Standardauffassung. Für den empirischen Gehalt der Resultate von Gedankenexperimenten macht Kuhn die Aktualisierung von verborgenem empirischen Wissen verantwortlich, das sich in unseren Erwartungshaltungen und Begriffsdefinitionen niedergeschlagen hat, weshalb er der psychologischen Tradition Machs zugeordnet werden muß: „In den vor dem [Gedanken-] Experiment bestehenden Auffassungen waren indirekt Naturgesetze enthalten, die zu Informationen im Gegensatz standen, die die Versuchsperson mit Sicherheit schon zu besitzen glaubte.“ (p 351) Seiner Lokalisierung von Gedankenexperimenten in den Revolutionsphasen stimme ich hingegen zu: „Eine Krise, ausgelöst durch den Fehlschlag von Erwartungen und gefolgt von einer Revolution, steht im Mit-

folgt, daß sich für jeden grundlegende Theorienwandel der Wissenschaftsgeschichte zeitgenössische Gedankenexperimente auffinden lassen sollten, die zur Vermittlung der Veränderungen in den begrifflichen Grundlagen und normativen Randbedingungen der sich ablösenden Theorien vorgetragen wurden.

Diese Behauptung ist durchaus mit einem *moderaten* Empirismus verträglich. In seiner Reinform besagt der Empirismus, daß ausschließlich in den empirischen Daten eine rationale Begründung für eine Theorienablösung zu suchen ist; die Veränderungen auf der begrifflichen Ebene demnach ausschließlich auf neue empirische Befunde zurückgeführt werden müssen. Dieser radikale Standpunkt ist nach ausgiebigen |<sup>18</sup> Diskussionen heute nicht mehr haltbar. Der Hauptgrund liegt darin, daß er für die historisch adäquate Rekonstruktion von Theorienübergängen ungeeignet ist. Das Problem sieht man z.B. darin, daß Einsteins spezielle Relativitätstheorie schon sehr bald nach ihrer Präsentation 1905 die prominentesten theoretischen Physiker überzeugte, jedoch der Konkurrenztheorie von Lorentz noch für lange Zeit in keinem einzigen *empirisch* zu nennenden Merkmal überlegen war.<sup>37</sup> Ein allgemeiner Trend der Beiträge, nachdem das eingesehen wurde, geht dahin, bei den historischen Theorienübergängen neben den empirischen Daten auch soziologische Faktoren zu berücksichtigen, um die Lücken in der Rechtfertigung von Theorienablösungen mittels empirischer Daten zu schließen. Ein moderater Empirismus schwächt die generelle Aussage von oben ab: Welche Gründe auch immer sonst noch für einen Theorienwandel verantwortlich sind, empirische Gründe haben das Privileg, auf jeden Fall eine Theorienablösung zu erzwingen. Möglichst moderat formuliert heißt das, wenn nach allgemein anerkannten Meßergebnissen die Empirie gravierend von dem abweicht, was eine bisher geglaubte Theorie behauptet, und es eine - wie auch immer gefundene - andere mathematische Theorie gibt, bei der diese Abweichung nicht besteht, wechselt man die Theorie, auch wenn es noch so starke andersartige Gründe für die alte Theorie gibt. Aber wenn das der Fall ist, wo ist dann noch Platz für Gedankenexperimente? Widerspricht das nicht meiner These?

telpunkt der Gedankenexperiment-Situation, [...] Umgedreht ist das Gedankenexperiment eines der wesentlichen analytischen Mittel, die während der Krise eingesetzt werden und dann zur grundlegenden theoretischen Neuorientierung beitragen“ (p. 350) - Das Problem mit dieser Textstelle liegt darin, daß Kuhn seine treffende Formulierung „analytisches Mittel“ selbst nicht ernst nimmt und hier, wie in anderen Texten (1970, 1962/70), allein die psychologischen Mittel und Wege bei einem Theorienübergang behandelt. (siehe auch die Kritik von Humphreys (1993)). Ich behaupte, daß Gedankenexperimente tatsächlich ein *analytisches* Mittel sind, die den Paradigmenwechsel während einer Revolution *rational* (im Gegensatz zu: bloß psychologisch) begründbar machen. Wenn ein Gedankenexperiment den analytischen Vergleich von einem alten mit einem neuen Paradigma ermöglicht, ist natürlich Kuhns These von der „semantischen Inkonsistenz“ der Begriffe von verschiedenen Paradigmen nicht mehr aufrecht zu halten.

<sup>37</sup> cf. Zahar (1973). Untersuchungen mit ähnlichem Ergebnis liegen mittlerweile zu den wichtigsten historischen Theorienübergänge vor.

Die These war, daß alle Theorienübergänge, die mit einer Veränderung des konzeptionellen und normativen Rahmens einhergehen, durch Gedankenexperimente zumindest begleitet, wenn nicht sogar vermittelt werden. Wenn ein Theorienübergang durch empirische Daten erzwungen wurde, so ist die These nur dann haltbar, wenn in einer solchen Lage die Wissenschaftler das Fehlen einer Vermittlung des konzeptionellen und normativen Rahmens der neuen Theorie als ein Desiderat interpretieren. D.h., wenn die Wissenschaftler in einer solchen Lage nicht - wozu sie nach einer reinen empiristischen Auffassung durchaus berechtigt wären - zufrieden ihre Hände in den Schoß legen und sich darüber freuen, eine mathematisch formulierte Theorie zu haben, die mit allen soweit bekannten empirischen Daten übereinstimmt, sondern anfangen Gedankenexperimente zu konstruieren - nicht mit dem Ziel eine dritte, noch neuere Theorie zu finden, sondern dazu, den von der Empirie *aufgezwungenen* Theorienwechsel unabhängig vom empirischen Befund zu rechtfertigen. Die Gedankenexperimente sollen in dieser Lage nachträglich die Veränderungen in dem begrifflichen Gerüst vermitteln, mit dem die Natur durch die neue Theorie beschrieben wird und damit die *Erklärungsfähigkeit* (im Gegensatz zur bloßen Vorhersagbarkeit) der Daten durch die neue Theorie beweisen.

Daß das Fehlen von Gedankenexperimenten bei empirisch aufgezwungenen Theorienübergängen als ein Desiderat empfunden wird, sehe ich, dem allgemeinen Trend nach, durch die Wissenschaftsgeschichte bestätigt: Es war in der Wissenschaftsgeschichte nie genug, eine mathematische Theorie vorzustellen, die vorher unbekannte Reichweiten und Genauigkeiten bei der Vorhersage der Natur ermöglicht, wenn diese Theorie auf vorher unbekannten oder für zweifelhaft gehaltenen Grundlagen basiert. Man denke nur an die Diskussionen, die Newtons Begriff der „Fernwirkung“ ausgelöst hat. Meine These ist, daß solche Diskussionen wesentlich mit Gedankenexperimenten geführt werden, und daß der Begriff des Gedankenexperiments seine genuine Bedeutung als Bestandteil solcher Diskussionen hat. |<sup>19</sup>

Ein Musterbeispiel für einen Theorienübergang, der scheinbar perfekt in eine empiristische Interpretation paßt, ist die Geschichte der Quantenmechanik. In Stichpunkten nachskizziert muß man die überraschende Entdeckung von Spektrallinien durch Fraunhofer, Kirchhoff und Bunsen erwähnen, den Versuch von u. A. Balmer, ihre Ordnung in phänomenologische Gesetze zu fassen, und anschließend Bohrs erstes Atommodell, das diese Gesetze mittels eines mechanistischen Modells und einiger „ad hoc“ Postulate zumindest für Wasserstoff recht gut angenähert ableiten konnte. Eine weitere Entwicklungslinie zur Quantenmechanik führt von der empirisch gefundenen Spektralverteilung der Schwarzkörperstrahlung über einige gescheiterte Versuche, diese aus mechanischen Modellen auf der Grundlage der statistischen Thermodynamik und Maxwells Elektrodynamik abzuleiten, zu Plancks Erfolg, durch bloßes Ausprobieren ein empirisch adäquates mathematisches Gesetz zu formulieren. An dieses schloß sich zuerst Plancks, dann Einsteins auf der Grundlage der Meßergebnisse von Lenard erweiterte „heuristische“ Interpretation (1905) an, die als Grundlage für die Entdeckung weiterer Phänome-

ne dienten, z.B. von Compton, Bragg und de Broglie. Diese Modelle der *frühen* Quantenmechanik (bis ca. 1925) gaben allein schon deshalb keinen Anlaß zu ernster Sorge um die Grundlagen des klassischen Naturverständnisses, weil bis dahin Theorie und Meßergebnisse genügend Abweichungen voneinander hatten, um in den Modellen nicht mehr als heuristische Instrumente zu sehen. Dann aber präsentieren Heisenberg und Schrödinger einen mathematischen Formalismus, der all diese Phänomene einheitlich und mit größter empirischer Genauigkeit zu beschreiben vermag. Bis zu diesem Punkt paßt die Geschichte der Quantenmechanik in ein empiristisches Bild der Theorienentwicklung.<sup>38</sup> Der Formalismus der Quantenmechanik bewährt sich bis heute als leistungsfähigstes Instrument, die Phänomene der Natur vorherzusagen; nach einigen Erweiterungen wird er heute im ganzen Spektrum der Physik vom inneren Aufbau der Atomkerne bis zu den kosmologischen Prozessen angewandt. Jedoch ist kurz nach der Entdeckung auch klar, daß dieser mathematische Formalismus mit keinem bekannten mechanischen Modell der Natur verträglich ist. Als erste kuriose Konsequenz des mathematischen Formalismus leitet Heisenberg (1927) die Unbestimmtheitsrelation ab, nach der es eine prinzipielle Genauigkeitsgrenze bei der gleichzeitigen Bestimmung von Ort und Impuls eines Teilchens geben müsse, und damit Vorhersagen für zukünftige Zustände eines jeden physikalischen Systems eine theoretisch nicht überwindbare Grenze der Genauigkeit haben. Die Reaktion der überwiegenden Mehrheit der theoretischen Physiker auf die Interpretationskonsequenzen des mathematischen Formalismus der Quantenmechanik war *nicht*, diese einfach als mathematische Konsequenz einer empirisch bewährten Theorie zu akzeptieren und allenfalls zu hoffen, daß neue und genauere Messungen der Natur den mathematischen Formalismus der Quantenmechanik stürzen würden. Für diese Minderheitenmeinung hatte Bohr nur Spott übrig. So berichtet Teller zu Weizsäcker (1974, 225f) von einer Bemerkung Bohrs,

<sup>38</sup> Der Glaube, die anfängliche Entwicklung der Quantenmechanik ließe sich problemlos im Rahmen des (naïven) Empirismus beschreiben, kann natürlich nur bei einer hinreichenden Grobheit in der historischen Darstellung unirritiert bleiben. Eine genauere Betrachtung der Entwicklung zeigt auch schon vor 1925 unzählige Details, die in ein solches Wissenschaftsmodell nicht hineinpassen. So gab es (siehe Stöckler & Kuhn (1986)) bis 1925 nicht weniger als 23 grundsätzlich verschiedene Herleitungen der Planckschen Strahlungsformeln. Planck selbst hat seine Formel im Laufe der Jahre viermal aus unterschiedlichen Annahmen abgeleitet, obwohl seit seiner ersten Präsentation der Formel im Oktober 1900 zu keinem Zeitpunkt ein Zweifel darüber bestand, daß sie empirisch richtig ist. Dieser große Arbeitsaufwand (der ständig wiederholte Beweis einer längst akzeptierten Formel) läßt sich nicht mit dem Bestreben nach empirisch angemessenen Theorien rechtfertigen. Wir müssen vielmehr auch hier schon annehmen, daß nicht nur das Finden empirisch angemessener Theorien, sondern auch die Herstellung einer *kohärenten* Naturbeschreibung zum wesentlichen Inhalt naturwissenschaftlicher Arbeit gehört. Letzteres impliziert, daß ein für empirisch angemessen erachtetes Naturgesetz in Übereinstimmung mit den theoretischen Hintergrundannahmen stehen muß, und damit, daß nach jeder Weiterentwicklung des Naturverständnisses und der Theorien die schon bekannten, als empirisch angemessen anerkannten Gesetze erneut aus den sich verändernden Hintergrundannahmen abgeleitet werden müssen.



„nachdem er zu einem Kongreß positivistischer Philosophen gesprochen hatte“:

Bohr war tief enttäuscht, weil sie alles, was er über die Quantentheorie gesagt hatte, so freundlich entgegengenommen hatten, und sagte uns „Wem nicht schwindlig wird, wenn er zum erstenmal vom Wirkungsquantum hört, der hat überhaupt nicht verstanden, wovon die Rede ist.“ Sie akzeptieren die Quantentheorie als ein Ergebnis der Erfahrung, denn es war ihre Weltanschauung, Erfahrung zu akzeptieren; Bohrs Problem war aber gerade, wie so etwas wie das Wirkungsquantum denn überhaupt Erfahrung sein kann.

Die prominentesten Vertreter der theoretischen Physik (und auch einige Wissenschaftsphilosophen) betrieben ein großangelegtes Gedankenexperimentieren, genau mit dem von Bohr beschriebenen Ziel: zu erforschen, wie die Theorie der Quantenmechanik mit der menschlichen Erfahrung und der bisherigen Interpretation der Natur verträglich ist. Dieses Gedankenexperimentieren mit der Quantenmechanik wird bis heute fortgeführt, so daß kein abschließendes Urteil möglich ist. Es lassen sich aber einige Themen und Motive der quantenmechanischen Auseinandersetzung mit Gedankenexperimenten charakterisieren:

In der ersten Zeit nach der Entdeckung des mathematischen Formalismus der Quantenmechanik wurden Gedankenexperimente vorgestellt, die untersuchen, wieweit dieser Formalismus mit den *tradierten* Vorstellungen der Physik *verträglich* ist. Schrödinger leitet mit seinem „Katzen-Gedankenexperiment“ einen der „ganz burleske[n] Fälle“<sup>39</sup> der fehlenden Übereinstimmung quantenmechanischer Messungen mit den Alltagsintuitionen ab. Heisenberg dagegen versuchte mit dem „Gammastrahlmikroskop-Gedankenexperiment“ die „anschaulichen Inhalte“<sup>40</sup> der Quantenmechanik zu beweisen: Seine Unbestimmtheitsrelation ergebe sich zumindest in einfachen Fällen aus den epistemischen Randbedingungen eines jeden Meßvorgangs und den bekannten Gesetzen der klassischen Wellenoptik: „Da wir uns [...] die experimentellen Konsequenzen der Theorie in allen einfachen Fällen qualitativ denken könne, wird man die Quantenmechanik nicht mehr als unanschaulich und abstrakt ansehen müssen“ (1927, 196) Sein Argument für diese Behauptung ist jedoch fehlerhaft und wurde von ihm selbst noch im „Nachtrag bei der Korrektur“ im selben Artikel (1927, 197f) weitgehend zurückgezogen.

Eine große Anzahl von Gedankenexperimenten wurde, nachdem die harmonische Einbettung der neuen Theorie in das vorherige Naturverständnis ausgeschlossen schien, mit *destruktiver* Absicht entwickelt: Wenn sich nicht

<sup>39</sup> Schrödinger (1935)

<sup>40</sup> Heisenberg (1927)

durch konstruktive Gedankenexperimente die Übereinstimmung mit den bestehenden Intuitionen zeigen ließe, so sollten Gedankenexperimente umgekehrt aus den bestehenden, verbindlich gehaltenen Kriterien naturwissenschaftlicher Theorien die Unvollständigkeit, bzw. prinzipielle Mängel der Quantenmechanik beweisen. Ein solcher Beweis wäre dann ein rationaler Grund für die Hoffnung auf eine noch zu findende Nachfolgetheorie<sup>41</sup> der Quantenmechanik ohne deren kontraintuitive Eigenschaften. Die Gedankenexperimente der Bohr - Einstein Auseinandersetzung<sup>42</sup> zählen hierzu, und auch das EPR-<sup>43</sup> und das Bell-<sup>44</sup> Gedankenexperiment wurden mit dieser Absicht vorgetragen.

Die Diskussion dieser Gedankenexperimente hat ergeben, daß die destruktive Absicht angesichts der empirischen Bestätigung der Quantenmechanik nicht überzeugend ist.<sup>44</sup> Aber ihr Nutzen ist dadurch nach Auffassung aller Diskutanten nicht verloren gegangen: sie dienen zur unvoreingenommenen *Interpretation* des mathematischen Formalismus der Quantenmechanik. Der Gebrauch, den man von diesen ursprünglich destruktiv angelegten, wie von vielen neuen Gedankenexperimenten macht, hat grundsätzlich folgende Struktur: Man formuliert eine *vorthoretische* Intuition von einer erwarteten Eigenschaft naturwissenschaftlicher Theorien in einer präzisen Definition, z.B. über die Beziehung einer explizierten Bedeutung von „Kausalität“, „Lokalität“ oder „Objektivität“ zu den inhaltlichen Aussagen physikalischer Theorien. Diese Explikation setzt man im hypothetischen Szenario des Gedankenexperiments dem quantenmechanischen Formalismus aus und überprüft so, welche Interpretationen von Kausalität, Lokalität und Objektivität mit der empirisch bestätigten Quantentheorie verträglich sind und welche nicht. Auf diese Weise lernen wir die Natur besser zu verstehen.

Kurz: die Gedankenexperimente spielten in der Quantenmechanik keine Rolle bei der Etablierung des mathematischen Formalismus, sondern bei der Interpretation, der Einbettung des empirisch gefundenen Formalismus in das Hintergrundwissen. Gedankenexperimente *können keinen* empirisch zutreffenden mathematischen Formalismus beweisen; das Spielfeld von Gedankenexperimenten ist die Kohärenz von Theorien und Hintergrundannahmen, wobei beide zu Disposition stehen.<sup>45</sup> Wenn es um empirisch gut bestätigte Theorien geht, ziehen bei einem Konflikt aber voraussichtlich die tradierten Hintergrundannahmen den Kürzeren.

<sup>41</sup> Bohr (1949)

<sup>42</sup> Einstein *et al.* (1935)

<sup>43</sup> Bell 1964 und 1966)

<sup>44</sup> Den letzten Ausschlag gibt bei dieser Entscheidung immer das reale Experiment. Obwohl die Meßergebnisse für praktisch niemanden mehr überraschend waren, wurde die Fähigkeit von (u. A.) Aspect *et al.* (1982), das Bell-Gedankenexperiment in einem Labor (angenähert) zu realisieren, als wichtiger Erfolg gewertet.

<sup>45</sup> Hier findet sich die etymologische Bedeutung von „Experiment“ wieder: Hintergrundannahmen und Theorien werden im Gedankenexperiment „der Gefahr ausgesetzt“ aufgrund ihrer Unvereinbarkeit aufgegeben zu werden.

Der Unterschied zwischen den Gedankenexperimenten der Quantenmechanik und Galileis liegt nur im zeitlichen Abstand zwischen der Entwicklung des mathematischen Formalismus einer neuen Theorie und dem Formieren des dazugehörigen Paradigmas. Galilei machte, wenn man nur die *Discorsi* konsultiert, beides in Personalunion und gleichzeitig. In der Quantenmechanik waren die mathematischen Physiker schneller, und nicht ein einzelner Wissenschaftler oder Wissenschaftsphilosoph hat bisher *das* Paradigma der Quantenmechanik vorgestellt. Die unterschiedlichen Vorschläge - die „Kopenhagener Interpretation“, Interpretationen mittels „Verbogener Parameter“ oder „Nichtlokaler Wechselwirkungen“, um nur einige Kandidaten zu nennen - kämpfen noch immer miteinander und tun das zu Recht mittels der Gedankenexperimente. Es gibt auch Fälle, in denen zuerst das Paradigma und danach die Theorie entsteht; so stammen die meisten Gedankenexperimente zum Atomismus aus der Zeit vor Mendeleejew und Meyer. Aber an diesem Beispiel sieht man auch, daß |<sub>22</sub> ein Paradigma ohne ausgearbeitete Theorie kraftlos ist, denn obwohl weite Teile der Struktur möglicher Erklärungen der chemischen Phänomene durch Atome schon über Jahrhunderte hinweg ausgearbeitet wurden, war dieses Paradigma bis zur Entstehung der Quantenmechanik bei weitem nicht konkurrenzlos oder auch bloß mehrheitsfähig<sup>46</sup>.

#### IV. Thesen zur Neuinterpretation von Gedankenexperimenten

Unbestreitbar suggerieren viele Gedankenexperimente, daß sie in der Lage wären, informative Tatsachen ohne direkten Rückgriff auf die Empirie herzuleiten. Unbestreitbar beweisen sie ihr Resultat nicht zwingend. (Selbst wenn das bei einigen Gedankenexperimenten der Fall sein sollte, sind das gerade die weniger spektakulären Gedankenexperimente, denn reine Deduktionen von Prämissen sind trivial.) Was heißt „herleiten“, wenn Gedankenexperimente etwas herleiten, das auch falsch sein können muß, damit das Hergeleitete nicht trivial ist? In welchem Sinn leiten Gedankenexperimente etwas her?

Gedankenexperimente leiten ihre Resultate her, vorausgesetzt man akzeptiert all diejenigen Prämissen, die meistens nicht explizit im Gedankenexperiment aufgelistet werden, aber nötig wären, wenn man versuchen wollte, die Schlußfolgerung des Gedankenexperiments als logisch zwingende Deduktion zu rekonstruieren. Was sind das für Prämissen? Nun, wenn niemand nach ihnen fragt, sind das offensichtlich akzeptable Prämissen. Wenn sie jedoch in Frage gestellt werden, ist offensichtlich das Gedankenexperiment, solange die Zweifel nicht ausgeräumt werden können, nicht akzeptabel. Z.B. enthält die obenstehende Herleitung des Satzes „Alle Körper fallen gleich schnell“ in

<sup>46</sup> Mehrheitsfähig war diese Erklärungsstruktur schon vorher. Insbesondere die Erfolge in der Chemie und in der kinetischen Thermodynamik ließen nur noch eine Minderheit der praktizierenden Naturwissenschaftler an der Atomhypothese zweifeln. Aber Mach, z.B., billigte ihr auch nach diesen Erfolgen (bis einschl. Einsteins Erklärung der Brownschen Molekularbewegung 1905) nur einen instrumentellen Wert zu.

Galileis Darstellung viele Prämissen, die von Simplicio und Sagredo zunächst *nicht* akzeptiert werden. Salviati braucht viele Seiten der Erläuterungen um auf alle Einwände einzugehen, die Bedeutung des Satzes einzuschränken (Vakuum) und die fehlenden Begründungen durch unzählige (über das ursprüngliche Gedankenexperiment weit hinausführende) Argumente nachzuliefern, bis die Schlußfolgerung in Galileis *Discorsi* schließlich akzeptiert wird. Andere, auch nicht triviale Prämissen des Gedankenexperiments werden dagegen im Originaltext unhinterfragt akzeptiert - z.B. die, daß sich Gewichte beim zusammenbinden zweier Körper arithmetisch addieren, oder daß für jeden Körper nur die eine, lineare Größe des Gewichts als Ursache für die Fallbewegung im Vakuum genommen werden darf (und nicht noch eine zweite, z.B. eine „Ladung“).

Aber selbst wenn das Gedankenexperiment und alle seine Prämissen akzeptiert worden sind, die für eine logische Rekonstruktion nötig wären, benötigen nach weiteren Argumentationen: dann besteht trotzdem noch die Möglichkeit, daß sein Resultat empirisch falsch ist, denn es könnten ja eine oder mehrere der Prämissen falsch sein, obwohl sie akzeptiert wurden. Wahrheit ist schließlich nicht demokratisch und sich täuschen zu lassen menschlich. Wenn es jedoch keinen Grund zur Annahme gibt, daß das Resultat tatsächlich empirisch falsch *ist*, interessiert diese Möglichkeit unter den gegebenen Annahmen nicht mehr: Das Resultat ist dann auf jeden Fall nicht mehr weiter erklärungsbedürftig.

Offensichtlich ist unser Begriff von Deduktion zu streng, um ihn mit der Gedankenexperimentalmethode zu identifizieren. Aber um ihr Substanz zu verleihen, genügt eine schwächere und plausiblere Interpretation: Wenn Gedankenexperimente vorzugeben in der Lage sind, nichttriviale, neue Tatsachen ohne direkten Zugriff auf die Empirie herzuleiten, dürfen wir annehmen, daß derjenige, der diese Herleitung (unabhängig von der Empirie) akzeptiert, in der Lage ist, diese Tatsachen zu *erklären* - natürlich nur, solange sie von der Empirie nicht als falsch entlarvt wurden. Also auch wenn wir keinen Grund finden (und als nicht-Platonisten gar nicht erhoffen), weshalb Gedankenexperimente systematisch zu einem empirisch wahren Resultat führen sollten, laufen wir keine Gefahr mit der Behauptung:

*Wenn ein Gedankenexperiment die Tatsachenbehauptung<sup>47</sup>  $p$  herleitet, und  $p$  wahr ist, und das Gedankenexperiment unabhängig von der Kenntnis der empirischen Bestätigung von  $p$  akzeptabel ist, dann läßt sich aus diesem Gedankenexperiment eine gute Erklärung für  $p$  gewinnen, und alle Prämissen, die für die Konstruktion der Erklärung nötig sind, dürfen als allgemeingültige Standards guter Erklärungen in der Disziplin angenommen werden, in der das Gedankenexperiment formuliert wurde.*

Diese Behauptung ist eine Beschreibung der Möglichkeiten von Gedankenexperimenten: Gedankenexperimente können uns bei der Entwicklung von Naturerklärungen helfen, aber nicht oder nur indirekt bei der Suche nach vorhersagefähigen Theorien. Diese Interpretation kann sich auf die Wurzeln

<sup>47</sup> Unter Tatsachenbehauptungen fallen auch Naturgesetze oder deren Negationen.

des Begriffs „Gedankenexperiment“ in Ørsted's Wissenschaftsphilosophie berufen.

Ørsted (1811) hat den Begriff des Gedankenexperiments im Kontrast zu dem der „Spekulation“ entwickelt. Sein Anliegen war es, seine romantischen Vorstellungen über die Harmonie zwischen der Natur und dem menschlichen Verstehen beizubehalten, jedoch ohne der Naivität der *Deutschen Naturphilosophie* zu verfallen, die damals schon für Ørsted absehbar sich mit ihren spekulativen Naturerkenntnissen vor den Augen der Experimentalwissenschaftler blamierten. Gedankenexperimente sollen nach Ørsted nur die letzten Schritte von den Fakten zu den singulären Erklärungen und von diesen zu einem sukzessiv vereinheitlichten Naturverständnis ermöglichen, der empirischen Naturerforschung nachgeordnet und in ständigem Rückgriff auf die vorhergehenden Methoden der Naturerforschung: der Alltagserfahrung, der Beobachtung und der realen Experimente. Ørsted legt großen Wert drauf, die epistemische Vormachtstellung der Erfahrung über die von fehlbaren Menschen in Gedankenexperimenten entwickelten hypothetischen Erklärungen der Naturzusammenhänge zu betonen. Im wissenschaftsphilosophischen Einleitungskapitel zu seinem Physiklehrbuch „Der Mechanische Theil der Naturlehre“ schreibt Ørsted:<sup>48</sup>

Die Naturlehre benutze auch da, wo das materielle Experimentiren nicht möglich ist, im Denken die experimentale Form, sie stellt Gedankenexperimente an, das heißt, sie nimmt in Gedanken Handlungen vor, um zu sehen, was dadurch hervorgebracht wird, oder daraus folgt. Im Laufe dieses Buchs wird man manche dergleichen Beispiele finden; von denen nur vorläufig §§. 24, 30, 38 genannt werden. [In diesen Paragraphen wird die Galileirelativität, das Hebelgesetz und das Kräftesuperpositionsprinzip behandelt. U.K.] Zu den Gedankenexperimenten gehören auch die *Hypothesen* in ihrer rechten Anwendung; man versucht nämlich, wie weit man von einem gewissen Grundgedanken aus sich Rechenschaft von einer Naturbegebenheit oder einer Reihe von Naturbegebenheiten ablegen kann; das geschieht dadurch, daß man so weit als möglich aus jenem Grundgedanken alle seine Folgen ableitet, und nachsieht, ob sie sich wirklich so in der Erfahrung vorfinden. Solche Gedankenversuche gehören ganz zur Natur der Wissenschaft, aber man muß sich hüten, daß sie sich nicht als alte verhärtete Lehrmeinungen festsetzen, die man später vielleicht als unvermeidliche behandelt.

<sup>48</sup> Ørsted (1851, 7f) - Dieses Vorwort ist Ørsted's letzte Revision seiner allgemeinen Einführung in die Naturlehre, die er seit 1809 in immer neuen Variationen in Dänisch und Deutsch herausgab, und seit 1811 die Methode des Gedankenexperiments theoretisch erarbeitet. (cf. Ørsted (1809, 1811, 1822, 1844, 1850 (Aufsatz „Über Geist und Studium der Allgemeinen Naturlehre“) und 1851))

Ørsted interpretiert die Gedankenexperimente als hypothetische Erklärungen. Eine Erklärung ist für Ørsted der Nachweis der Kohärenz der Daten mit einem „Grundgedanken“. In einer anderen Fassung schreibt er:

Wenn man nicht deutlich sieht, unter welchem Naturgesetz eine Wirkung oder eine Vereinigung von Wirkungen steht, so sucht man diesen Mangel durch eine Voraussetzung abzuheben. Diesen Voraussetzungen hat man den Namen der Hypothesen gegeben. Man muss sie eigentlich als einen Gedankenversuch betrachten, wodurch man entdecken will, ob etwas nach einer gewissen Voraussetzung mit den übrigen Naturgesetzen zusammengenommen sich erklären lässt.<sup>49</sup>

Wie gesagt hat der Fachbegriff, den Ørsted erfunden hat, in den letzten hundert Jahren Karriere gemacht, während seine eigene Definition dieses Begriffs unbeachtet blieb.<sup>50</sup>

Aus Platzgründen fehlt hier eine Darstellung der historischen Entwicklung der Themen und Interpretationen, die von den verschiedenen Autoren nach Ørsted mit den Gedankenexperimenten verbunden wurden. Es lässt sich in einigen Arbeiten, die wie die meisten Arbeiten über das Gedankenexperiment leider wenig explizit aufeinander bezug nehmen, eine Nebentradition ausmachen, die meine Interpretation stützen. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang ein kurzer Aufsatz von Poser (1984). Er trifft durch eine bloße „Plausibilitätsbetrachtung“ einiger ausgewählter Gedankenexperimente den Kern, wenn er ihre Funktion wie folgt beschreibt:

Sie alle haben die Funktion, nicht allein das alte Paradigma zu zerstören, sondern zugleich eine neue Sichtweise einzuführen. Damit deckt sich unsere [...] Feststellung, daß die *reductio-ad-absurdum*-Gedankenexperimente von einer Akzeptanzbedingung abhängen, die erst mit dem Gedankenexperiment etabliert wird. [...] Damit klärt sich das Verhältnis von fiktivem und absurdem Gedankenexperiment und Wirklichkeit: Es wird nicht in einer apriorischen Reflexion eine Aussage gewonnen, die doch eigentlich nur aus der Erfahrung stammen könnte, sondern es wird ein neues begriffliches Schema angeboten, Erfahrung einzuordnen.<sup>51</sup> | 25

<sup>49</sup> Ørsted (1822, 485)

<sup>50</sup> Ich konnte nur einen, marginalen Aufsatz der Anerkennung von Ørsteds Arbeit über die Gedankenexperimentalmethode finden: Witt-Hansen (1976). Witt-Hansen betont Ørsted's Nähe zu Mach, was nicht ganz unproblematisch ist.

<sup>51</sup> Poser (1984, 194f)

Poser möchte diesen richtigen Gedanken auf der *ontologischen* Ebene entwickeln, wozu er aber in diesem Aufsatz leider nicht mehr kommt. Er schreibt im Schlußabschnitt:

Wovon handelt also ein Gedankenexperiment? Als Annahme bezieht es sich auf einen Sachverhalt, der als möglicher im Sinne einer Ausweitung des Möglichkeitsspielraums gemeint ist. Als Aussage über die Theorie dient es der Klärung des theoretischen Werkzeugs. Als ganze Wenn-dann-Aussage leistet es die Vermittlung einer bestimmten Sicht der Wirklichkeit: Es legt die Struktur, unter der die Wirklichkeit erfaßt werden soll, fest. In die Frage der Ontologie ist es also dadurch eingebunden, daß es für solche Begriffe wie Raum, Zeit und Entropie sagt, „quatenus ens est“: Es löst die ontologische Frage, indem es die Ontologie konstituiert.<sup>52</sup>

Durch diese Richtung, die er seinem Gedanken durch die Verknüpfung der Interpretation von Gedankenexperimenten mit den metaphysischen Fragen der Ontologie für die Ausarbeitung auferlegt, läuft Poser Gefahr, seinen klaren Lösungsansatz durch die Verbindung mit einem zu weitläufigen Projekt wieder zu trüben. Im letzten Absatz beschreibt er die Aufgabe dieses Projekts:

[I]n einer eigenen Untersuchung zu zeigen, [...] daß sich auf erkenntnistheoretischer und ontologischer Ebene einlösen läßt, was die bisherige Analyse nahelegt. Das allerdings hieße, das gesamte Problem des Verhältnisses von Theorie, Forschungsprogrammen und Forschungstraditionen zu der von ihnen erfaßten Wirklichkeit einer neuen Lösung zuzuführen. Auf dem Hintergrund der Entwicklung, die die Behandlung dieses Problems von Popper bis Laudan genommen hat, [...] scheint es erforderlich, die in der Strukturierung des Erfahrungsmaterials wirksam werdende intentionale Komponente, wie sie Mach, Meinong und Vaihinger, aber auch Kuhn, Lakatos und Laudan annehmen müssen [aber bekanntermaßen sich bisher so nicht geäußert haben, U.K.], nicht nur zu berücksichtigen, sondern als eines der die *jeweilige* Wirklichkeit konstituierenden Elemente zu begreifen.<sup>53</sup>

Wenn er im nächsten Satz auch noch einen Bezug der Gedankenexperimente zur Heideggerschen Hermeneutik herstellt, wird klar, daß sein Projekt bisher nicht realisiert wurde und auch noch in absehbare Zukunft hinein als Thema zur Verfügung stehen wird.

<sup>52</sup> Poser (1984, 195)

<sup>53</sup> Poser (1984, 195)

Posers Interpretation der Funktion von Gedankenexperimenten hat jedoch eine wesentlich naheliegendere Ausarbeitung, die sich mit den Bordmitteln der analytischen Philosophie bearbeiten läßt. Der Lösungsweg liegt offen, wenn man die *intentionale Komponente* naturwissenschaftlicher Theorien nicht in der Ontologie oder Hermeneutik ansiedelt, sondern an ihrem natürlichen Ort, der *Struktur wissenschaftlicher Erklärungen*. Daß die Interpretation der Struktur, Möglichkeiten und Grenzen wissenschaftlicher Erklärungen wesentlich von den Ergebnissen der historischen und systematischen Analyse der *naturwissenschaftlichen* Methode abhängt, ist ein Gemeingut - hier kann die Interpretation der Gedankenexperimentalmethode mit der gesamten modernen Literatur zum Thema in Beziehung gebracht werden und zur weiteren Klärung beitragen, ohne vorher in Grundsatzdiskussionen treten zu müssen. Bei Ontologie und Hermeneutik wäre der Wert eines solchen Beitrags durch die Unzahl gänzlich verschiedener Herangehensweisen weit schwieriger zu erkennen. |<sup>26</sup>

Die oben genannte Behauptung, wir seien berechtigt, eine Tatsachenbehauptung *p* für erklärt zu halten, wenn sie durch ein akzeptables Gedankenexperiment gewonnen wurde, beruht auf einem *common sense* Verständnis von einer guten Erklärung. Nach einer Erklärung für eine Tatsache *p* fragt man, wenn die Tatsache *p* nicht in das bisherige Verständnis der Welt hineinpaßt. Man fragt „Warum *p*?“, um eine Erklärung zu bekommen, die das Irreguläre an der Tatsache *p* dadurch beseitigt, daß sie eine passable Verbindung des Auftauchens von *p* mit dem herstellt, was man für den normalen Lauf der Dinge hält. Die Erkenntnis, daß eine wissenschaftsphilosophische Definition der Erklärung diesem *common sense* Verständnis der Erklärung gerecht werden muß, steht im Zentrum der gegenwärtigen Diskussionen in der analytischen Philosophie über die Theorie wissenschaftlicher Erklärungen.<sup>54</sup>

Gedankenexperimente haben einige Eigenschaften, die sie für Fragen nach Erklärungen ideal qualifizieren. Um das zu sehen, brauchen wir nur von Außen zu betrachten, was erfolgreiche Gedankenexperimente bei ihren Lesern bewirken: Bevor sie das Gedankenexperiment kennenlernten, hatten die Leser entweder gar keine Meinung über die Wahrheit von *p* oder glauben sogar an die Wahrheit einer zu *p* konträren Behauptung *q*. Danach sind sie von *p* überzeugt, selbst wenn die vorhandenen Erfahrungen keine sichere Entscheidung über *p* erlauben. Und zwischenzeitlich ist nichts vorgefallen, was Zweifel an der Rationalität dieses Glaubenswandels aufkommen läßt: Ein Gedankenexperiment ist transparent; es besteht aus nicht mehr, als einer Reihe von Aussagesätzen in der allgemeinverständlichen Umgangssprache. Es ist diskursiv und intersubjektiv gültig; es verlangt keine weiterreichenden Fähigkeiten und Kenntnisse von seinen Lesern, als sie in der Wissenschaft, in der es formuliert wurde, von allen Beteiligten vorausgesetzt werden dürfen. -

<sup>54</sup> cf. den Sammelband von Schurz (1988), aber auch schon Scheibe (1971) und Passmore (1962)



Unter diesen Umständen, muß ein Leser, der sich von dem Gedankenexperiment überzeugen läßt, zugeben, daß die Tatsache p so passabel mit seinen Vorstellungen vom normalen Lauf der Dinge oder den ihm natürlich erscheinenden Zuständen in der Welt verbunden wurde, daß sich die Frage „Warum p?“ entweder gar nicht mehr stellt oder auf der Basis der transparenten Argumentationskette des Gedankenexperimentes beantworten läßt.

#### V. Die intentionale Komponente naturwissenschaftlicher Erklärungen

Aber ist nicht durch das früher Gesagte der Prämisse dieser Interpretation der Boden entzogen worden: kann es noch jemals wieder einen Leser, geschweige denn eine ganze Wissenschaftlergeneration geben, die sich von einem Gedankenexperiment überzeugen lassen, nachdem klar geworden ist, daß ein Gedankenexperiment keine logisch zwingende Beweisführung ist? Wird man nicht zumindest zukünftig mehr von einer *wirklichen* Erklärung verlangen, als ein Gedankenexperiment liefern kann?

Die Antwort auf diese Fragen ergibt sich aus dem Verständnis der Rolle und Möglichkeiten von Erklärungen durch naturwissenschaftliche Theorien. Mit den nachfolgenden Ausführungen möchte ich plausibel machen, daß es weder irrational, noch dem Selbstverständnis von Naturwissenschaft fremd ist, sich durch ein gutes Gedankenexperiment überzeugen zu lassen, obwohl jedes davon die logische Möglichkeit offenläßt, auf dem vorherigen Naturverständnis zu beharren. Meine Behauptung der *Rationalität* des durch Gedankenexperimente induzierten Glaubenswandels |<sup>27</sup> in den Akzeptanzbedingungen erklärungsfähiger Theorien geht so weit, daß ich einige naheliegenden Beschreibungsversuche für ungeeignet halte: Weder die Terminologien der Psychologie, Soziologie, noch der Ästhetik sind geeignet, die Akzeptanz eines Gedankenexperimentes informativ zu klären. Wenn also gesagt wird, ein Gedankenexperiment überzeuge durch den Gebrauch von „intuitiven Vorstellungen“ und „anschaulichen Bildern“ oder der jeweils vorherrschenden weltanschaulichen und sozialen Moden und Dogmen, oder der Wandel ließe sich durch das Ziel nach „einfachen“, „eleganten“ oder „schönen“ Naturtheorien erklären, verfehlt das den Punkt. Der durch ein Gedankenexperiment bewirkte Wandel ist rational, weil er sich mit dem Bestreben nach kohärenten Naturtheorien deckt. Alle weitergehenden Beschreibungsversuche in einer naturwissenschaftsfremden Terminologie erübrigen sich damit. Es ist natürlich trotzdem legitim, aus der Rolle eines zuschauenden oder reflektierenden Ästheteten die Ergebnisse der Naturwissenschaft *auch* mit Formulierungen wie „intuitiv naheliegend“, „anschaulich“, „weltanschauungskonform“ und „schön“ zu kommentieren. Angesichts des offensichtlichen Faktums, daß das für weite Teile der modernen, abstrakten Physik intuitiv *falsche* Behauptungen sind, dürfen wir aber vermuten, daß, soweit diesen Begriffen überhaupt ein Sinn geben werden kann, hiermit nicht mehr gemeint ist, als sich aus dem

disziplinkonstituierenden Kohärenzbestreben des Projekts Naturwissenschaft auch ohne diese Übersetzung ergibt. Das Verhältnis ist wie das eines Sportkommentators zu den Fußballspielern: Häufig beschreiben Kommentatoren das Spielgeschehen mit solchen Formulierungen wie „schöner Ballwechsel“ - aber man hat etwas Wesentliches am Fußballspiel nicht verstanden, wenn man daraus schließen wollte, daß die Spieler sich selbst die Produktion von schönen Ballwechseln zur Aufgabe gemacht hätten oder aus einer bestimmten Stellung des Spielgeschehens heraus ihre nächsten Handlungen mit der resultierenden Schönheit rechtfertigen würden. (Selbst wenn sie es tun, wird man das zu Recht als Prahlerei mit einer vorgetäuschten Souveränität über die eigentlichen Regeln ihrer Betätigung interpretieren.) Eine rationale Beschreibung wird den Spielern unterstellen, mehr von dem Schiedsrichter anerkannte Tore als ihre Gegenmannschaft erzielen zu wollen. Soweit ich es überblicke, ergeben sich aus dieser Annahme alle wesentlichen Aspekte der Fußballspiele in Wettkämpfen, einschließlich der Tatsache, daß viele Ballwechsel eben nicht unbedingt schön aber effizient sind. Das heißt nicht, daß andere Beschreibungen nicht auch mit guten Gründen den Anspruch auf *Wahrheit* vertreten können - etwa die Behauptung, Fußball wäre nur wegen der schönen Ballwechsel populär, oder ein bestimmter Spieler würde sich nur wegen der Höhe der Siegerprämie besonders anstrengen - aber diese Beschreibungen haben ein anderes Thema als die rationale Beschreibung der Vorgänge auf dem Spielfeld von einer gegebenen Spielstellung zu einer zeitlich späteren.

Im Gegensatz zu den recht einfachen Regeln des Fußballspiels ist die rationale Beschreibung der Naturwissenschaften mit wesentlichen Schwierigkeiten verbunden. Die zentrale Schwierigkeit liegt darin, daß alle konkreten Aspekte der Naturwissenschaften einem radikalen historischen Wandel unterliegen und auch zu jeder gegebenen Epoche zwischen den verschiedenen Disziplinen, die alle den Anspruch auf *Naturwissenschaft* stellen, sehr unterschiedlich aufgefaßt werden. Es gibt kein Buch mit den niedergeschriebenen Regeln der Naturwissenschaft und keinen Schiedsrichter, der mit Autorität entscheiden kann. Wenn man es deshalb nicht aufgibt, eine rationale Beschreibung der Naturwissenschaft zu suchen, wird man die Rationalität zunächst unterstellen müssen und sehen, wie weit man mit ihr kommt. Die oben genannte Behauptung, das diachrone und für alle Teildisziplinen gültige, *disziplinkonstituierende* Motiv der Naturwissenschaft läge im Streben nach *Kohärenz*, wird von vielen Wissenschaftsphilosophen abgelehnt, weil es zu schwer sei, dem Kohärenzstreben einen informativen Gehalt zu geben, der den genannten historischen Umbrüchen der Naturwissenschaft mit allen ihren Teildisziplinen gerecht wird.

Ein wesentlicher Grund für diese Ablehnung liegt in der falschen Vorstellung, daß man einen informativen Kohärenzbegriff nur dann haben könne, wenn man gleichzeitig die *Konvergenz* aller Naturwissenschaften unterstellt. Die bisherige Naturwissenschaft als ein zielgerichtetes Fortschreiten zu einem feststehenden Einheitsideal zu interpretieren ist jedoch nur mit großen Verbiegungen möglich. Zu offensichtlich sind die historischen Umwege der praktizierten Naturwissenschaften und die Unterschiede in den Details der

Einheitsideale, die zu verschiedenen Zeiten von verschiedenen Wissenschaftlern schriftlich formuliert wurden. Und keines dieser Einheitsideale kann man gegenwärtig für kurz vor der Vollendung stehend halten, obwohl es hierbei immer einige Optimisten gibt.<sup>55</sup> Wenn das Streben nach Kohärenz jeden Schritt der Wissenschaftsgeschichte erklären kann, ist damit aber noch die Prognose für die Zukunft der Naturwissenschaft offen. Die zu einer gegebenen Zeit rationale Entscheidung, daß eine Interpretation der Natur zu einer größeren Kohärenz als eine andere führt, impliziert nicht die Notwendigkeit dazu, sich überhaupt darüber Gedanken zu machen, wie die hypothetisch kohärenteste Theorie aussehen müßte, und schon gar nicht, daß diese Gedanken, wenn man sie anstellt, zu allen Zeiten das gleiche Einheitsideal formulieren. Noch nicht einmal ist dadurch impliziert, *daß* die Interpretationen der Natur in der Rückschau immer kohärenter geworden sind. Solange die Naturwissenschaft beständig mit neuen empirischen Daten konfrontiert wird, sind alle diese unterstellten Implikationen eines Kohärenzstrebens ohne Grundlage. Daß die Naturwissenschaften versuchen, ihre jeweils bestehenden Interpretationen der Natur neuen empirischen Daten auszusetzen, ist eine unkontroverse Behauptung, die sich aus dem Kohärenzstreben ergibt. In der Metapher von oben ergibt sich die Teilnahme an Turnieren aus dem Ziel, Tore zu schießen. Aber damit ist nicht impliziert, daß der Verein auch Tore schießt oder seinen Tabellenplatz behauptet und nicht immer tiefer abstiegt. Und ebenfalls nicht, daß die Institution oder die Regeln des UEFA-Cups so lange überleben werden, daß diesen in der heutigen Definition zu gewinnen für alle Zeiten das Ideal des Strebens der Spieler hergeben kann. Hier ist der Fußball wie die Naturwissenschaft ein zu empirisches Unterfangen, um solche Schlüsse ziehen zu dürfen. Die Behauptung jedoch, ein Verein, der beständig abstiegt, verfolge ein anderes Ziel als das, Tore zu schießen, dient nicht dem Verständnis dieses Sports. Die angeblich historisch zwingende Behauptung, daß das Streben nach Kohärenz bestenfalls einen marginalen Bruchteil der naturwissenschaftlichen Arbeit verständlich mache, ist so irreführend wie die Behauptung die Absichten und Taten von allen außer einem Verein müßten gänzlich anders interpretiert werden, als die der Siegermannschaft.

Durch die Einsicht, ihn von Konvergenz zu unterscheiden, ist der Begriff der Kohärenz natürlich noch nicht inhaltlich bestimmt worden. Von verschiedenen Autoren und für verschiedene Zwecke wurden schon ausgearbeitete Theorien der Kohärenz vorgelegt.<sup>56</sup> Der Kern dieser Arbeiten versteht sich als Beitrag zu Fragen der Wahrheit, zum Realismus oder zur epistemischen Rechtfertigung von Aussagen und Behauptungen - weil diese Dinge nicht unser gegenwärtiges Thema sind, brauchen wir hier nicht auf die Details einzugehen. Das Ziel unserer Überlegungen ist es, den durch ein Gedankenexperiment induzierten Glaubenswandel als einen *rationalen* |<sub>29</sub> darzustellen, d.h. zu zeigen, daß die Entscheidungen, die mit einem akzeptierten Gedan-

<sup>55</sup> cf. z.B. Weinberg (1993)

<sup>56</sup> Für eine kritische Zusammenstellung siehe insb. Bartelborth (1996).

kenexperiment getroffen werden, mit dem Ziel des Unternehmens Naturwissenschaft verträglich sind; daß sich diese Entscheidungen aus einer angemessenen Charakterisierung von dem, was Naturwissenschaft bedeutet, ergeben. Von den bisherigen Ergebnissen über die Gedankenexperimente auf das Ziel der Naturwissenschaft schließend können wir nur feststellen, daß die weitverbreitete Tätigkeit des Gedankenexperimentierens sich *nicht* mit einer Beschreibung deckt, die die alleinige Aufgabe der Naturwissenschaft in der Herstellung von *konsistenten* und *empirisch angemessenen* Theorien sieht. Der empirischen Angemessenheit können sie nicht dienen, weil sie eben in Gedanken stattfinden, und der Begriff der Konsistenz ist unangemessen, weil Gedankenexperimente Entscheidungen zwischen logisch konsistenten Alternativen treffen.

Mit den bisherigen Ausführungen haben wir aus der *Praxis* der Gedankenexperimente in der Wissenschaftsgeschichte und der *Struktur* der Argumente in ihnen auf ihre *Funktion* in der Theorienentwicklung geschlossen: Es *gibt* Gedankenexperimente an den Nahtstellen der Entstehung neuer wissenschaftlicher Paradigmen. Diese Gedankenexperimente sind nur schlüssig, wenn man Prämissen, für die es in den vorherigen Theorien kein Äquivalent gibt, in den Rang von allgemeingültigen *Forderungen* an die Struktur der Theorien in dieser Disziplin hebt. Der Akt der Anerkennung der Beweiskraft eines Gedankenexperiments produziert also normative Randbedingungen für die Formulierung von Theorien. Aus naheliegenden Gründen identifiziere ich diese normativen Randbedingungen mit dem Bestreben *erklärungsfähige* Theorien im Gegensatz zu bloß *vorhersagefähigen* zu entwickeln. Jetzt gilt es, dieses Ergebnis aus der anderen Richtung zu rechtfertigen und dabei zu konkretisieren: Das frühere Ergebnis folgt *auch* einem Verständnis von Naturwissenschaft als einem kohärenzstrebenden Unternehmen. Die Akzeptanz der inhaltlichen Entscheidungen in einem konkreten Gedankenexperiment kann als Ergebnis einer rationalen Abwägungen mit dem Ziel größerer Kohärenz in der Interpretation der Natur verstanden werden. Nur so weit, dies plausibel zu machen, muß der Kohärenzbegriff hier entwickelt werden.

Kohärenz bedeutet, unterschiedliche und ansonsten unverbundene Elemente einer Wissensbasis als Anwendungsfälle einer gemeinsamen Regel, die selbst zu der Wissensbasis gehört, zu interpretieren. Nun ist man natürlich sofort versucht, diese Definition mit einem quantitativen Maß zu erweitern. Aber dieser Versuch ist bisher weitgehend erfolglos geblieben. Das liegt nicht nur daran, daß es mit erheblichen Schwierigkeiten oder einem großen Maß an Willkürlichkeit verbunden ist, eine angemessene Definition der Größen der hier relevanten Klassen und Mengen von Elementen einer Wissensbasis zu geben (Wie viele Daten vereinigt die Regel „Jeden Morgen geht die Sonne auf“ und wie viele mehr die Kenntnis des kopernikanischen Sonnensystems?), sondern auch daran, daß die Elemente einer Wissensbasis von sehr unterschiedlicher Art sind; sie enthält Aussagen auf unterschiedlichen Verallgemeinerungsstufen unterschiedlicher Begriffssysteme (Wie verhält sich das Kohärenzmaß der Regel „Alle Rosen duften“ zu dem der Kenntnis eines biochemischen Produktionsmechanismus von einem ätherischen Öl in einer be-

stimmten Zellart?) Diese Probleme treten beim Versuch auf, globale Aussagen über die Kohärenz zu machen. Für die lokale Anwendung eines Kohärenzvergleichs sind die Probleme etwas kleiner; wir können einige konkretere Ausführungen machen.

Eine Frage, die sich vielleicht aufdrängt, lautet, warum der Kohärenzbegriff so allgemein gefaßt wurde und nicht einfach als Kohärenz von Daten und Theorien, d.h. |<sub>30</sub> als das Ziel einer Vereinheitlichung in Form von empirisch angemessenen Theorien. Hier gibt es zwei Fälle: Dem Kohärenzstreben wäre nur dann genüge getan, wenn es tatsächlich nur noch *eine* Theorie gibt, die empirisch angemessen ist. Das würde aber heißen, daß alle Erfahrungsdaten nurmehr in der Terminologie dieser einen Theorie vorliegen oder anerkanntermaßen ohne Verlust an Informationsgehalt in diese Terminologie übersetzt werden können. In einem solchen utopischen Fall, den wir nicht in der nahen Zukunft der Naturwissenschaft zu erwarten haben, ist die engere Definition von Kohärenz, d.h. Übereinstimmung von Daten und Theorien, akzeptabel. Gibt es aber mehr als eine Theorie, so muß es zu einem Theorienvergleich kommen. Solche Theorienvergleiche auf der Basis des engeren Kohärenzkriteriums durchzuführen war ein zentrales Anliegen der Philosophen des Wiener Kreis; die Chancen für den Erfolg dieses Unternehmens müssen heute als klein gelten. Die übliche Argumentation gegen die Vermutung, man könne die relative Vereinheitlichungsleistung zweier Theorien durch die alleinige Betrachtung ihrer empirischen Gehalte erkennen, problematisiert die Abgrenzung zwischen den empirischen Daten und den Theorien in einer Wissensbasis. Diese Kritik, der ich mich im wesentlichen anschließe, ist unter dem Namen der *Duhem-Quine These* allgemein bekannt: Sobald mehr als ein Interpretationsschema der Natur verfügbar ist, kann die Feststellung, daß etwas ein empirisches Faktum ist, nur noch relative Gültigkeit im Verhältnis zum benutzten Interpretationsschema haben. Die kontingente Sprache von propositionalen Protokollsätzen verhindert, daß man in ihnen reine Abbilder der Natur sehen kann - selbst wenn man voraussetzt, daß es eine objektive Realität von Naturtatsachen gibt, kann man diesen „realen“ Bestandteil nicht mehr eindeutig vom „interpretativen“ trennen, wenn man nur mit Aussagesätzen in einer nicht geschlossenen Wissensbasis operiert. (Relativ zu einer geschlossenen Wissensbasis, z.B. einer Teilmenge der vorhandenen Wissensbasis, kann man natürlich immer einige Sätze als Basissätze auszeichnen.) Als Konsequenz ergibt sich, daß sich durch radikales Ausnutzen der Freiheit bei der Erweiterung der Wissensbasis durch Hilfshypothesen jeder empirische Befund mit einer beliebigen Theorie in Übereinstimmung bringen läßt, und folglich, daß durch den alleinigen Hinweis auf die empirischen Daten kein Theoriewechsel begründet werden kann. Dieses Argument deckt sich mit dem historischen Befund, daß sich der Glaube an vermeintlich nackte empirische Tatsachen durch die Veränderung der vorherrschenden Theorien mitverändert. Das übliche Beispiel sind die „Meßergebnisse“ des Phlogistongehalts verschiedener Stoffe durch Stahl und seine Nachfolger im 18. Jahrhundert.

Ich möchte hier jedoch aus einer etwas anderen Perspektive argumentieren, die selbst durch die Annahme der Existenz von eindeutigen Protokollsätzen unbeschadet bleibt: Wenn das Bestreben der Naturwissenschaft die Steigerung der Kohärenz der Naturinterpretationen ist *und* keine singuläre Theorie-von-Allem vorliegt, die ohne Einschränkung alle Naturbeschreibungen in sich vereinigt, dann kann die Übereinstimmung der vorliegenden Theorien mit den empirischen Daten nicht das einzige Kriterium sein, an dem wir sie messen. Denn in dieser Lage ist es jederzeit möglich, daß eine Regel, die gefunden wurde um einige bisher kontingente Elemente der Wissensbasis zu subsumieren, die Anwendung auf andere Elemente erlaubt, die schon von anderen Regeln subsumiert sind. Dadurch entsteht eine neue Kontingenz in der Wissensbasis, nämlich die Alternative ein Element als Instanz der einen oder der anderen Regel zu interpretieren. Selbst wenn ein quantitativer Vergleich der Anwendungsmengen der beiden Regeln möglich ist, ist es keineswegs eine gute Idee, sich ausschließlich wegen der größeren Vereinheitlichungsfähigkeit für eine Unterordnung unter die allgemeinere der beiden Regeln zu entscheiden. Wenn man nämlich |<sub>31</sub> erwartet, daß später eine noch allgemeinere Regel gefunden wird, die alle bisher betrachteten Elemente unter sich vereinigt, so ist es möglich, daß sich die vorher eingeschränktere Regel unter diese neue Regel subsumieren läßt, die vorher allgemeinere Regel dagegen keine Steigerung der Kohärenzleistung durch Verallgemeinerung erlaubt; sozusagen fest an die ursprünglichen Anwendungsfälle in der Wissensbasis gekettet ist. Einen Blitzschlag als Konsequenz von Zeus' Zorn zu interpretieren vereinigt zwar dieses Ereignis mit unzähligen anderen empirischen Manifestationen seines Zorns, aber dieses Vereinheitlichungsprogramm bleibt sehr bald in einer Sackgasse stecken, wenn für die Gesamtmenge aller Phänomene eine unüberschaubare Menge von kontingenten Annahmen (Hilfshypothesen) über seine wechselnden Gefühlszustände benötigt wird, die sich nicht mehr durch einen einfachen, homogenen Charakter von Zeus interpretieren lassen. Dagegen hatte die Interpretation der Anziehung von Wollfäden an einen geriebenen Bernstein durch die Annahme einer durch eine elektrische Ladung verursachten Kraft anfangs nicht viel mehr als diesen Anwendungsfall, war aber für eine spätere Erweiterung zu weit mehr vereinheitlichenden Beschreibungen geeignet.

Aufgrund der Möglichkeit, in einigen groben Fällen schon mit dem oben recht unspezifisch formulierten Kohärenzkriterium eine eindeutige Entscheidung zwischen zwei Regelsubsumtionssystemen zu treffen und aufgrund der fehlenden Prognosefähigkeit des Kriteriums *Quantität* der Vereinheitlichungsleistung (selbst wenn sich dieses Kriterium formalisieren ließe), müssen wir weitere Kriterien annehmen. Diese Kriterien sollen anzeigen, ob eine gefundene Regel bei einer Subsumtion unter eine allgemeinere Regel durch die Menge ihrer unvermeidbaren kontingenten Annahmen sich im Sinne eines völlig unsubtilen Kohärenzkriteriums als Sackgasse des Kohärenzstrebens herausstellen wird. Um ein letztes Mal die Metapher von oben zu strapazieren: Hüttemann, dem ich die Anregung für diese Metapher verdanke (der aber für meine Auslegung nicht verantwortlich gemacht werden kann),

unterscheidet beim Fußball zwischen konstitutiven Regeln und Regeln der Kunst.<sup>57</sup> Es ist unbestreitbar, daß das Ziel, mehr vom Schiedsrichter anerkannte Tore als die Gegenmannschaft zu schießen, konstitutiv für die Bedeutung von Fußballspielen ist. Betrachtet man jedoch ein konkretes Fußballspiel, ist von einem Tore Schießen im allgemeinen für den größten Teil nichts zu sehen. Statt dessen tummeln sich die Spieler für die meiste Zeit fernab der Tore in einem von Außen betrachtet chaotisch wirkenden Bälle Zuspiesen. Und nicht wenige Spiele enden sogar, ohne daß ein einziges Tor gefallen ist. Trotzdem ist es beim Fußball eine Selbstverständlichkeit, dieses vermeintliche Chaos fernab vom unmittelbaren Schießen auf das Tor als die Anwendung von aus der konstitutiven Regel abgeleiteten Regeln zu interpretieren. Die Spieler realisieren verschiedene *Strategien* oder folgen „Regeln der Kunst“, die alle dadurch gerechtfertigt werden, daß man sie als Ableitungen des durch die konstitutive Regel definierten Ziels interpretiert. Diese Ableitungsbeziehung ist offensichtlich subtil und abhängig von der Erfahrung mit vorherig angewandten aber wieder verworfenen Regeln der Kunst. Wie sich in den Naturwissenschaften die - betrachtet man die wissenschaftsphilosophische Literatur - offensichtlich *intuitiv nabeliegende* Ableitung aus dem Kohärenzstreben „Eine Theorie ist genau dann besser, wenn sie einen größeren Anwendungsbereich hat“ verbietet, ist die Ableitung aus dem Ziel Tore zu schießen „Ein Abspiel ist genau dann besser, wenn es den Ball näher an das gegnerische Tor bringt“ als erfolgversprechende Strategie unbrauchbar. Ein Anfänger wird sich an diese Regel vielleicht für einige Zeit halten, aber mit zunehmender Erfahrung wird |<sub>32</sub> aus dieser vorher strikten Regel bestenfalls noch eine grobe Leitlinie, die durch neugefundene Regeln der Kunst sogar in ihr Gegenteil verkehrt werden kann. Unter manchen Umständen folgt sogar ein Abspiel zum eigenen Torwart aus einer Regel der Kunst, die als fallbezogene Anwendung der Regel, daß der Ball in das entgegengesetzte Tor geschossen werden soll, interpretiert wird. Niemand bezweifelt, daß ein solches Abspiel *rational* sein kann.

Die Ableitung einer anwendungsbezogenen Regel aus einer zieldefinierenden Regel hat offensichtlich keine einfache Struktur, die Ableitung *entwickelt* sich aus einem Prozeß von Konkretisierung und Generalisierung, geleitet von einer Bewertung früherer Entscheidungen. Diese Dynamik arbeitet vom Groben ins Feine, wobei einmal getroffene Entscheidungen revidierbar sind. Die zwei Annahmen, die wir machen müssen, um diese Dynamik als eine rationale darstellen zu dürfen, sind a) die Stabilität der Anwendung auf sehr grobe Fälle und b) die Möglichkeit Regeln unter allgemeinere Regeln zu subsumieren. Das sind recht harmlose Forderungen, die, wie ich denke, in der Wissenschaftsgeschichte erfüllt sind. In einigen Entscheidungssituationen muß das Urteil über den Mangel an Kohärenz eines Regelsubsumptionssystems gegenüber einem anderen für alle Zeiten und gemäß allen später gefundenen abgeleiteten Regeln gleich ausfallen, vorausgesetzt natürlich es werden nur diese beiden Regelsubsumptionssysteme betrachtet und nur in der

<sup>57</sup> Hüttemann (1996, 3ff)

Ausbaustufe, in der sie beim ersten Urteil vorlagen. Wenn also in einer bestimmten Wissensbasis aufgrund der vorhandenen Regeln die Entscheidung getroffen wird, daß das Regelsubsumtionssystem der korpuskularen Theorie des Lichts von Newton dem Kohärenzstreben besser genügt als das der Wellentheorie des Lichts von Huyghens, so ist der Forderung nach Rationalität des Unternehmens Naturwissenschaft genüge getan, wenn die Entscheidungsregeln, die später Fresnels Wellentheorie gegenüber der Newtonischen Korpuskulartheorie bevorzugen, auf die Wissensbasis hundert Jahre zuvor (ohne die damals aktuellen Entscheidungsregeln) angewandt zu der ursprünglichen Entscheidung führen. Vorausgesetzt natürlich, man betrachtet die Entscheidung über die vorherrschende Theorie des Lichts als einen der sehr groben Fälle. An dieser Zuordnung kann man jedoch in diesem Beispiel berechnete Zweifel anmelden, da für alle Beteiligten der hier genannten Theorien des Lichts jederzeit klar war, daß ihre Theorien nur vorläufige Entwürfe darstellen, die auf der Basis einer noch unvollständigen Menge von Phänomenen, die durch diese Theorien in ihrer Weiterentwicklung behandelt werden sollen, aufgestellt wurden. Das Vertrauen in eine Entscheidungsregeln über die zukünftige Kohärenzleistung von zwei Regelsubsumtionssystemen kann auch von dem Erfolg oder Mißerfolg (im Sinne eines groben Kohärenzkriteriums) bei der Anwendung auf zwei andere Regelsubsumtionssysteme ohne Überlappung mit dem Anwendungsbereich der ersten beiden beeinflußt werden. Zu einem Zeitpunkt ist die bloße Tatsache, daß eine Theorie auf einem mechanischen Modell basiert, ein guter Grund für den Glauben, mit dieser Theorie auf dem besten Weg in Richtung Kohärenz zu sein, weil die anerkanntermaßen erfolgreichsten Theorien dieser Zeit von dieser Art sind. Entdeckt man danach jedoch Theorien, die nach allen anderen Entscheidungsregeln erfolgreich sind, sich jedoch nicht mit einem mechanischen Modell ergänzen lassen (z.B. die Elektrodynamik), so verliert dieses Kriterium an Überzeugungskraft. Einen groben Fall kann man z.B. durch die Feststellung konstruieren, daß die Regel „Muß lorentzinvariant formuliert werden“, nach der wir heute über die Qualität von fundamentalen Theorien entscheiden, auch die viel früher Entscheidung gegen die Aristotelische Physik mitträgt oder allgemeiner: daß sich hinreichend viele frühere Projekte der Naturbeschreibung benennen lassen, die selbst nach liberalen Interpretationen von Naturwissenschaft keine Chance haben, jemals <sup>33</sup> wieder aufgegriffen zu werden - etwa solche, die auf der Vorstellung basieren, daß es einen ausgezeichneten und kausal relevanten Mittelpunkt des Universums gibt, in einer Art wie dies bei Aristoteles für den Mittelpunkt der Erdkugel vorausgesetzt wurde.

Es entspricht unserem vortheoretischen Verständnis von Rationalität, daß ein so schwaches Kriterium für die Stabilität von Entscheidungen, das lediglich extreme „Sackgassen“ des Kohärenzstrebens aussondert, aber sogar zuläßt, daß weniger extreme Sackgassen sich als vermeintliche herausstellen und zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgegriffen werden, ausreicht, den Prozeß der Wissenschaftsentwicklung als einen rationalen darzustellen. Um das zu sehen genügt ein Vergleich mit Unternehmungen, die durch das vorliegen



eines expliziten, diachron konstanten und erreichbaren Zielkriteriums per Definition rational sind und trotzdem auf der Ebene der untergeordneten Strategien radikale historische Umbrüche erfahren haben, so daß die Bewertung einer vom Ziel hinreichend weit entfernten Stellung heute gänzlich anders ausfällt, als zu früheren Zeiten. Das Beispiel Fußball wurde schon genannt; vielleicht noch deutlicher ist es beim Schach: Nach heutigen Maßstäben sind viele Züge in den berühmten Partien der romantischen Tradition des letzten Jahrhunderts unverständlich. Damals jedoch hatte man eine große Menge an Vorbildern, die den Nachweis für den Erfolg der romantischen Strategien erbrachten. Die romantische Spielweise wurde (in Profispielen) erst aufgegeben, als es durch den direkten Vergleich hinreichende Beweise für die Unterlegenheit dieser Strategie gegenüber neuen, im 19. Jahrhundert unbekannten Strategien gab.<sup>58</sup> Die romantischen Strategien waren auf der Wissensbasis des 19. Jahrhunderts eine rationale Antwort auf ein Problem, daß für heutige wie damalige Schachspieler völlig gleich definiert ist.

Die Grundlage der hier ausgeführten Beschreibung von Wissenschaft liegt in der Einsicht, daß sich Rationalität nicht erst im Erreichen eines festgelegten Ziels, und ebenfalls nicht im Nachweis des Befolgens einer festgelegten Entscheidungsregel, sondern in erster Linie in der Art der Dynamik von Entscheidungsregeln manifestiert. - Ob sich ein Wanderer in der Wüste rational verhalten hat, ergibt sich nicht zwingend aus der Tatsache, daß er fünf Tage nach seinem Flugzeugabsturz in einer Oase ankommt. Auch nicht daraus, daß er sich stur mit dem Kompaß von seiner vermeintlichen Position in die Himmelsrichtung der vermeintlichen Oase bewegt. Sondern daraus, daß er über ein breites Spektrum an Bewertungs- und Entscheidungsregeln verfügt, deren Ergebnisse er ständig miteinander vergleicht und die er beständig mittels übergeordneter Kriterien der Plausibilität erweitert und revidiert. Ein Kompaß ist dabei ein, aber nicht das einzige nützliche Instrument. Umgangssprachlich erkennen wir gerade den Unternehmungen eine höhere Relevanz für den Gebrauch von Rationalität zu, die sich nicht durch das strikte Befolgen eines festgelegten Kochrezepts mit einem vorgegebenen Zielzustand beenden lassen.

Ein wesentlicher Grund für die Annahme, daß man auch ohne ein im Detail festgelegtes, diachron konstantes Einheitsideal in den Naturwissenschaften von einer Dynamik in Richtung Kohärenz sprechen darf (selbst wenn innerhalb dieser Dynamik der vorherrschende Eindruck entstehen sollte, daß die jeweils formulierten Einheitsideale zunehmend schwerer zu erreichen sind) liegt in der Konstitution der jeweils *offenen Fragen* der Naturwissenschaft. Schon aus dem groben Kohärenzkriterium und ohne daß ein Vergleich zwischen zwei Regelsubsumtionssystemen nötig |<sub>34</sub> wäre, folgt, daß ein vorliegendes Regelsubsumtionssystem nur dann im Einklang mit dem Kohärenzstreben steht, wenn die in ihm enthaltenen kontingenten Annah-

<sup>58</sup> Ich verdanke dieses Beispiel Frank Drieschner. Ein Beispiel für die erfolgreiche Anwendung der romantischen Strategie ist „The Immortal Game“, London, 1851, A. Anderssen gegen L. Kieseritzky.

men in einer Erweiterung eliminiert werden können. Das heißt zum einen, daß es eine mögliche Einbettung in übergeordnete Regeln überhaupt geben kann. Und zum anderen, daß diese Einbettung einen Sinn macht, indem sie Kontingenz eliminiert. Kontingenz läßt sich zwar, wie oben für Kohärenz ausgeführt, nur sehr unbefriedigend mit einem globalen Maß versehen, aber das ist für den Gebrauch, den wir hier von diesem Begriff machen wollen, ebenfalls nicht nötig. Wir müssen lediglich Kontingenz lokal erkennen können durch das Aufzeigen von *n* ausformulierten und konträren Alternativen, die sich mit dem bestehenden Inhalt der Wissensbasis (also weder durch übergeordnete Regeln noch dadurch, daß nur eine von ihnen den gewußten Tatsachen entspricht) nicht entscheiden lassen.

In den groben Fällen führt diese lokale Formulierung von Kohärenz zu eindeutigen Antworten, wie wir oben am Beispiel der mythologischen Erklärung von Blitzen sahen: Die Subsumtion von Naturphänomenen unter die emotionalen Stimmungen eines Gottes läßt sich zwar einbetten in ein globales Charaktergesetz über seine Persönlichkeit. Dieses Charaktergesetz nimmt jedoch nach der offensichtlichen Erkenntnis der Komplexität von Naturphänomenen ein solches Maß an Willkür und Spontaneität an, daß die Hoffnung, die Kontingenz der Zuordnung von Naturphänomenen zu emotionalen Stimmungen *dadurch zu reduzieren*, sehr bald schwindet. Bei fortschrittlicheren Theorien ist die Anwendung des lokalen Kriteriums nicht mehr unmittelbar offensichtlich. Insbesondere bei Theorien, die in gewissen Sinn schon *abgeschlossen* sind, d.h. die sich nicht mehr durch kleine Korrekturen verbessern lassen,<sup>59</sup> ist erst dann ein Fortschritt möglich, wenn eine vorher unbemerkte Art von Kontingenz zunächst erst *entdeckt* wird. Eine Theorie z.B., die aus einer gegebenen Anfangs- und Randbedingung die weitere Entwicklung eines Phänomenbereichs kausal determiniert, läßt nur die Wahl, falsch oder richtig zu sein; eine Kontingenz, d.h. eine unentschiedene Alternative, besteht hier (wenn sie nach den bekannten Daten richtig ist) lediglich auf einer philosophischen Ebene: Warum Theorie und Erfahrung zusammengekommen so sind, wie die Theorie sagt, und nicht eine andere Theorie, die dann auch andere Erfahrungen implizieren würde, in unserem Universum realisiert ist. Diese Kontingenz läßt sich nicht durch Einbettung in eine übergeordnete Naturtheorie, sondern in ein Regelsystem philosophischer Prinzipien eliminieren. Dieses Projekt, die Einbettung in philosophische Prinzipien, wird in der Wissenschaftsgeschichte immer dann als ein eigenständiges Thema der Philosophie betrieben, wenn eine Theorie auf der Ebene der Phänomenbeschreibung in ihrem intendierten Anwendungsbereich ohne Konkurrenz erfolgreich ist, so z.B. Kants „Letztbegründung“ der Newtonischen Mechanik in den *Metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft*. Beide Regelsysteme, die physikalische Theorie und die Prämissen ihrer philosophischen Begründung, lassen sich ab einem fortgeschrittenen Organisationsgrad nur durch die Entdeckung von Kontingenzen weiterentwickeln. Die Kontingenz liegt vor,

<sup>59</sup> Zum Begriff der abgeschlossenen Theorie siehe insb. Heisenberg (1973) und Scheibe (1993).

wenn eine ausformulierte Alternative existiert oder wenn der tatsächliche Anwendungsbereich vom intendierten abweicht. Letzteres eröffnet wie Ersteres eine unentschiedene Alternative, denn die Auswahl des tatsächlichen Anwendungsbereichs wird nicht durch die bestehenden Regeln bestimmt, welche per Definition gerade den intendierten Anwendungsbereich haben. Eine Diskrepanz zwischen intendiertem und tatsächlichem Anwendungsbereich kann es an jeder Stelle eines Regelsystems geben: Die Regeln, nach denen wir entscheiden, daß etwas |<sub>35</sub> ein Anwendungsfall des Newtonischen Gravitationsgesetzes ist, machen keinen Unterschied zwischen Merkur und Mars. Wenn sich dann herausstellt, daß Merkur jedoch tatsächlich nicht durch das Newtonische Gravitationsgesetz adäquat beschrieben wird, so liegt hierin eine Kontingenz. Die Regeln, mit denen Kant die Anwendung der Euklidischen Geometrie in Naturtheorien rechtfertigt, bieten kein Unterscheidungskriterium für die Wahl einer beliebigen Riemanngeometrie. Durch die Entdeckung, daß sich mehr als eine Geometrie konsistent formulieren läßt, die allen bisherigen Forderungen an und Definitionen von Geometrie genügen, stellt sich eine sinnvolle, offene Frage, die durch die spätere Erweiterung des Regelsystems beantwortet wird.

Die historische Dynamik naturwissenschaftlicher Forschungsprogramme ergibt sich aus dem Bestreben, sinnvolle Warumfragen zu den Inhalten der bestehenden Naturtheorien zu stellen und dann zu beantworten. Dies ist der Inhalt der lokalen Anwendung des Kohärenzstrebens. Eine Warumfrage ist nur dann sinnvoll, wenn sie eine klare Alternative von mit dem bestehenden Wissen vereinbaren Möglichkeiten benennt. Bei primitiven Naturtheorien und bei unentwickelten philosophischen Reflexionen ist es sehr leicht eine sinnvolle Warumfrage zu stellen. Bei einer fortschrittlichen Naturtheorie, die zwar durch ihre empirische Bestätigung und die Einbindung in ein Netz von metatheoretischen Rechtfertigungen abgeschlossen gegenüber kleinen Veränderungen ist, aber aufgrund ihres begrenzten Anwendungsbereichs innerhalb der gesamten Wissensbasis nicht als endgültige Theorie-von-Allem auftreten kann, muß ein erheblicher Aufwand getrieben werden, überhaupt in die Lage zu kommen, eine sinnvolle Warumfrage zu stellen - d.h. eine Alternative benennen zu können, die sich nicht mühelos durch den Verweis auf entweder die bestehenden Kriterien erklärungsfähiger Theorien oder die empirische Bestätigung der genannten Theorie entscheiden läßt. Es ist zwar denkbar, daß jemand in einem „großen Wurf“ eine solche Alternative formulieren kann, gleichsam aus dem Nichts heraus in einem Akt spontaner Kreativität. Nahe-liegender ist es, in systematischer Arbeit lokale Kontingenzen der bestehenden Theorie zu suchen. Eine Strategie hierfür besteht darin, gleichsam blind in bisher unerforschten Gebieten des intendierten Anwendungsbereichs Daten zu sammeln in der Hoffnung, empirische Abweichungen zu finden. Eine andere Strategie besteht darin, ebenfalls durch ein gleichsam blindes Ausprobieren Kontingenzen in der Anwendung der normativen Randbedingungen dieser Theorie auf ihren intendierten Anwendungsbereich zu entdecken. Das Erstere heißt: reale Experimente auszuführen. Im Fall von Abweichungen von Theorie und Erfahrung lassen sich dann die mathematischen Regeln der

Theorie so variieren, daß sie den neugefundenen Daten genügen. Das Zweite sind - nach meinem Verständnis - die Gedankenexperimente. Sie bewirken eine Neuorganisation im Netz der metatheoretischen Rechtfertigungen.

Ich argumentiere hier für eine bestimmte *Sicht* des Unternehmens Naturwissenschaft: Die Naturwissenschaft stellt sich die Aufgabe, eine Wissensbasis durch die zunehmend vereinheitlichende Subsumtion unter Regeln zu organisieren. Diese Organisation hört nicht bei den Regeln auf, die wir Naturgesetze nennen; die Naturgesetze nehmen nur eine unscharf begrenzte Mittelposition in einem bestehenden Regelsystem der Naturwissenschaft ein. Ebenso wie die Naturgesetze habe die übergeordneten Regeln einen intendierten Anwendungsbereich und können als Prämissen in gültigen Argumenten stehen. Ebenso wie Naturgesetze haben diese Regeln nicht nur die Aufgabe, zu *beschreiben* (nämlich indem über Etwas gesagt wird, daß es unter diese Regel fällt), sondern auch *vorzuschreiben*, weil mit diesen Regeln Intentionen |<sub>36</sub> verbunden sind, sie auf einen bestimmten, nicht durch die Regel selbst gegebenen Anwendungsbereich zu beziehen. Für naturwissenschaftliche Theorien ist dieses Spannungsverhältnis zwischen Deskription und Präskription bekannt.

Eine Theorie verallgemeinert über die Menge der bekannten Erfahrungen hinaus. Zwangsläufig ist sie damit empirisch unterbestimmt. Wenn es überhaupt eine Rechtfertigung für eine solche Verallgemeinerung gibt, dann liegt sie darin, daß wir mit einer solchen Verallgemeinerung besser fahren, als wenn wir uns auf die Beschreibung des empirisch Gegebenen beschränkten. Es muß dann nicht darüber spekuliert werden, *warum* wir mit den Verallgemeinerungen naturwissenschaftlicher Theorien besser fahren, obwohl sie doch offensichtlich die Gefahr implizieren, empirisch widerlegt zu werden. Es genügt festzustellen, *daß* hierin ein wesentliches Motiv der naturwissenschaftlichen Theoriebildung liegt: zu einer kohärenten Beschreibung der Erfahrung zu finden, d.h. unterschiedliche Erfahrungen als Anwendungsinstanzen der selben Naturtheorie zu interpretieren. Wie die Kohärenz in jedem Einzelfall hergestellt wird - in einer Metapher: ob man die Wale besser zu den Säugetieren oder zu den Fischen zuordnet - läßt sich nicht allgemeingültig durch *ein* übergeordnetes Prinzip entscheiden. Wenn wir das könnten, wäre das Projekt der Naturwissenschaft abgeschlossen. Es entscheidet sich im Normalfall aus der Praxis der Wissenschaft - aus den bestehenden Theorien. Aber *daß* es übergeordnete Prinzipien der Anwendung von Naturgesetzen geben muß, folgt daraus, daß sie verallgemeinern: Wenn das allgemeine Gasgesetz nicht bloß eine Kurzschrift für die bisherigen Beobachtungen der Meßgeräte an den endlich vielen Glaskolben in den Labors endlich vieler Naturforscher ist, muß uns die Theorie mit einer Intention ihrer Anwendungsmöglichkeiten ausstatten. Im Fall des Beispiels wären das zumindest die Regeln nach denen wir etwas als einen Anwendungsfall des allgemeinen Gasgesetzes ansehen, d.h. dieses Etwas als den Gegenstand „Gas“ interpretieren. Die Intention kann nicht identisch mit der Extension des Gasgesetzes selbst gesetzt werden, denn sonst hätte es keinen empirischen Gehalt, es würde sich

nicht als ein *Naturgesetz* qualifizieren: „Das Gasgesetz gilt für alle Gegenstände für die das Gasgesetz gültig ist“, ist eine Tautologie.

Eine Regel beinhaltet immer beides, eine Prädikation und eine Norm. Das Gasgesetz schreibt einem gegebenen Gas bestimmte Wertetripel für Druck, Temperatur und Volumen zu, die dann mit Meßergebnissen verglichen werden können. Aber das Gasgesetz sagt auch, daß etwas, das ich unabhängig von der Kenntnis des Gasgesetzes als Gas erkenne, sich mit der Formel des Gasgesetzes beschreiben lassen *soll*. Wenn sich dieses Etwas trotz meiner Intention, es als Gas zu betrachten, nicht mit dem Gasgesetz beschreiben läßt, so liegt hierin eine offene Frage für zukünftige Erkenntnisfortschritte. Ein Erkenntnisfortschritt kann darin liegen, daß ich die Regeln, nach denen ich etwas für Gas halte, reformiere und zukünftig z.B. Gas von Rauch zu unterscheiden lerne. Aber nicht nur der intendierte Anwendungsbereich eines Naturgesetzes kann der Gegenstand der Prädikation einer übergeordneten Regel sein, sondern auch das Naturgesetz selbst. Es lassen sich auf Naturgesetze und Theorien Eigenschaften abbilden, und diese Prädikation kann selbst wiederum zum Inhalt einer Norm werden. Im Beispiel läßt sich vom Gasgesetz sagen, daß es deterministisch ist, und es läßt sich eine Regel formulieren, daß alle Naturgesetze, die bestimmte intentionale Kriterien erfüllen, deterministisch sind und sein sollen. Diese Prädikation läßt sich nicht nur mit philosophischen Interpretationsbegriffen vornehmen, sondern auch mit unmittelbar anwendungsbezogenen Prädikaten. So können wir z.B. die Eigenschaft „erfüllt den Zwischenwertsatz der Geschwindigkeitsaddition“ definieren, wobei der Zwischenwertsatz der Geschwindigkeitsaddition besagt, daß zwei verschie- |<sup>37</sup> dene, sich in eine Richtung bewegend Körper nach der Herstellung einer Verbindung in jedem Fall mit einer gemeinsamen Geschwindigkeit bewegen werden, die irgendwo zwischen den Größen der beiden vorherigen Einzelgeschwindigkeiten liegt. Aus der Menge aller konstruierbaren kinematischen und dynamischen Theorien wird einigen diese Eigenschaft zukommen und anderen nicht. Das Gedankenexperiment von Galilei funktioniert offensichtlich nur, wenn in den Wissensbasen der Zuhörer die Regel existiert, daß alle *gültigen* kinematischen und dynamischen Theorien den Zwischenwertsatz der Geschwindigkeitsaddition erfüllen. Der Glaube an diese Regel dominiert den Glauben an eine bestimmte Theorie, z.B. Aristoteles' Fallgesetz, weil sie sich auf alle kinematischen und dynamischen Theorien bezieht. Diese Regel vereint viele Einzeltheorien unter sich.

Es sind diese Vereinigungen von Naturtheorien unter übergeordnete Regeln, die selbst wiederum untereinander in einem Netz von deduktiven und subsumtiven Abhängigkeiten stehen, die wir mit dem Themenkomplex des „Verstehens“ identifizieren können. Nach der verbreitetsten, auf Aristoteles zurückgehenden Auffassung hat die naturwissenschaftliche Theoriebildung zwei deutlich unterscheidbare Aufgaben: Zum einen zur Vorhersage der Natur oder allgemeiner: zur adäquaten Beschreibung der Natur zu dienen. Und zum anderen das richtige Verständnis der Natur zu ermöglichen.

Vorhersage ist etwas Pragmatisches: man sucht ein Instrument (Formeln), um das Leben in der Natur zu erleichtern; die Naturwissenschaft würde diesem Ziel vollauf genügen, wenn sie uns (im voraus) wissen läßt, was wann passiert, wo was zu finden ist (bevor wir angefangen haben zu suchen), und was wir tun müssen, um sie wie zu manipulieren. Das Verstehen dagegen ist eine Einstellung zu etwas, ein psychologischer Akt also. Ein zentrales Problem der Wissenschaftsphilosophie stellt sich, wenn man hinter dem Akt des Verstehens einen rationalen Kern postuliert, denn offensichtlich soll das Verstehen der Natur, wie wir es von der Naturwissenschaft erhoffen, auf die Vernunft gegründet sein, nicht auf suggestive Mittel. Diesen rationalen Kern des Verstehens identifiziert man mit den (wissenschaftlichen) Erklärungen: Der Glaube, etwas zu verstehen, ist genau so weit rational begründet, als man dafür eine wissenschaftliche Erklärung hat - alles, was weitergehend zum Problem des Verstehens gesagt werden kann, fällt in den Arbeitsbereich der Psychologie oder der Philosophie des Geistes, nicht mehr in den der Wissenschaftsphilosophie. In welchem Verhältnis stehen die wissenschaftlichen Erklärungen zu den wissenschaftlichen Vorhersagen und beide zu dem oben beschriebenen Kohärenzstreben der Naturwissenschaften?

Die meistzitierte Auffassung ist Hempels These von der *strukturellen Identität* von Vorhersage- und Erklärbarkeit<sup>60</sup>: Beide Tätigkeiten, Vorhersagen und Erklären, müssen, qua wissenschaftlich und rational, eine nomologische Struktur haben, d.h. Ableitungen aus allgemeingültigen Naturgesetzen und für wahr gehaltenen Randbedingungen sein. Der auch nach allen Kritiken an der These der strukturellen Identität weiterhin gültige Grund für diese Annahme liegt in der Intuition, daß sich Erklärung und Vorhersage gegenüber ihren nichtrationalen Varianten abgrenzen sollen. Erklärung ist etwas anderes als Suggestion und Vorhersage etwas anderes als Prophetie. Will man diese Unterscheidungen beibehalten, so müssen wir als Adäquatheitskriterium für Vorhersagen und Erklärungen eine minimale *Transparenzforderung* stellen, die wir so formulieren können: *Erklärungen und Vorhersagen haben die |<sub>38</sub> Form von Schlüssen aus Regeln; die Regeln und Prämissen dieser Schlüsse müssen so vollständig auflistbar sein, wie zur gültigen Ableitung des Vorhergesagten oder Erklärten nötig ist.* Die weitergehende Identifizierung von Erklärung und Vorhersage führt jedoch zu einigen Schwierigkeiten. Unser vorthoretisches Verständnis von einer guten Erklärung umfaßt einerseits weit mehr, als aus anerkannten Naturtheorien vorhergesagt werden kann, andererseits halten wir nicht jede Vorhersage für eine gute Erklärung. Ein Beispiel für Ersteres liegt in der Evolutionstheorie von Darwin. Schon in dieser ursprünglichen Fassung (ohne die späteren molekulargenetischen Erweiterungen) sind wir geneigt zu sagen, daß sie die Entstehung der Arten, so wie wir sie in der Natur erkennen, *erklärt*, obwohl sie nicht geeignet ist, irgendein spezielles empirisches Faktum vorherzusagen zu können. Ein Beispiel für Letzteres liegt in all denjenigen Fällen, in denen ein Naturgesetz zwar das erklärungsbedürftige Ereignis vorherzusagen kann, aber im Kontext der Erklärungsfrage als nicht *relevant* angesehen

<sup>60</sup> Hempel (1965, 367ff)

wird. Ein oft zitiertes Beispiel ist die Erklärung des nicht Schwanger Werdens eines Mannes aufgrund der (vorausgesetzten) Tatsache, daß er regelmäßig zuvor die Antibabypille genommen hat, mittels des allgemeinen Naturgesetzes, daß Menschen, die regelmäßig die Antibabypille einnehmen, nicht Schwanger werden. Dieses Naturgesetz (im Gegensatz zu dem, daß Männer generell nicht Schwanger werden) ist zwar wahr und vorhersagefähig, aber nicht relevant.

Die wissenschaftsphilosophische Diskussion über die Struktur wissenschaftlicher Erklärungen wurde durch solche Beispiele zur Einsicht geführt, daß Erklärungen eine pragmatische Komponente haben. Der Kontext der Fragestellung, die Intention des Fragestellers, muß bei der Entscheidung darüber, ob etwas eine gute Erklärung ist, mitberücksichtigt werden. Ein ausgearbeiteter Versuch, wissenschaftliche Erklärungen zu „pragmatisieren“, ohne ihnen die rationale Struktur abzusprechen, stammt von van Fraassen (1980, Kap. 5). Eine Erklärung hat danach das Ziel, das Explanandum aus einer endlichen Menge der Alternativen, die durch die Bedeutung der Warumfrage aufgespannt werden, zu selektieren. Es ist also nicht notwendig, das Explanandum aus allgemeinen Gesetzen als eine notwendig wahre Aussage zu deduzieren, sondern lediglich die relative Überlegenheit des Explanandums gegenüber einer Kontrastmenge aus solchen Alternativen aufzuzeigen, die der erklärungsuchende Frager für möglich hält.

Hier kann aus Platzgründen kein detaillierter Vergleich zwischen den modernen Beiträgen zur Struktur wissenschaftlicher Erklärungen und meinen obigen Ausführungen stattfinden. Eine kurze Skizze muß genügen.

Wenn man Naturgesetze für einfache Abbildungen der Natur hält, läßt sich durch den Verweis auf ein Naturgesetz keine Intention eines Erklärungs-suchenden befriedigen. Die Tatsache, daß sich das Explanandum aus einem Naturgesetz ergibt, ist unter dieser Annahme identisch mit dem Hinweis, daß es wahr ist - die Antwort auf eine Erklärungsfrage wäre dann nur die als Erklärung offensichtlich ungenügende Emphase, daß das Explanandum eben eine wahre Naturtatsache ist. Es wurden unterschiedliche Entwürfe vorgestellt, diesem Problem gerecht zu werden. Das Problem kann man mit der Frage formulieren: Durch *was* muß die Erklärung das Explanandum gegenüber der Kontrastmenge auszeichnen, um eine gute Erklärung zu sein, wenn der bloße Verweis auf ein Naturgesetz und seine kontingenten Randbedingungen nicht genügt? Alle vorliegenden Antworten gehen tendenziell in die Richtung des oben Beschriebenen: Es wurde gesagt, daß die Erklärung das Explanandum *auf Vertrautes zurückführen* muß, eine *relevante Ursache* angeben (was nicht identisch mit dem Benennen eines Naturgesetzes ist) oder das Explanandum als *Instanz eines* |<sup>39</sup> *gegenwärtig etablierten Verstehensideals* auszeichnen muß, um nur einige wichtige Optionen zu nennen. Die letzte Option hat die größte Nähe zu meiner Interpretation und geht auf Toulmin (1961 und 1972) zurück. Sie wurde häufig diffamiert als „intellektueller Mode - An-

satz“<sup>61</sup>; Erklärung wäre nach diesem Ansatz nicht rationaler begründet, als die Begründung eines ästhetischen Urteils durch den Verweis auf die aktuelle Pariser Kleidermode. Diese Kritik wäre berechtigt, wenn die „intellektuellen Moden“ historisch kontingente Launen wären, die kommen und gehen wohin gerade der Zeitgeschmack läuft. Nach meinem Textverständnis hat schon Toulmin das so nicht behaupten wollen, was hier aber nicht belegt werden soll. Daß dem tatsächlich nicht so ist, versuche ich mit diesen Ausführungen zu zeigen. Die Dynamik der „intellektuellen Moden“ läßt sich rational erklären, ohne daß externe Gründe mehr Einfluß darauf hätten, als sich durch die Zufälligkeiten und die sozialen Randbedingungen der Kreativität ergibt, auf eine für alle Wissenschaftler gleich gestellte Frage eine für die ganze Wissenschaft verbindliche Antwort zu finden.

Nach meiner Interpretation sind die Verstehensideale - treffender: Erklärungsideale - mit der normativen Komponente der metatheoretischen Regeln zu identifizieren. Eine Erklärung referiert, indem sie das Explanandum aus irgendeiner Regel ableitet, auch auf die dieser Regel übergeordneten Regeln und ihren normativen Gehalt. Die Erklärung ist gut, wenn die in diesen Regeln ausgedrückte Intention sich mit der Intention der Erklärungsfrage deckt. Diese Interpretation umfaßt wesentliche Aspekte der vorhandenen Explikationsversuche für wissenschaftliche Erklärungen: So wird das Explanandum auf Vertrautes zurückgeführt; vertraut jedoch nicht im umgangssprachlichen Sinn von intuitiv und offensichtlich, sondern im Sinn von Einbindung in die bestehende Organisation von Wissen. Eine Regel, daß etwas in kausaler Abhängigkeit von etwas anderem steht, kann man nicht nur als Eigenschaft eines Naturgesetzes interpretieren, sondern steht häufig als normative Randbedingung vor der eigentlichen Formulierung des Naturgesetzes. Wenn dieses Naturgesetz in einer Erklärung auftaucht, liegt die Erklärungsleistung im Kontext der üblichen Erklärungsfragen gerade darin, daß dieses Naturgesetz kausal interpretiert werden kann und damit eine relevante Ursache individualisiert.

Und diese Interpretation klärt auch den systematischen Ort des Themas „Prognosefähigkeit“: Auf das Kohärenzstreben bezogen bedeutet Prognosefähigkeit die Erwartungshaltung, daß es nicht einfach zeitlich spätere empirische Daten sind, die die Kohärenzleistung einer Theorie verderben. Die Kontingenz der Anwendung von Regeln auf zukünftige Erfahrungen ist jedoch, wie wir gesehen haben, nicht die einzige in einer nicht abgeschlossenen Wissensbasis, weshalb auch nicht jede Erklärung mit der Fähigkeit zukünftige Erfahrungen zu subsumieren gleichlaufen muß. Eine vorhersagefähige Theorie wird jedoch wegen ihrer bewiesenen Fähigkeit, zukünftige Erfahrungen zu subsumieren, mit gutem Grund als ein vorläufig abgeschlossener Zwischenerfolg des Kohärenzstrebens angesehen. |<sub>40</sub>

<sup>61</sup> cf. Friedman (1974, 180)



## VI. Zur Dynamik der Erklärungen und dem Fortschritt der Naturwissenschaft

Ein neues Erklärungsideal zu etablieren ist etwas anderes, als eine neue mathematische Theorie zu finden. Die Beziehung zwischen beiden Tätigkeiten liegt darin, daß eine gegenwärtig für erklärungsfähig gehaltene Theorie den gegenwärtig akzeptierten Erklärungsidealen, und beide den empirischen Daten genügen müssen. Aus den Abweichungen ergeben sich die offenen Fragen der Naturwissenschaft einer Zeit. Die gefundenen Antworten auf die offenen Fragen produzieren die Dynamik der Naturwissenschaft.

Zu jeder Zeit läßt sich eine Ordnung der Erklärungsideale ausmachen. Wenn die als beste angesehene Erklärung an den Daten scheitert, liegt meist schon der Entwurf für eine zweitbeste Erklärung vor. Keplers Ideal für eine Erklärung des Sonnensystems war die Annahme einfacher Zahlenverhältnisse. Die größte denkbare Kohärenz nicht nur der Daten mit der Theorie, sondern auch der Theorie mit den tieferliegenden Ordnungsschemata der Interpretation der Natur, der theologischen Grundannahmen seiner Zeit, bestand für ihn in der Annahme der Zahlenverhältnisse für die Abstände der Planetenbahnen, die sich aus den Größenverhältnissen ineinander verschachtelter Platonischer Körper ergeben. Diese Erklärung der Planetenbewegungen am Nachthimmel stellte sich nach vielen Berechnungen als nicht vereinbar mit den Beobachtungen heraus. Die hypothetische Vereinheitlichungsleistung der später gefundenen Keplerschen Gesetze ist zwar nach der Intuition ihres Autors schwächer als die mittels Platonischer Körper, die tatsächliche jedoch größer.

Den Nachweis der unabhängigen Existenz von Erklärungsidealen, mathematischen Theorien und Empirie kann man an augenfälligen Beispielen der Wissenschaftsgeschichte führen - an solchen Fällen, in denen die Naturwissenschaftler *niederschreiben*, wie eine ihren Bedürfnissen genügende Erklärung aussehen *könnte*, obwohl sie zu diesem Zeitpunkt durch das Fehlen einer Theorie und gesicherter Daten gar nicht geliefert werden kann.

Betrachten wir ein solches Beispiel aus der Chemiegeschichte; wir lernen dort gleich zwei interessante Erklärungsideale kennen: Auf der Basis der Atomhypothese und damals extrem ungesicherter empirischer Daten hat Prout 1815 seine bekannte Hypothese aufgestellt: Die Atomgewichte der chemischen Elemente seien ganzzahlige Vielfache des Atomgewichts des leichtesten Elements (Wasserstoff). Das erste Erklärungsideal müssen wir heranziehen, um erklären zu können, wie Prout zu seiner Hypothese kam. Diese Entstehung dieser Hypothese läßt sich selbst nach den liberalsten Vorstellungen von empirischer Wissenschaft unmöglich aus den damals vorhandenen empirischen Daten erklären - eine *Rechtfertigung* dieser Hypothese mit den Daten ist ebenso offensichtlich ausgeschlossen. Betrachten wir einige Daten der ersten, 1803 von Dalton veröffentlichten Tabelle mit den „Gewichten der kleinsten

Theilchen“.<sup>62</sup> Setzt man das Atomgewicht von Wasserstoff gleich 1, so fand Dalton z.B. für

Stickstoff: 4,2 - Kohlenstoff: 4,3 - Sauerstoff: 5,5 - Schwefel: 14,4

Nach der Prout'schen Hypothese sollten dies ganze Zahlen sein, für jedes Element eine andere. Kurz vor Prout's Hypothese, 1811, veröffentlichte Avogadro revidierte <sup>41</sup> Zahlen, die er mit seiner neuen Methode (und neueren Daten von u.A. Gay-Lussac) errechnet hatte:<sup>63</sup>

Stickstoff: 13,238 - Kohlenstoff: 11,36 - Sauerstoff: 15,074 - Schwefel: 31,73

Die Daten von Avogadro liegen zwar schon deutlich näher an den heutigen, die einzige empirische „Rechtfertigung“ für Prout's Hypothese besteht aber offensichtlich darin, daß die vorliegenden empirischen Daten im offenen Einverständnis der Chemiker dieser Zeit so ungenau, vorläufig und von ungesicherten Hilfhypothesen abhängig waren, daß sie nicht als grundsätzliche Widerlegung der Prout'schen Hypothese interpretiert werden mußten.

Welche Motivation gibt es angesichts dieser Daten, zu behaupten oder vermuten, genauere Meßergebnisse würden zeigen, daß die Atomgewichte sich als ganzzahlige Vielfache des Wasserstoffs herausstellen werden? Es ist die gleiche, die später Mendelejeff zur Rechtfertigung seines Periodischen Systems der Elemente anführt:

[Dazu] mußte ich mich für irgend ein System der einfachen Körper entscheiden, um nicht bei der Eintheilung derselben mich durch zufällige, sozusagen instinctive Beweggründe, sondern durch irgend ein genaues, bestimmtes Princip leiten zu lassen. Oben haben wir die nahezu völlige Abwesenheit von Zahlen-Beziehungen bei der Zusammenstellung der Systeme einfacher Körper gesehen; jedes System aber, das sich auf genau beobachtete Zahlen gründet, wird natürlich schon deshalb den Vorzug vor anderen Systemen verdienen, die keine Zahlenstütze haben, weil der Willkür nur wenig Spielraum gelassen wird.<sup>64</sup>

Es geht um die Elimination von Kontingenzt. - Eine Theorie oder ein naturwissenschaftliches System hat die Aufgabe, der Willkür so wenig wie möglich Spielraum zu lassen, d.h. die Anzahl unerklärter Annahmen zu minimieren. Eine einfache Zahlenbeziehung, wie sie durch die Prout'sche These behauptet wird, eliminiert die Willkür der Zahlenwerte von Atomgewichten sehr stark, weil sie mit minimalen Voraussetzungen erklären kann, wie es zu diesen Zahlenwerten kommt. Die Prout'sche Hypothese ist eine einfache Anwendung der generalisierten Erklärungsstruktur für die Unterschiede der

<sup>62</sup> Dalton (1803, 13)

<sup>63</sup> Avogadro (1811, *passim*)

<sup>64</sup> Mendelejeff (1869, 26f)

chemischen und physikalischen Eigenschaften der *Stoffe* auf die Erklärung der Eigenschaften der *Elemente*. Kurz vor 1815 feierte die chemisch-atomare Erklärungsstruktur die ersten größeren Erfolge und wurde zu einem unter Chemikern weithin akzeptierten Ideal. Eine große Menge an Phänomenen ließ sich unter die Regel subsumieren, daß sich die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Stoffen mit zum größten Teil noch zu findenden Detailregeln der Überlagerung der Eigenschaften von wenigen verschiedenen Elementen bei chemischen Verbindungen zu Molekülen ergeben. Mendelejeff beschreibt später dieses chemisch-atomare Erklärungsideal in einem Satz:

Die Chemie der Gegenwart stellt sich zur Hauptaufgabe die Abhängigkeit der Zusammensetzung, Reactionen und Eigenschaften der einfachen und zusammengesetzten Körper von den Grundeigenschaften der in denselben enthaltenen Elemente zu erforschen, um den Rückschluss von dem bekannten Charakter eines Elements auf die unbekannte Zusammensetzung und Eigenschaften seiner Verbindungen zu ermöglichen.<sup>65</sup> | 42

Die naheliegende Generalisierung bedeutet, auch die bisher kontingenten Eigenschaften der chemischen Elemente als Resultierende der Verbindung von  $n$  Teilen einer einzigen Art von *Elementaratom* anzusehen. Die verschiedene ganzzahlige Kombination der Elemente führt zu den Eigenschaften der Stoffe und die ganzzahlige Verbindung des Elementaratoms zu den Eigenschaften der Elemente. Für die Eigenschaft „Gewicht“ ist die aus der Mechanik bekannte Verbindungsregel die einfache Addition, d.h.  $n$  Elementaratome mit dem Gewicht 1 können durch die atomare Verbindung ein chemisches Element mit dem Atomgewicht  $n$  bilden. Die Kontingenz der willkürlichen Wahl des Gewichts des Elementaratoms läßt sich durch die Annahme beseitigen, dieses mit dem leichtesten bekannten chemischen Element zu identifizieren. Tatsächlich war diese letztere Annahme die erste, die aufgegeben wurde, nachdem klar wurde, daß sich die gemessenen Werte der Atomgewichte zwar in immer verbesserten Experimenten stabilisieren, jedoch nicht zu ganzzahligen Vielfachen des Wasserstoffgewichts. Die Prout'sche Hypothese wurde zur Forderung nach bloß ganzzahligen Brüchen mit dem gleichen Nenner (statt ganzen Zahlen) für alle chemischen Elemente abgeschwächt. Dahinter steht die Annahme, daß auch schon Wasserstoff aus  $m$  Elementaratomen zusammengesetzt ist, und die übrigen Elemente nach der Additionsregel ein  $n/m$ -faches Atomgewicht des Wasserstoffs haben sollten.<sup>66</sup> Um 1870 jedoch mußte - auch mit dieser Abschwächung - „jeder Zweifel darüber schwinden, dass *Prout's* Hypothese den Thatsachen zu weit vorangeeilt war“;<sup>67</sup> mit jeder genaueren Messung hatte der Wert von  $m$  willkürlich nach oben korrigiert werden müssen.

<sup>65</sup> Mendelejeff (1871, 41f)

<sup>66</sup> siehe Mendelejeffs Andeutungen zur Debatte zwischen Margnac und Stas in (1871, 99)

<sup>67</sup> Mendelejeff (1871, 99)

Bevor wir uns anschauen, wie Mendelejeff 1871 mit dem empirischen Scheitern der Proutischen Hypothese umging, sollte ich erwähnen, wie wir heute die nicht-ganzzahligen und nicht-einfachen Verhältnisse der Atomgewichte von chemischen Elementen erklären. Wir setzten heute zwar voraus, daß alle chemischen Elemente aus einer ganzzahligen Verbindung von drei verschiedenen Arten von Teilen, Elektronen, Protonen und Neutronen, bestehen, aber aus den heutigen Theorien ergeben sich zwei Gründe, warum die empirischen Messungen keine einfachen Zahlenverhältnisse der Atomgewichte zeigen. Zum einen erkennen wir in den meisten aus der Natur aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften isolierten Elementen eine Mischung aus zwei oder mehr verschiedenen Arten von Atomen mit jeweils verschiedenem Atomgewicht. Die chemischen Eigenschaften der Elemente bestimmen sich ausschließlich aus der Anzahl der Protonen, ihr Atomgewicht jedoch aus der Anzahl aller Teile. Die im 19. Jahrhundert entwickelten Verfahren zur Bestimmung der Atomgewichte haben also nur einen gewichteten Durchschnittswert über die in der Natur vorgefundene Mischung der chemisch gleichen, aber unterschiedlich schweren „Isotope“ ermittelt. Die Existenz von Isotopie in der Natur - die Tatsache, daß chemisch gleiche Elemente ein unterschiedliches Atomgewicht haben können - wurde in der Zeit zwischen 1910 und 1920 von Soddy, Aston, Rutherford u.A. entdeckt. Aber auch für isotonenreine Elemente, d.h. Elemente mit festgelegter Anzahl der Teile, folgt nach dem heutigen Verständnis nicht, daß sich ihr Atomgewicht durch einfache Addition der Gewichte ihrer Teile in Isolation ergibt. Bei der atomaren Zusammensetzung wird Energie frei, je nach der Art der Zusammensetzung unterschiedlich viel. Nach der 1905 von Einstein gefundenen Äquivalenzbeziehung haben wir die separaten Erhaltungssätze für Masse und Energie in einem Masse-Energie-Äquivalenz Erhaltungssatz vereinigt, so daß nach der Freisetzung der Vereinigungsenergie die Masse des Isotops kleiner als die ihrer isolierten Teile ist.

1871, also deutlich bevor zwischen 1905 und 1920 die theoretischen Grundlagen für unsere heutige Erklärung entwickelt wurden, präsentierte Mendelejeff folgende Strategie zur Erklärung des empirischen Scheiterns der Proutischen Hypothese:

Selbst wenn man annimmt, dass die Materie der Elemente vollkommen gleichartig sei, ist kein Grund vorzusetzen, dass  $n$  Gewichtstheile eines Elements oder  $n$  Atome bei der Umwandlung zu einem Atom eines zweiten Elements dieselben  $n$  Gewichtstheile liefern werden, oder dass das Atom des zweiten Elements  $n$  Mal schwerer sein wird als beim ersten. Das Gesetz von der Erhaltung des Gewichts kann man als speciellen Fall des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft oder der Bewegung betrachten. Das Gewicht wird vielleicht durch besondere Art Bewegung der Materie verursacht, und es ist kein Grund vorhanden, die Möglichkeit einer Umwandlung dieser Bewegungen bei Bildung von Elementaratomten in chemische Energie oder irgend eine andere Bewegungsform abzusprechen.

Zwei von den gegenwärtig an Elementen zu beobachtenden Erscheinungen — das beständige Atomgewicht und die Unzersetzbarkeit — stehen bis jetzt in innigem, sogar historischem Zusammenhang; wenn daher ein bekanntes Element sich zersetzen oder ein neues sich bilden würde, so können vielleicht diese Erscheinungen von einem Ab- oder Zunehmen des Gewichts begleitet sein. Auf diese Art liesse sich auch bis zu einem gewissen Grade der Unterschied in der chemischen Energie verschiedener Elemente erklären. Indem ich diesen Gedanken hier ausspreche, will ich damit *nur* gesagt haben, dass einige Möglichkeit vorhanden ist, die im Stillen von den Chemikern gehegte Meinung von der zusammengesetzten Natur der Elemente mit der Nichtannahme der *Proust'schen* Hypothese in Einklang zu bringen.<sup>68</sup>

Mendelejeff liefert in diesem Zitat eine mögliche Rettung des *Grundgedankens* hinter der Proutschen Hypothese vor der empirischen Widerlegung; er formuliert dabei natürlich sehr vorsichtig, weil die behandelten Möglichkeiten nicht einmal in der Nähe des durch die damaligen Theorien Vorgegebenen standen. Im Gegenteil: die damals vorherrschenden Theorien mußten, wie auch Mendelejeff betont, als Instanzen übergeordneter Erhaltungssätze gedeutet werden, die seinen Rettungsversuch verhindern. Alle Messungen bis dahin hatten ergeben, daß bei jeder chemischen Reaktion die Masse der Reaktionsstoffe vor und nach der Reaktion identisch ist, trotz der in manchen Fällen beträchtlich erscheinenden Abgabe von Wärme aus dem Bereich der Waage. Die Atomgewichte ließen sich durch keine Manipulation beeinflussen, sie standen im Rang von unveränderlichen Naturgrößen. Die chemischen Elemente mußten auf der Basis aller damaligen Experimentaldaten und Theorien als elementar im Sinne eines Erhaltungssatzes gedeutet werden. Trotzdem bietet uns Mendelejeff eine Erklärung für das empirische Scheitern der Proutschen Hypothese an, die nicht nur all das ignoriert, sondern in bemerkenswerter Weise die erst durch Einstein theoretisch ermöglichte und noch für einige Zeit danach ohne empirische Anwendung gebliebene Erklärungsstruktur vorwegnimmt.

Will man diese Vorwegnahme nicht als Zufall deuten, so ist man vielleicht versucht, sie aus der Sicht eines radikalen Konstruktivismus zu interpretieren: Die spätere Entwicklung wäre demnach gerade ein Resultat der durch Mendelejeff artikulierten intellektuellen Bedürfnisse der Forschergemeinde, die sich ihre Theorien genau so konstruiert, wie es diesen Bedürfnissen oder Moden entspricht. Dieser Standpunkt<sup>44</sup> ist jedoch recht unplausibel. Zum einen deuten die soziologischen Quelldokumente, die man für die Stützung eines solchen soziologischen Standpunkts heranziehen müßte, eher auf eine gegenteilige Wirkung der später gefundenen Realisierung der Mendelejeffschen Erklärungsstruktur. Auf der soziologischen Ebene müßte man die Wirkung der Einsteinsche Masse-Energie-Äquivalenz auf die Forscherkollegen,

<sup>68</sup> Mendelejeff (1871, 99f)

eher mit den Worten „überraschende und kontraintuitive Neuigkeit“ als mit „offensichtliche Erfüllung eines langegehegten Wunsches“ beschreiben. Aber auch auf einer inhaltlichen Ebene hat der Konstruktivismus das Problem, die andere heutige Erklärungsstruktur für das Scheitern der Proutischen Hypothese plausibel zu machen. Die Annahme, daß ein chemisches Element durch mehr als einen strukturell unterschiedenen Atomaufbau realisiert ist, dient sicher keinem erkennbaren Wunsch der Forschergemeinde. Diese Erkenntnis steht im Widerspruch mit einem wesentlichen Prinzip naturwissenschaftlicher Arbeit: hinter einer Wirkung nur eine Ursache zu vermuten und die Anzahl der Entitäten nicht ohne Notwendigkeit zu vermehren. Die Notwendigkeit zur Annahme von Isotopen wurde den Forschern recht unfreiwillig von der Natur aufgezwängt; die Vermutung, die Forscher hätten einen Wunsch gehabt, eine anti-ockhamsche Atomtheorie zu haben, ist wenig plausibel. Isotope, wie auch z.B. das Scheitern der Anwendung von Platonischen Körpern für die Erklärung des Sonnensystems oder die Entdeckung von Myon-Elementarteilchen, gehören zu den Überraschungen der Empirie, die niemand bestellt hat und zunächst in kein zuvor favorisiertes Erklärungsmuster hineinpassen.

Die Deutung, die sich ergibt, wenn man die Argumente, die uns Mendelejeff liefert, für die relevanten hält, ist deutlich erhellender: Es geht hier um eine autonome Dynamik im Netz der metatheoretischen Rechtfertigungen von Theorien: Der Grundgedanke hinter der Proutischen Hypothese ist der generalisierte Atomismus. Dem Atomismus wird wegen seiner hohen Vereinheitlichungsleistung und der in weiten Bereichen erfolgreichen Anwendung eine hohe Glaubwürdigkeit zugebilligt. Aber der generalisierte Atomismus und die Additionsregel für Massen führen zur Proutischen Hypothese, die sich als empirisch falsch herausgestellt hat. Also schaut man sich die Additionsregel für Massen an. Diese folgt unmittelbar aus dem Massenerhaltungssatz und wurde für alle bekannten chemischen Verbindungen anhand der damaligen Meßgenauigkeiten für streng gültig gehalten. Jedoch waren damals schon viele Fälle von Vereinheitlichungen von Erhaltungssätzen bekannt. So wurden vorher z.B. der Erhaltungssatz für Wärme unter einen allgemeinen Erhaltungssatz für „Bewegungskraft“<sup>69</sup> subsumiert, mit der Konsequenz, daß nach dieser Subsumtion der Erhaltungssatz für Wärme nur noch *ceteris paribus* gültig war, also vorausgesetzt die Maße der übrigen Bewegungsarten bleiben konstant. Wenn also der Massenerhaltungssatz unter einen generellen Erhaltungssatz subsumiert wird, impliziert dies, daß eine Veränderung eines anderen Aspekts dieser generalisierten Erhaltungsgröße eine Veränderung der Massengrößen bewirken würde, daß also der Massenerhaltungssatz nicht mehr streng gültig ist. Als Konsequenz ergibt sich, daß der generalisierte Atomismus wahr sein kann, obwohl die Proutische Hypothese falsch ist. Das folgt aus schlichten logischen Operationen in der Menge der vortheorietischen Subsumtionsregeln in der Wissensbasis, gesteuert von dem Bedürfnis möglichst umfassende Regeln für wahr halten zu können. Das erstaunli-

<sup>69</sup> cf. z.B. Mayer (1842) - heute nenne wir das „kinetische Energie“

che Ergebnis dieser Operationen ist, daß sich aus dem empirischen Scheitern der Proutischen Hypothese als offene Frage die Art der Subsumtion des Massenerhaltungssatzes unter einen verallgemeinerten Erhaltungssatz ergibt, d.h. zu erklären warum der Massenerhaltungssatz bei allen damals |<sup>45</sup> bekannten Naturprozessen erfüllt ist, aber bei der bis dahin unbeobachteten, aber aus Gründen der Kohärenz des allgemeinen Atomismus vorausgesetzten Umwandlung von chemischen Elementen ineinander verletzt wird. Die Existenz eines vereinheitlichenden Erhaltungssatzes, der die Konstanz der Größe einer Entität bei allen phänomenalen Veränderungen der Natur behauptet, ist also das zweite von den obengenannten Erklärungsidealen. Einstein hatte 1905 nicht an diesem Problem gearbeitet; wir können aber einen guten Grund für die *Akzeptanz* der von ihm gefundenen speziellen Relativitätstheorie darin finden, daß sie diese offene Frage beantwortet. (Die Antwort liegt in der Menge der Energie: für alle damals bekannten Naturprozesse, den chemischen Reaktionen, liegt das Massenäquivalent des Energieumsatzes unter der Nachweisgrenze der Meßgeräte.) Obwohl die spezielle Relativitätstheorie (und darin enthaltene Masse-Energie Äquivalenzformel) noch für einige Zeit nach 1905 keine empirische Bestätigungen vorzuweisen hatte,<sup>70</sup> war das Vertrauen der Wissenschaftskollegen in sie rational, weil sich die spezielle Relativitätstheorie ohne Widerspruch mit unzähligen Knoten des metatheoretischen Begründungsnetzes der Naturtheorien verbinden ließ und dabei vorher erkannte Lücken schloß.

Die Argumente der hier beschriebenen Dynamik der Erklärungsideale zum atomaren Aufbau der Stoffe hat zwar einige Ähnlichkeit mit einer von Ørsted explizit als „Gedankenexperiment“ benannten Argumentation<sup>71</sup> - man könnte aber trotzdem einwenden, daß die Argumentation von Mendelejeff ziemlich verschieden zu dem paradigmatischen Gedankenexperiment von Galilei ist: Mendelejeff liefert uns eine hypothetische Erklärung für ein empirisches Faktum, Galilei dagegen widerlegt in seinem Gedankenexperiment ein vorher geglaubtes Naturgesetz. Deshalb sollte ich hier zuletzt doch einige Anmerkungen zu einer Taxonomie der Gedankenexperimente machen, obwohl ich oben vor dem verbreiteten Mißbrauch gewarnt habe, die Notwendigkeit, *die* Gedankenexperimentalmethode zu erklären, durch ein Botanisieren der unterschiedlichen Aspekte vieler verschiedener Gedankenexperimente zu ersetzen. Ich halte die Möglichkeit, unterschiedliche Arten von Gedankenexperimenten zu individuieren, für ebensowenig erkenntnisförderlich, wie die offensichtlich gegebene Möglichkeit, unterschiedliche Arten von realen Experimenten zu individuieren, dem Verständnis der Experimentalmethode dient.

<sup>70</sup> Die Umwandlung von Elementen in kontrollierten Experimenten und der Nachweis der Verletzung der Massenerhaltung bei solchen Umwandlungen gelang erst etwa zehn Jahre später.

<sup>71</sup> Ørsted, „Briefwechsel über Atomistik und Dynamik,“ Brief an Weiss, 30. Januar 1829, in Ørsted (1920b, 289) - Im vorliegenden Aufsatz fehlen aus Platzgründen alle detaillierten Analysen von exemplarischen Gedankenexperimenten. Diese Analysen sind natürlich zum Nachweis der Tragfähigkeit meiner Interpretation unerlässlich, und ich werde sie in späteren Veröffentlichungen nachholen.

Reale Experimente sammeln Daten mit dem Zweck, sie unter bestehende oder noch zu findende Theorien zu subsumieren. Gedankenexperimente konstruieren hypothetische Erklärungszusammenhänge zwischen den Regeln der metatheoretischen Rechtfertigungen von Theorien und den Theorien; oder anders gesagt: zwischen verschiedenen Ørstedischen *Grundgedanken* untereinander und zwischen diesen und Theorien. Und wie reale Experimente nur dann einen Witz haben, wenn sie uns Tatsachen offenbaren, die (noch) nicht theoretisch zu erwarten waren, machen Gedankenexperimente nur dann einen Sinn, wenn sie normative Randbedingungen instanziierten, die (noch) nicht zum expliziten Gemeingut der Theoretiker gehören. Ein witzloses Gedankenexperiment ist, z.B. die (gelegentlich als Gedankenexperiment bezeichnete<sup>72</sup>) Behauptung Aristoteles', daß ein von der Erde zum Mond transportierter Stein losgelassen wieder auf die Erde zu- |<sub>46</sub> rückfallen würde - Aristoteles stellt das als eine problemlos erklärbare, mögliche Tatsache vor, weil nach seiner Bewegungslehre jeder Erdenkörper das natürliche Bestreben hat, sich zum Erdmittelpunkt zu bewegen (die Mond-Materie hat ihmgemäß dagegen das Bestreben, sich auf ihrer natürlichen Kreisbahn um die Erde zu bewegen). Dieses Gedankenexperiment instanziiert kein neues Ideal der Naturerklärung, das Zweifel an seiner Bewegungslehre aufkeimen ließe. In einem weiten Sinn kann man jede hypothetische Erklärung ein Gedankenexperiment nennen (und jedes empirische Faktum ein Resultat eines realen Experiments), in einem engeren, angemesseneren Sinn nur diejenigen Argumente im Netz der vorthoretischen Erklärungsideale, die dieses Netz verändern, indem sie Kontingenzen aufdecken oder durch die Installation neuer Erklärungsideale schließen.

Warum haben Gedankenexperimente in den meisten Fällen die konkrete Form eines hypothetischen realexperimentellen Arrangements? Weil viele Regeln nur ungenügend in einer propositionalen Form vorliegen, nämlich all diejenigen, die den intendierten Anwendungsbereich einer anderen Regel individuieren sollen. Durch das bildliche Beschreiben eines realexperimentellen Arrangements wird diese implizite Regel instanziiert in der Bedeutung von: „Auf dieses Arrangement *soll* die besagte Regel anwendbar sein“. Wie auch für alle anderen instanziierten Regeln gilt, kann, wenn das Gedankenexperiment eine Kontingenz im Regelnetz offenbart, diese implizite Regel durch das Gedankenexperiment aufgegeben werden, indem z.B. eine neue *explizite* Regel installiert wird, die das vorliegende experimentelle Arrangement aus dem Anwendungsbereich der besagten Regel herausnimmt.

Ich habe hier und im letzten Kapitel versucht darzustellen, warum wir es als eine *rationale* Entscheidung verstehen müssen, der Argumentation eines Gedankenexperiments zu folgen, obwohl die Freiheit der Wahl von Hilfhypothesen verhindert, diese Akzeptanz mit der bloßen Logik zu rechtfertigen. Es ist die gleiche Rationalität, die unter manchen Umständen das Ergebnis eines realen Experiments zu einer Widerlegung einer vorher geglaubten Theorie erklärt, obwohl auch hier durch entsprechende Hilfhypothesen im-

<sup>72</sup> cf. Schöpf (1989)



mer ein logischer Ausweg besteht. Der rationale Grund liegt - kurz zusammengefaßt - in der Erkenntnis, daß der Ausweg über Hilfhypothesen gelegentlich mehr Kontingenz im Netz der Erklärungszusammenhänge hinterläßt, als die Akzeptanz einer Anomalie, die Aufgabe einer vertrauten Theorie oder die Anerkennung eines neuen Erklärungsstandards.

Vielleicht stellt sich jetzt noch die Frage, woher denn die neuen Erklärungsstandards kommen, die den besonders einflußreichen Gedankenexperimenten aus dem scheinbaren Nichts heraus erfunden und dann in offenen Problemen des Regelnetzes instanziiert werden, nachdem hier nur beantwortet wurde, warum sie, wenn sie schon formuliert sind, akzeptiert werden. Diese Frage ist so unbeantwortbar wie die Frage, woher die neuen empirischen Daten bei den realen Experimenten kommen. Sie reicht über die Grenzen der rationalen Beschreibung der Vorgänge in einer Wissensbasis hinaus; der Hinweis, daß die Daten der realen Experimente „aus der Natur“ und die Erklärungsstandards der Gedankenexperimente „aus der Kreativität“ stammen, ist wenig informativ, muß aber genügen.

Naturwissenschaft ist mehr als die Anwendung des Werkzeugs Logik auf die Empirie. Sie ist auch mehr als die Anwendung des einen neuen Werkzeugs der experimentellen Methode, dessen Gebrauchsanweisung uns von Francis Bacon mitgeteilt wurde. Die Naturwissenschaft bedient sich eines gut gefüllten Werkzeugkastens an Ordnungsregeln und Erklärungsidealen. Durch die Gedankenexperimente wird dieser Werkzeugkasten gepflegt und für die Weiterentwicklung der soweit vorhandenen |<sup>47</sup> naturwissenschaftlichen Theorien optimiert; stumpfe Werkzeuge werden ausgesondert, andere geschärft, mit den vorhandenen Werkzeugen und -stücken werden neue hergestellt. Gerade deshalb, weil wir nicht nur die Werkstücke, sondern auch die Werkzeuge weiterentwickeln, ist das Unternehmen Naturwissenschaft ein rationales und erfolgreiches.

### Literatur

Um solche kuriosen Literaturangaben wie „Galilei, 1964“ zu vermeiden, werden die Texte mit dem Jahr ihrer Erstveröffentlichung gekennzeichnet. Zitate und Seitenangaben beziehen sich jedoch bei Werken, deren Erstausgaben von mir nicht herangezogen wurden, auf die Ausgabe, die nach einem Semikolon in dieser Literaturliste aufgeführt wird.

Aspect, A. *et al.*

(1982) „Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers“, *Phys. Rev. Letters*, Bd. 49, Nr. 25

Avogadro, A.

(1811) „Essai d'une maniere de determiner les masses relatives des molécules élémentaires des corps, [...]“, *Journal de physique par Delamétherie*, Bd. 73, 58-76; in Ostwald, W (Hg.), *Grundlagen der Atom- und Molekulartheorie*, Nachdruck Frankfurt/M 1996

Bartelborth, T.

(1996) *Begründungsstrategien - Ein Weg durch die analytische Erkenntnistheorie*, Berlin

Bartels, A.

(1994) *Bedeutung und Begriffsgeschichte: die Erzeugung wissenschaftlichen Verstehens*, Paderborn, München, Wien, Zürich

Bell, J. S.

(1964) „On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox“, *Physics*, Bd. 1, 195-200

(1966) „On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics“, *Reviews of Modern Physics*, Bd. 38, 447-75.

Bohr, N.

(1949) „Diskussion mit Einstein über erkenntnistheoretische Probleme in der Atomphysik“, in: P.A. Schlipp (Hg.), *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher*, (Bd. 7 der „Library of Living Philosophers“)

Brooks, D. H. M.

(1994) „The Method of Thought Experiments“, *Metaphilosophy*, Bd. 25, Nr. 1, 71-83

Brown, J. R.

(1991a) *The Laboratory of the Mind - Thought Experiments in the Natural Sciences*, London, New York

(1991b) „Thought Experiments: A Platonic Account“, in: Horowitz & Massey (1991), 119-128

(1992) „Why Empiricism Won't Work“, in: PSA (1992), 271-279

Bunzl, M.

(1996) „The Logic of Thought Experiments“, *Synthese*, Bd. 106, 227-240

Buschlinger, W.

(1993) *Denk-Kapriolen? : Gedankenexperimente in Naturwissenschaften, Ethik und Philosophy of Mind*, Würzburg

Cargile, J.

(1987) „Definitions and Counter-Examples“, *Philosophy*, Bd. 62, 179-193

Carnap, R.

(1936/37) „Testability and Meaning“, *Philosophy of Science*, Bd. 3 (1936), 419-471 u. Bd. 4 (1937), 1-40

Cartwright, N.

(1983) *How the Laws of Physics Lie*, New York; Nachdruck 1986

Cole, D.

(1984) „Thought and Thought Experiments“, *Philosophical Studies*, Bd. 45, 431-444

Dalton, J.

(1803) [„Ueber die Absorption der Gasarten durch Wasser und andere Flüssigkeiten“], Vortrag 21.10.1803 in der *Literary and Philosophical Society*, Manchester, Gedruckt in *Memoirs*, II Series, Bd. 1, 271-287, 1805; Nachdruck d. Übers. von L. W. Gilbert (1808) in W. Ostwald (Hg.), *Grundlagen der Atom- und Molekulartheorie*, Frankfurt/M 1996 |<sub>48</sub>

Dietrich, F.

(1987) „The Computer: A Tool for Thought-Experiments“, *Leonardo*, Bd. 20, Nr. 4, 315-25

Duhem, P.

(1906) *La théorie physique, son objet et sa structure*, Paris; Nachdruck d. Übers. v. F. Adler, „Ziel und Struktur der physikalischen Theorien“ (Leipzig, 1908), Hamburg: 1978

Einstein, A.

(1905) „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“, *Annalen d. Physik*, Bd. 17

Einstein, A., B. Podolsky & N. Rosen

(1935) „Can Quantum Mechanical Description of Reality be Considered Complete?“, *Physical Review*, Bd. 47, 777-80

Eötvös, R. V.

(1889) „Über die Anziehung der Erde auf verschiedene Substanzen“, *Math. Naturw. Ber. aus Ungarn* 8, 65-68

Friedman, M.

- (1974) „Explanation and Scientific Understanding“, *The Journal of Philosophy*, Bd. 71, Nr. 1, 5-19; dt. „Erklärung und wissenschaftliches Verstehen. Die Vereinheitlichung der Gesetze“ in Schurz (1988), 171-191

Galilei, Galileo

- (1638) *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla mecanica & i movimenti locali*, Leyden; Nachdruck d. Ausg. v. Arthur von Oettingen, *Unterredungen und Mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend*, Erster bis Sechster Tag (Leipzig, 1890-1904), Darmstadt, 1964

Giere, R.

- (1992) *Cognitive Models of Science* (Hg.), Minneapolis

Glymour, C.

- (1980) *Theory and Evidence*, Princeton

Gomila, A.

- (1991) „What is a Thought Experiment?“, *Metaphilosophy*, Bd. 22, Nr. 1/2, 84-92

Hager, N.

- (1979) „Zur Rolle des Gedankenexperiments in der physikalischen Erkenntnis“, *Deutsche Zeitschrift f. Philosophie*, Bd. 27, Nr. 2, 233-240

Hegel, G. W. F.

- (1801) *Dissertatio philosophica orbitis planetium*, Jena; in: H. Glöckner (Hg.) Bd. 1, 1-29, Stuttgart 1927

Heisenberg, W.

- (1927) „Die Anschaulichen Inhalte der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik“, *Zeitschrift für Physik*, Bd. 43, 172-98
- (1973) „Die Richtigkeitskriterien der abgeschlossenen Theorien in der Physik“, in: Scheibe & Süßmann (1973), 140-144

Hempel, C. G.

- (1965) *Aspects of Scientific Explanation And Other Essays in the Philosophy of Science*, New York, London

Horowitz, T. & G. J. Massey

- (1991) *Thought Experiments in Science and Philosophy*, (Hg.), Savage

Hoyningen-Huene, P.

- (1989) *Die Wissenschaftsphilosophie Thomas S. Kuhns. Rekonstruktion und Grundlagenprobleme*, Braunschweig

Humphreys, P.

- (1993) „Seven Theses on Thought Experiments“, in: J. Earman et. al. (Hg.) *Philosophical Problems of the Internal and External Worlds - Essays on the Philosophy of Adolf Grünbaum*, Pittsburgh (USA) u. Konstanz, 205-227

Hüttemann, A.

- (1996) *Idealisierungen und das Ziel der Physik - Eine Untersuchung zum Realismus, Empirismus und Konstruktivismus in der Wissenschaftstheorie*, Berlin

King, P.

- (1991) „Medieval Thought-Experiments: The Metamethodology of Mediaeval Science“, in: Horowitz & Massey (1991), 43-64

Koyré, A.

- (1960) „Galileo's Treatise De Motu Graviorum: the use and abuse of imaginary experiment“, in (1968) Kap. III, 44-88
- (1968) *Metaphysics and Measurement. Essays in Scientific Revolution*, Cambridge (USA)

Krimsky, S.

- (1970) *The Nature and Function of 'Gedankenexperimente' in Physics*, Ann Arbor
- (1973) „The Use and Misuse of Critical Gedankenexperimente“, *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie*, Bd. 4, Nr. 2, 323-334 | 49

Kuhn, T. S.

- (1962/70) „The Structure of Scientific Revolutions“, in: *International Encyclopaedia of Unified Science*, Bd. 1/2, 1962; Nachdruck der 2. erweiterten Auflage (1970), Chicago, 1987
- (1964) „A Function for Thought Experiments“, in: *L'aventure de la science, Mélanges Alexandre Koyré*, Bd. 2, Paris, 307-334; dt. „Eine Funktion für das Gedankenexperiment“, in: Kuhn (1977), 327-356
- (1970) „Bemerkungen zu meinen Kritikern“, in: Lakatos & Musgrave (1970), 223-269
- (1972) „Second Thoughts on Paradigms“, in: Suppe (Hg.), *The Structure of Scientific Theories*
- (1977) *Die Entstehung des Neuen*, [Sammelband] Hg. v. L. Krüger, dt. v. H. Vetter, Frankfurt/M; 41992

Lakatos, I. & A. Musgrave

- (1970) *Criticism and the Growth of Knowledge* (Hg.), London; Übersetzung von P. K. Feyerabend u. A. Szabó, *Kritik und Erkenntnisfortschritt*, Braunschweig, 1974

Lichtenberg, G. Ch.

- (1793-96) „Sudelbuch KII“, in: W. Promies (Hg.), *Georg Christoph Lichtenberg: Schriften und Briefe*, Bd. 2, 399-477, München, Wien, 1971

Lipton, P.

- (1991) *Inference to the Best Explanation*, London, New York

Mach, E.

- (1883) *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, Leipzig; Nachdruck v. 1933, Darmstadt, 1991
- (1897) „Über Gedankenexperimente“, *Zeitschrift für den Physikalischen und Chemischen Unterricht*, Bd. 10, Nr. 1, 1-5
- (1905) *Erkenntnis und Irrtum*, Leipzig; Nachdruck v. 1926, Darmstadt, 1991

Mayer, R.

- (1842) „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur“, *Annalen der Chemie und Pharmacie*; in: A. von Oettingen (Hg.), *Die Mechanik der Wärme: zwei Abhandlungen*, (Leipzig, 1911) Nachdruck Frankfurt 1997, 3-8

McAllister, J. W.

- (1996) „The Evidential Significance of Thought Experiment in Science“, *Stud. Hist. Phil. Sci.*, Bd. 27, Nr. 2, 233-250

Meinong, A.

- (1907) *Über die Stellung der Gegenstandstheorie im System der Wissenschaften*, Leipzig

Mendeleeff, D.

- (1869) „Die Beziehungen zwischen den Eigenschaften der Elemente und ihren Atomgewichten“, aus dem Russischen von Fehrmann, *Journal der russischen chemischen Gesellschaft*, Bd. 1; in: siehe Mendeleeff (1871), 20-40
- (1871) „Die periodische Gesetzmässigkeit der chemischen Elemente“, dt. v. F. Wreden, *Annalen der Chemie und Pharmacie*, VIII Supplementband, 133-229; in: K. Seubert (Hg.) *Ostwalds Klassiker der Exakten Wissenschaft*, Band 68, (Leipzig, 1895), Frankfurt/M, 1996, 41-118

Mittelstraß, J.

- (1980) *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie* (Hg.), Band 1: A-G, Mannheim

Myers, C. M.

- (1968) „Thought Experiments and Secret Stores of Information“, *International Philosophical Quarterly*, Bd. 8, 180-192
- (1986) „Analytical Thought Experiments“, *Metaphilosophy*, Bd. 17, Nr. 2/3, 109-118

Norton, J. D.

- (1991) „Thought Experiments in Einstein's Work“, in: Horowitz u. Massey (1991), 129-148
- (1993a) „Einstein and Nordström: Some Lesser-Known Thought Experiments in Gravitation“, in: J. Earman, M. Janssen & J. D. Norton (Hg.), *The Attraction of gravitation: new studies in the history of general relativity*, Boston, 3-29
- (1993b) „Seeing the Laws of Nature“ [Buchkritik zu Brown (1991)], *Metascience*, Bd. 3 (NS), 33-40
- (1996) „Are Thought Experiments Just What you Thought?“, *Canadian Journal of Philosophy*

Ørsted, H. Ch.

- (1809) *Videnskaben om Naturens Almindelige Love*, [Lehrbuch der Mechanik], Kopenhagen

*Ulrich Kühne: Gedankenexperiment und Erklärung*

- (1811) *Förste Indledning til den Almindelige Naturlære, et indbydelsesskrift til forelæsninger over denne videnskab*, Kopenhagen [erweiterte Einleitung zu (1809) - auch in (1920)]
- (1822) „Über Geist und Studium der allgemeinen Naturlehre“, *Gebdens Journal für Chemie und Physik*, Bd. 36, Nr. 4, 458-488 Berlin [veränderte Übersetzung von (1811), in weiter revidierter Fassung auch in (1850) und (1851)]
- (1844) *Naturlærens mekaniske Deel*, Kopenhagen [veränderte und erweiterte Neuauflage von (1809)];<sup>2</sup>1854
- (1850) *Der Geist in der Natur - Deutsche Originalausgabe des Verfassers*, 2 Bd. zusammengeb., München, 1850/51
- (1851) *Der Mechanische Theil der Naturlehre*, 'Neuauflage' Braunschweig, Einleitung von C. Meyn [veränderte, dt. Fassung von (1844)]
- (1920a) *Scientific Papers - Naturvidenskabelige Skrifter*, Hg. von K. Meyer, 3 Bd., Kopenhagen
- (1920b) *Correspondance de H. C. Oersted avec divers savants*, Hg. von M. Ch. Harding, 2 Bd., Kopenhagen
- Passmore, J.  
(1962) „Explanation in Everyday Life, in Science, and History“, *History and Theory*, Bd. 2, 105ff.
- Planck, M. | 50  
(1935) „Die Physik im Kampf um die Weltanschauung“, Vortrag im Harnack-Haus, Berlin-Dahlem, v. 06.03.1935; in: *Vorträge und Erinnerungen*, Stuttgart, <sup>3</sup>1949
- Popper, K. R.  
(1959) *The Logic of Scientific Discovery* [Erweiterte Übersetzung durch den Autor v. *Logik der Forschung*, Wien, 1934] London; <sup>9</sup>1977
- Poser, H.  
(1984) „Wovon handelt ein Gedankenexperiment?“, in: Poser, H. & H.-W. Schütt, (Hg.), *Ontologie und Wissenschaft*, Berlin, TUB-Dokumentation Kongresse und Tagungen, Bd. 19, 181-198
- Prudovsky, G.  
(1989) „The Confirmation of the Superposition Principle: On the Role of a Constructive Thought Experiment in Galileo's Discorsi“, *Stud. Hist. Phil. Sci.*, Bd. 20, Nr. 4, 453-468
- PSA  
(1992) *Proceedings of the 1992 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Hg. v. D. Hull, M. Forbes & K. Okruhlik, 2 Bd., East Lansing (USA), 1993
- Putnam, H.  
(1981) *Reason, Truth and History*, Cambridge (UK), New York
- Rehder, W.  
(1980a) „Versuche zu einer Theorie von Gedankenexperimenten“, *Grazer Phil. Stud.*, Bd. 11, 105-123  
(1980b) „Thought-Experiments and Modal Logics“, *Log. Anal.*, Bd. 23, 407-417
- Rescher, N.  
(1990) *Aesthetic Factors in Natural Science* (Hg.), Lanham, New York, London  
(1991) „Thought Experimentation in Presocratic Philosophy“, in: Horowitz & Massey (1991), 31-41
- Scheibe, E.  
(1971) „Ein vernachlässigter Aspekt physikalischer Erklärungen I“, *Naturwissenschaften*, Bd. 58, 1-6  
(1993) „Heisenbergs Begriff der abgeschlossenen Theorie“, in: B. Geyer et al., *Werner Heisenberg. Physiker und Philosoph*, Heidelberg
- Scheibe, E. & G. Süßmann  
(1973) *Einheit und Vielheit - Festschrift für Carl Friedrich v. Weizsäcker zum 60. Geburtstag* (Hg.), Göttingen
- Schöpf, H.-G.  
(1989) „Gedankenexperimente in der Physik“, *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität „Otto von Guericke“ Magdeburg*, Bd. 33, Nr. 2, 63-67
- Schrödinger, E.  
(1935) „Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik“, *Die Naturwissenschaften*, Bd. 23, 807-12, 823-8 u. 844-9
- Schurz, G.  
(1988) *Erklären und Verstehen in der Wissenschaft* (Hg.), München; Nachdruck 1990

Searle, J. R.

(1980) „Minds, Brains, and Programs“, *The Behavioural and Brain Sciences*

Segre, M.

(1980) „The Role of Experiment in Galileo's Physics“, *Archive for History of Exact Sciences*, Bd. 23, 227-252

Sirridge, M. J.

(1975) „Truth from Fiction?“, *Philosophy and Phenomenological Research*, Bd. 35, 453-471

Sorensen, R. A.

(1991a) „Rationality as an Absolute Concept“, *Philosophy*, Bd. 66, 473-486

(1991b) „Thought Experiments“, *American Scientist*, Bd. 79, 250-263

(1992a) *Thought Experiments*, New York

(1992b) „Thought Experiments and the Epistemology of Laws“, *Canadian Journal of Philosophy*, Bd. 22, Nr. 1, 15-44

Stöckler, M. & W. Kuhn

(1986) „Deduktionen und Interpretationen - Erklärungen der Planckschen Strahlungsformel in physikinterner, wissenschaftstheoretischer und didaktischer Perspektive“, in: W. Kuhn (Hg.), *Vorträge der Physikertagung 1986 Gießen*, Gießen, 13-51

Telser, L. G.

(1977) „An Extreme Application of Core Theory“, in: Henn, R. & O. Moeschlin (Hg.), *Mathematical economics and game theory*, Berlin, 173-80

Thomson, J. J.

(1971) „A Defence of Abortion“, *Philosophy and Public Affairs*, Bd. 1, Nr. 1, 47-66; in: Feinberg, J. (Hg.), *The Problem of Abortion*, Belmont (USA), 1984

Toulmin, St. | 51

(1961) *Foresight and Understanding. An Enquiry into the Aims of Science*, London; dt v. E. Bubser, *Voraussicht und Verstehen. Ein Versuch über die Ziele der Wissenschaft*, Frankfurt/M, 1968

(1972) *Human Understanding, Volume I, General Introduction and Part I: The Collective Use and Evolution of Concepts*, Princeton; dt v. H. Vetter: *Kritik der kollektiven Vernunft*, Frankfurt/M, 1983

van Fraassen, B. C.

(1980) *The Scientific Image*, Oxford

Weinberg, St.

(1993) *Dreams of a Final Theory*, New York; dt: *Der Traum von der Einheit des Universums*, München, 1993

Weizsäcker, C. F. von

(1974) *Die Einheit der Natur*, München; 1982

(1988) *Aufbau der Physik*, München

Whitaker, R. J.

(1983) „Aristotle is Not Dead: Student Understanding of Trajectory Motion“, *Am. J. Phys.*, Bd. 51, Nr. 4, 352-357

White, A. A.

(1990) „Steady States in a Turbulent Atmosphere“, *Meteorological Magazine*, Bd. 119, Nr. 1410, 1-9

Wilkes, K. V.

(1988) *Real People: Personal Identity without Thought Experiments*, Oxford

Wittgenstein, L.

(1930) *Philosophische Bemerkungen*, Erstveröffentlichung: Oxford, 1964; dt: Frankfurt/M, 1981

Witt-Hansen, J.

(1976) „H. C. Ørsted, Immanuel Kant, and the Thought Experiment“, *Danish Yearbook of Philosophy*, 48-65

Yablo, St.

(1993) „Is Conceivability A Guide to Possibility?“, *Philosophy and Phenomenological Research*, Bd. 53, 1-42

Yourgrau, W.

- (1964) „On the Logical Status of so-called Thought Experiments“, *Proceedings of the Xth International Congress on the History of Science*, Ithaca

Zahar, E.

- (1973) „Why did Einstein's Programme supersede Lorentz's?“, *Brit. J. Phil. Sci.*, Bd. 24, 95-123 u. 223-262