

Albert Einstein ist ein moderner Mythos und ein wissenschaftshistorisches Musterbeispiel dafür, wie wissenschaftliche Kulturleistungen bei der Entwicklung neuer Theorien in persönlichen Netzwerken und im Zusammenhang mit philosophischem Denken entstehen. In diesem Buch sind Beiträge von Physikern, Philosophen und Wissenschaftshistorikern versammelt, die überraschend vielseitige Facetten der physikalischen Kultur am Beispiel der Einsteinschen Wirkungsgeschichte zusammentragen: von den Paradigmenwechseln des Raumzeitverständnisses über die meist un-bemerkte Philosophie in der Physik bis hin zur Bildungs- und Popularisierungskultur, die mit Einsteins Wirken verbunden ist. Ein Buch, das auf spannende Art aus dem Mythos Einstein ein Verständnis moderner Wissenschaftskultur entwickelt.

ISBN-13: 978-3-8274-1781-7  
ISBN-10: 3-8274-1781-3

**ELSEVIER**

[www.elsevier.de](http://www.elsevier.de)  
[www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)



Balsiger/Kötter

**Die Kultur moderner Wissenschaft**



Philipp W. Balsiger/Rudolf Kötter

# Die Kultur moderner Wissenschaft

am Beispiel Albert Einstein

**Spektrum**  
AKADEMISCHER VERLAG

# 3 Gedankenexperiment und physikalisches Weltbild: Überlegungen zur Bildung von Naturwissenschaft und zur naturwissenschaftlichen Bildung im Anschluss an Albert Einstein

Helmut Pulte

## 3.1 Einleitung: Weltbild, Bildung und Popularisierung

Gedankenexperimente haben derzeit Konjunktur. Dies trifft auch, wengleich aus anderen Gründen, für das wissenschaftliche und wissenschaftstheoretische Werk Albert Einsteins zu. Einstein selbst war ein Meister des Gedankenexperiments; er setzte es häufig in der innerwissenschaftlichen Diskussion, aber auch zur didaktischen Vermittlung und Popularisierung seines physikalischen Denkens ein. Es war für ihn ein wichtiges Mittel zur Erreichung eines Anliegens, das sich wie ein roter Faden durch sein Werk zieht: naturwissenschaftliche Bildung einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen und die Möglichkeiten und Risiken naturwissenschaftlicher Erkenntnis im allgemeinen kulturellen Bewusstsein zu verankern (Renn 2004).

Dieser Zusammenhang soll im vorliegenden Beitrag zum Anlass genommen werden, das Gedankenexperiment und seine Vermittlungsfunktion(en) etwas näher zu beleuchten.

Zunächst werden in diesem Einleitungsteil einige allgemeine Überlegungen zu den Begriffen „Weltbild“, „Bildung“ und „Popularisierung“ vorgestellt. Der zweite und wichtigste Teil beschäftigt sich mit dem Gedankenexperiment als einem Instrument, das besonders geeignet erscheint, Grundelemente eines naturwissenschaftlichen Weltbil-

des zu vermitteln. In diesem Teil will ich mein Verständnis vom „Gedankenexperiment“ skizzieren, verschiedene Typen des Gedankenexperiments unterscheiden und auch auf deren Funktionen für die Vermittlung von Physik und physikalischem Weltbild eingehen. Im Mittelpunkt wird die Frage stehen, welche Rolle Gedankenexperimente spielen können, um wissenschaftliche Theorien zu bewähren oder zu widerlegen, denn es ist der theoretische Gebrauch von Gedankenexperimenten, der mir ihre Vermittlungsleistungen hauptsächlich zu bestimmen scheint. Diese Diskussion wird mit Absicht unabhängig von Einstein geführt, weil es hier um die allgemeine Bedeutung dieses Instruments geht. Im dritten und letzten Teil soll dann auf Einstein als Gedankenexperimentator eingegangen werden, wie auch auf die Frage, welche Rolle das Gedankenexperiment für die Popularisierung seines Werkes gespielt haben mag.

Gewöhnlich wird bei der Diskussion der Frage, welche Stellung die Naturwissenschaften in unserem Bildungs- und Kulturverständnis spielen, C. P. Snows Analyse der und Klage über die „zwei Kulturen“ rezitiert. Dies soll hier nicht geschehen, weil allzu sinnfällig ist, dass das Problem weiter besteht und sich in mancher Hinsicht noch verschärft hat (Kutschmann 1999). Stattdessen ein Wort zu Wilhelm von Humboldt, der die Bedeutung des eigentümlichen deutschen Wortes „Bildung“ nachhaltig prägte: Humboldt hat mit seiner Orientierung von Bildung an der Idee eines autonomen intellektuellen Subjekts, das wesentlich seine inneren geistigen Fähigkeiten zur Entfaltung bringen sollte, zweifellos einen beträchtlichen Anteil daran, dass bis heute im Deutschen Bildung (und auch Kultur) gewöhnlich gerade nicht mit naturwissenschaftlichem Denken zusammengebracht werden. Die physische Welt ist für ihn eher ein Probestein der menschlichen intellektuellen Leistungsfähigkeit denn ein Bildungsgegenstand eigenen Rechts. So bemerkt er in seiner „Theorie der Bildung des Menschen“ über die menschliche Geisteskraft: »Da [...] die bloße Kraft einen Gegenstand braucht, an dem sie sich üben, und die bloße Form, der reine Gedanke, einen Stoff, in dem sie, sich darin ausprägend, fort dauern könne, so bedarf auch der Mensch einer Welt außer sich« (Humboldt 1980, S.235).

Physiker von Helmholtz bis Heisenberg taten deshalb gut daran, dem einseitigen Bildungsideal in der öffentlichen Diskussion um Naturwissenschaft nicht nur eine detaillierte Erfolgsbilanz der naturwissenschaftlich-technischen Errungenschaften entgegensetzen, sondern

auch die weltbildprägende Kraft der Physik herauszustellen; Carl Friedrich von Weizsäcker ist 1943 wohl der erste, der unter einem Buchtitel ein „Weltbild der Physik“ verspricht (Weizsäcker 1944).

Ein „Weltbild“ nun ist spätestens seit dem „Orbis pictus“ des Comenius (Comenius 1658) tatsächlich ein Bildungsgut; Es zeigt nicht einfach die Mannigfaltigkeit des Vorhandenen, sondern bietet eine gewisse geordnete Einheit, und es tut dies in einer gewissen Anschaulichkeit. In Bezug auf diese beiden Charakteristika – Einheit und Anschaulichkeit – besteht eine Kontinuität von den illustrierten Weltkarten des „Orbis pictus“ eines Comenius bis hin zum „physikalischen Weltbild“ des 20. Jahrhunderts. Und auch von Weizsäcker sieht die Arbeit am physikalischen Weltbild noch durch zwei Grundmomente bestimmt einem »Streben[s] nach Anschaulichkeit« und einem »Streben nach Einheit des Weltbildes« (Comenius 1658, S. 26 f.), (Weizsäcker 1944, S. 49–51).

Kein Zweifel darüber, dass sich das Verständnis beider Charakteristika grundlegend gewandelt hat. Der Anspruch aber, der mit der Metapher „Weltbild“ zum Ausdruck gebracht wird, bleibt doch erhalten – nämlich der, eine Ganzheit von Dingen und Ereignissen in einer bestimmten Bildlichkeit darzustellen. Wie unterschiedlich auch immer diese beiden Bestimmungen im Laufe der jüngeren Entwicklung der Physik ausgefüllt wurden und weiter ausgefüllt werden – fest zu stehen scheint mir dreierlei:

- 1) Ein physikalisches Weltbild ist keine Weltanschauung. Es ist zunächst der Versuch, die Gesamtheit der physikalischen Erfahrung und deren konstruktive Bearbeitung schematisch so darzustellen, dass ein einheitlicher methodischer Zugriff sowie eine einheitliche inhaltliche Bestimmung dieser Erfahrung erkennbar werden. Es geht dagegen nicht um eine Welterklärung mit Anspruch auf „Totalität und Systemcharakter“ (Thomé 2004, S. 461), womöglich noch gepaart mit einer transzendenten Sinngebung und Wertbestimmung.
- 2) Ein physikalisches Weltbild ist andererseits nicht die Physik selbst. Hier ist Jürgen Mittelstraß zuzustimmen, wenn er sagt, »dass Wissenschaft Weltbilder nur unvollständig bestimmt« (Mittelstraß 1989, S. 245). So wie nun ein gutes Bild, das im Auge des Betrachters entsteht, nicht beliebiger konsistenter Ausdeutungen fähig ist, liefert auch die Physik kein formloses Material, das als Spielball be-

liebigere Interpretationen taugen könnte. Ob die möglichen Interpretationen, d. h. die naturphilosophischen und wissenschaftstheoretischen Ausfüllungen des bereitgestellten Rahmens, aus der Physik selber gespeist werden, oder ob dabei die Philosophie (und unter Umständen auch andere Wissenschaften) einen namhaften Beitrag leisten, scheint mir demgegenüber zweitrangig. Eine „Deutungshoheit“ für den einen oder anderen Bereich kann es nicht geben.

- 3) Ein physikalisches Weltbild zu vermitteln heißt folglich auch mehr, als Physik zu vermitteln. Mit der zunehmenden Diversifizierung von Wissen und einem Wissenschaftswachstum, das allen „post-modernen Unkenrufen“ zum Trotz täglich stattfindet, wird es nicht nur wichtiger, sondern geradezu unverzichtbar, naturwissenschaftliches Wissen mit einem Reflexionswissen über dieses Wissen, über seine spezifische Rationalität, seine Genese und seine verantwortbare Anwendung zu verbinden.

Es ist daher auch dafür zu plädieren, mit der Vermittlung von Physik die weltbildschaffende Funktion von Physik herauszuarbeiten und zu transportieren, wobei eine genetische Betrachtung nach wie vor von hohem Wert sein dürfte. Naturwissenschaftliches Wissen allgemein ist nicht dann schon kulturell bedeutsam (wird nicht dadurch Bildung, wenn man so will), wenn es gleichsam als Neutrum vor den Lernenden und Anwendenden hingestellt wird, sondern dann, wenn begreiflich wird, wie dieses Wissen die Erfahrungs- und Lebenswirklichkeit verändert, wie es unser menschliches Selbstverständnis, unsere Identität in einer selber wissenschaftlich-technischen Welt mitbestimmt und wie es Orientierung in ihr ermöglicht. Naturwissenschaftliches Wissen so zu vermitteln, ist eine anspruchsvolle Aufgabe zuerst des naturwissenschaftlichen Unterrichts, nicht zuletzt aber auch der Popularisierung durch den Wissenschaftsjournalismus. Und ich meine, dass das Einstein-Jahr dazu durchaus auch ermutigende Signale geliefert hat. Es wäre ganz verhängnisvoll, wenn die Wissenschaftsvermittlung in Zukunft noch mehr auf den letzten „Knalleffekt“ setzte, denn der reiht Wissenschaft in unserer heutigen Medien- und Ereigniswelt ein in das spektakuläre Einerlei und ist vergessen, kaum dass er gezündet wurde. Mit einer nachhaltigen Bildung (auch) durch Naturwissenschaft hat dies nichts zu tun.

In diesem Zusammenhang: Es ist als ein Skandal der heutigen Schulausbildung anzusehen, dass jedem Abiturienten – und natürlich

mit Recht – ein allgemeinhistorisches Grundwissen etwa über die Französische Revolution abverlangt wird, aber der Ausdruck „Wissenschaftliche Revolution“ nicht einmal zu seinem Wortschatz gehören muss. Naturwissenschaft und Technik bestimmen sein Leben wesentlich mit, aber er bekommt in der gegenwärtigen schulischen Ausbildung kaum die Möglichkeit, diese Bestimmtheit in ihrer historischen Ausformung und philosophischen Tragweite zu begreifen. Diese Kritik ließe sich ausweiten um die an einer zunehmenden „Pädagogisierung“ der Lehrerbildung, die die Fachausbildung in den Einzelwissenschaften zurückdrängt, einem vertieften historischen und systematischen Verständnis des Fachwissens nicht dient und mit zunehmender Intensität eher zur Verschärfung denn zur Behebung der Krise führt, in der sich unsere schulische Ausbildung nach der bildungspolitischen Diskussion derzeit befindet. Und es könnte in diesem Zusammenhang auch die Kurzsichtigkeit des zunehmenden Verwertungsdenkens in der gegenwärtigen Wissenschaftspolitik thematisiert werden, das den wesentlichen Umstand übersieht, dass Grundlagenwissen – und zwar in den Natur- und in den Geisteswissenschaften – das potentiell anwendungsrelevanteste Wissen überhaupt ist und (auch) aus diesem Grunde einer nachhaltigen Förderung bedürfte, die ihr heute immer mehr versagt wird. Doch diese morastigen Felder sollen hier nicht betreten werden. Stattdessen schließen wir diese Eingangsüberlegungen mit Einstein ab. Durchaus scharf, aber auch mit dem ihm eigenen Humor, bemerkt er zur Eröffnung der Berliner Funkausstellung 1930: »Sollen sich auch alle schämen, die gedankenlos sich der Wunder der Wissenschaft und Technik bedienen und nicht mehr davon erfasst haben, als die Kuh von der Botanik der Pflanzen, die sie mit Wohlbehagen frisst« (Einstein 1930), (Renn 2004, S. 37).

### 3.2 Das Gedankenexperiment als Möglichkeit der „Weltbildvermittlung“

In der neueren Literatur wird der Ausdruck „Gedankenexperiment“ inflationär gebraucht – fast jede Form hypothetischen Rasonierens wird mit ihm belegt (Pulte 2001). Der Bezug zum Realexperiment, der zu Beginn der Begriffsgeschichte von „Gedankenexperiment“ noch eine wichtige Rolle spielte, ist weitgehend aus dem Blick geraten. Da-

bei lässt sich zeigen, dass gerade die erfolgreichen Beispiele für Gedankenexperimente in der Wissenschaftsgeschichte starke Strukturähnlichkeiten mit Realexperimenten aufweisen. Es wird zunächst darum gehen, den Zusammenhang beider herauszustellen, um zu einer bestimmten Bedeutung von „Gedankenexperiment“ zu gelangen. In der anschließenden Differenzierung verschiedener Typen und Funktionen von Gedankenexperimenten werden auch solche begegnen, die sich nicht nur durch ihre konstitutive Funktion und Anschaulichkeit auszeichnen, sondern eine Reflexion auf naturwissenschaftliche Begriffs- und Theoriebildung geradezu herausfordern. Solche „weltbildformenden“ Gedankenexperimente erscheinen mir besonders geeignet, naturwissenschaftliche Bildung zu befördern.

### 3.2.1 Gedankenexperiment und Realexperiment

In welchem Sinn lässt sich ein rein gedankliches Konstrukt überhaupt als „Experiment“ ansprechen, als etwas also, was doch seit der Renaissance als eine durch menschliches Handeln gezielt herbeigeführte Erfahrung, insbesondere auch als öffentlich beglaubigte und reproduzierbare Erfahrung über Naturerscheinungen verstanden wird?

Für einen strikten Empiristen muss es sich bei einem Gedankenexperiment um ein „hölzernes Eisen“ handeln, weil eigentliche, neue Erfahrung mit ihm nicht zu haben ist. Aber auch einen Rationalisten kann dieses vermeintliche „Vernunftwerkzeug“ nicht übermäßig erfreuen, weil die logisch-begriffliche Überschreitung enger Erfahrungshorizonte im Gedankenexperiment regelmäßig zu Fehlschlägen führt, die er selber meist nicht ohne neue Erfahrungsdaten erklären kann. So lässt sich etwa der folgende „Beweis“ gegen die Endlichkeit des Weltalls von der Aufklärung über zwei Jahrtausende bis hin zu Archytas von Tarent zurückverfolgen, ohne dass ihm heute noch argumentative Kraft zuerkannt würde:\*

\* Für Belege und weitere Literatur (Grant 1981, S. 106 f. und 322, Anm. 10), (Poser 1984, S. 184); für eine Trivialisierung des Beispiels (Genz 1999, S. 144–152); kritisch zur dortigen Behandlung von Gedankenexperimenten (Pulte 2001). Ist Archytas von Tarent im 4. Jh. v. Chr. nach der Überlieferung der wohlmöglichste erste Vertreter des Arguments, könnte es sich bei John Locke möglicherweise um dessen letzten Vertreter handeln, wobei es bei ihm auch eine „anticartesianische“ Stoßrichtung erhält. Lukrez gibt ihm in „De rerum natura“ (I 968–978) (Lukrez 1989, S. 71) folgende Gestalt: »Nähme man, übrigens, für den gesamten Weltraum bestimmte / Grenzen an,

Wäre das Weltall endlich, könnten wir prinzipiell an dessen Rand treten und ausgreifen. Könnten wir ausgreifen, gäbe es keine Begrenzung, könnten wir nicht ausgreifen, gäbe es ein ausgedehntes Hindernis. Der Weltraum wäre folglich auch hier nicht am Ende, und so weiter. Lukrez lässt zur Illustration in „De rerum natura“ einen „Gedankenspeer“ fliegen, der entweder weiter fliegt oder aber an der Grenze des Weltalls zurückprallt. Der Beweis erscheint in seiner Zeit geradezu zwingend, weil eine dritte Möglichkeit ausgeschlossen wird. Aber Gegenargumente „Humeschen Typs“ liegen für uns heute auf der Hand: Die Bewegung des Speeres könnte zum Beispiel abnehmen, je näher er einer tatsächlich vorhandenen Grenze des Weltalls kommt; der Speer könnte dort zur Ruhe kommen. Die implizite Annahme, dass dies nicht der Fall ist, lässt sich ohne neue Erfahrung über die Bewegung von Körpern an der „Grenze“ des Weltalls ebenso wenig aufrechterhalten wie die Argumentation insgesamt. Vom modernen Standpunkt zeigt sich die Fragwürdigkeit des Beweises vor allem in der Gleichsetzung von „unbegrenzt“ und „unendlich“: Denken wir uns nämlich einen dreidimensionalen Raum mit einer Struktur analog der der Kugeloberfläche, so ist dieser Raum zwar unbegrenzt, aber durchaus endlich. Der „sausende Wurfspieß“ könnte in einem solchen Raum los fliegen, ohne Erreichung einer Grenze zum Ausgangspunkt zurückkehren und den Werfer zur Strecke bringen und so lediglich dessen Endlichkeit in der Zeit demonstrieren.

liefe dann jemand vorwärts zum äußersten Endpunkt, / schleuderte einen sausen den Wurfspieß von dort in die Ferne – / welche Behauptung zögest du vor: Mit kraftvollem Schwunge glitte / die Waffe stets weiter dahin bis zum Zielpunkte, oder irgendein Hemmnis könne dem Fluge Einhalt gebieten? / Eine von beiden Möglichkeiten kannst du nur wählen.

Beide verwehren ein Ausweichen dir und erzwingen nur einen / Schluss: Es erstreckt sich das Weltall ohne Grenzen ins Weite! / Gäbe es nämlich ein Hindernis für den sausen den Wurfspieß, / das ihm den Volltreffer und ein Ruhen am Ziele verwehrte, / oder er sauste noch weiter: Nie kam er vom Endpunkte des Weltalls.«

Koyré weist darauf hin, dass Lukrez tatsächlich die „Unendlichkeit des Raumes und der Welten“ behauptete, »[...] aber er hält an der Endlichkeit unserer sichtbaren Welt und der Existenz einer begrenzten Himmelssphäre fest, außerhalb derer, jedoch unerreichbar für unser Wahrnehmungsvermögen, andere identische oder analoge ‚Welten‘ existieren. Man könnte seine Auffassung anachronistisch als Vorwegnahme der modernen Vorstellung von Insel-Welten, die in einem unendlichen Raum verstreut sind, ansehen, wenn auch ein sehr wichtiger Unterschied besteht: die Welten des Lukrez sind geschlossen und nicht miteinander verbunden.« (Koyré 1980, S. 42, Anm.)

Was also ist von einem solchen „Schaukelstuhl-Experiment“ (Sorensen 1992, S. 76) zu halten? In verschiedenen neueren Arbeiten werden die große heuristische Bedeutung und die historische Wirksamkeit von Gedankenexperimenten herausgestellt (Brown 1991), (Buschlinger 1993), (Cohnitz 2006), (Genz 1999), (Kühne 2005) und (Sorensen 1992). Beides ist auch gar nicht ernsthaft bestreitbar, beantwortet aber noch nicht die eingangs gestellte Frage. Dabei kann kein Zweifel bestehen, dass Lukrez' Argumentation durchaus eine theoretisch-explikative Funktion hat: dass etwa eine dritte Möglichkeit der Bewegung ausgeschlossen ist, expliziert nicht nur das Zusammenfallen von „Unbegrenztheit“ und „Unendlichkeit“, sondern auch eine „Homogenität“ des Raum- und Bewegungsbegriffs, die in der damaligen Zeit eine unproblematische theoretische Hintergrundannahme darstellte. Ganz allgemein kann gesagt werden, dass Gedankenexperimente gerade aufgrund des Mangels an neuen empirischen Daten etwas über die Kohärenz der theoretischen Annahmen aussagen können, die dem fraglichen Erfahrungsbereich zu Grunde gelegt werden. Diesen Unterschied zum Realexperiment, aber auch die starke strukturelle Gemeinsamkeit beider, mag nun folgende Gegenüberstellung aufzeigen.

In erster Annäherung lässt sich dieses Schema so deuten: Gedankenexperimente zielen darauf ab, durch logisch-begriffliche Explikation des theoretischen Hintergrunds mögliche Entwicklungen und Möglichkeitsbeschränkungen für einen gewissen Erfahrungsbereich aufzuzeigen und ggf. eine Entscheidung unter (zunächst) möglichen Entwicklungsalternativen herbeizuführen. Experimente bedienen sich zum gleichen Ende auch neuer, über den fraglichen Erfahrungshintergrund hinausgehender empirischer Daten. Gedankenexperimente sind hiernach als Experimente nur im Sinne einer ausgeprägten Strukturverwandtschaft und (natürlich) nicht im Sinne eines Art-Gattungs-Verhältnisses anzusprechen. Viele hypothetische Denkfiguren, die in der neueren Literatur als Gedankenexperimente angesprochen werden, fallen nicht unter diese Beschreibung.\* Umgekehrt kann über die

\* Was nichts über die Relevanz dieser Denkfiguren für die entsprechenden Kontexte noch über die Relevanz der Beschäftigung mit ihnen etwas aussagt. So kann etwa die Analyse der hypothetischen Denkfiguren im französischen „roman expérimental“ (im Anschluss an E. Zola) wichtige literaturtheoretische und -historische Aufschlüsse liefern (Wanning 1999), trägt aber nichts zu der hier verfolgten Fragestellung bei.

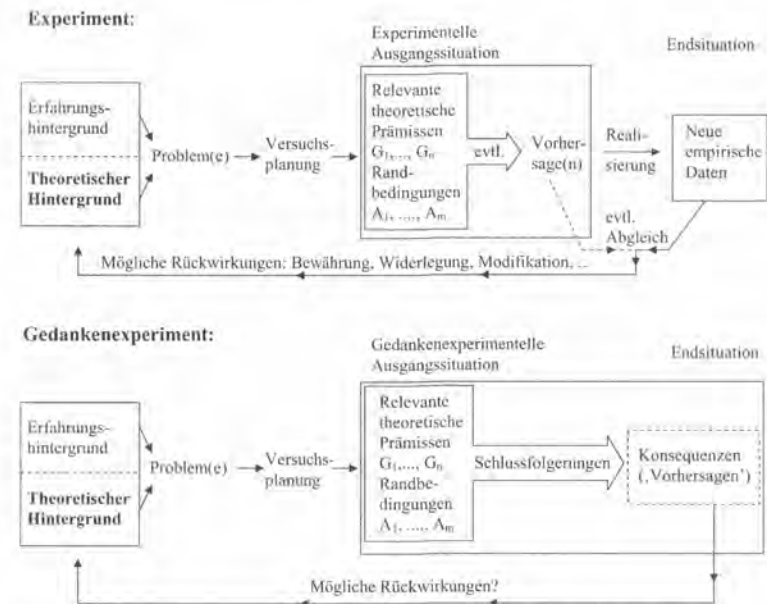


Abb. 3.1: Schematischer Vergleich von Gedanken- und Realexperiment

theoretische Funktion von Gedankenexperimenten im hier (allein) weiter verfolgten engeren und wissenschaftstheoretisch bestimmteren Sinne mehr ausgesagt werden. Hierzu ist eine Unterscheidung verschiedener Typen solcher Gedankenexperimente im engeren Sinne zweckmäßig.

### 3.2.2 Duhems Kritik und vier Typen von Gedankenexperimenten

Ernst Mach, dessen Bedeutung für den frühen Einstein bekannt ist, misst dem Gedankenexperiment großen heuristischen und theoretischen Wert bei: Es ist nicht nur unabdingbar für jede Planung eines Realexperiments, sondern auch geeignet, die logische Kohärenz physikalischer Theorien zu steigern (Mach 1980, S. 186).

Pierre Duhem dagegen, obwohl an Mach anschließend, steht dem Gedankenexperiment äußerst kritisch gegenüber. In „La théorie phy-

sique, son objet et sa structure“ gibt er zwar keine schlüssige Untersuchung des Verhältnisses von Gedankenexperiment und Theorie, wohl aber Anhaltspunkte für eine Differenzierung verschiedener Arten von Gedankenexperimenten. Er versteht dabei Gedankenexperimente generell gleichsam als „geistige Krücken“ eines fehlgeleiteten Induktivismus, der für alle theoretischen Prinzipien experimentelle Begründung fordert (Duhem 1978, S. 267 f.). Da eine lückenlose Begründung der Theorie durch das eigentliche Experiment nicht zu haben ist, bedient sich der Induktivist nach Duhem des Gedankenexperiments als schlechtem Ersatz. Ein solches Verfahren sei aber nicht statthaft, weil die fraglichen Prinzipien durch Ergebnisse des Gedankenexperiments gestützt würden, die ihrerseits auf den Prinzipien als Schlussvoraussetzungen beruhen: »Ein derartiges Beweisverfahren führt zu einem Circulus vitiosus, und derjenige, der es vorbringt, ohne hervorzuheben, dass das angegebene Experiment nicht ausgeführt wurde, begeht eine Unredlichkeit« (Duhem 1978, S. 269). Dieses Zirkelargument ist logisch völlig berechtigt, geht aber gleichwohl daran vorbei, was Gedankenexperimente für Theorien tatsächlich leisten können. Um dies zu zeigen, unterscheide ich in loser Bezugnahme auf Duhem selber folgende vier Typen:

Zunächst sind da die durchführbaren Gedankenexperimente. Jedes Experiment als geplanter Eingriff in das Naturgeschehen bedarf eines gedanklichen Entwurfs, der die Realisierungsbedingungen des konkreten Falles einschließt. Die Bedeutung und Notwendigkeit solcher Vorentwürfe ist unbestritten. Streitwert dürfte erst die weitere Unterscheidung zweier Formen haben; man sollte hier nämlich einen Duhemschen und einen Galileischen Typ auseinander halten:

- 1) Gedankenexperimente des ersten Typs sind realisierbar und realisiert. Man kann sie nach Duhem benennen, weil für ihn alle Gedankenexperimente im theoretischen Gebrauch nichts anderes sind als „verstümmelte“ Experimente: Ihnen fehlen neue empirische Daten, um Neues über die Theorie aussagen zu können. Dieser Typ ist hier insofern theoretisch irrelevant, als er als Gedankenexperiment irrelevant ist, d. h. durch das entsprechende Realexperiment ersetzt werden kann. Er wird daher nicht weiter untersucht.
- 2) Gedankenexperimente des zweiten Typs sind realisierbar, aber nicht realisiert; letzteres meist deshalb, weil sie als nicht realisierungsbedürftig gelten. Auch auf die Gefahr hin, dass Galilei mit

seiner vielfältigen Verwendung von Gedankenexperimenten zu Missverständnissen Anlass geben könnte, sollen sie nach ihm benannt werden. In seinem „Dialogo“ heißt es nämlich: »Ich bin ohne Versuch gewiß, daß das Ergebnis so ausfällt, wie ich Euch sage, denn es muß so ausfallen. Ja noch mehr, ich behaupte, Ihr selbst wißt ebenfalls, daß der Ausfall kein anderer sein kann, wenn Ihr Euch stellt oder vorgebt Euch zu stellen, als wüßtet Ihr es nicht.« (Galilei 1982, S. 152)\*

Neben dem „Duhemschen“ Typ führt Duhem selbst noch zwei Formen nicht realisierbarer Gedankenexperimente auf. Deren Verwendung in den Wissenschaften erscheint ihm inakzeptabel, wobei er zwischen „absolut unrealisierbaren“ und „absurden“ Gedankenexperimenten unterscheidet.\*\* Logisch anders unterscheidend und, historischen Beispielen folgend, möchte ich zwischen einem „Maxwellschen“ und einem „Poincaréschen“ Typ unterscheiden. Mit „nicht realisierbar“ kann nämlich zweierlei gemeint sein:

\* Bereits hier sei darauf hingewiesen, dass sich der fragliche „Effekt“ des Galileischen Gedankenexperiments gegen die Aristotelische Theorie richtet; eine besondere Pointe liegt darin, dass es Galilei tatsächlich durchgeführt hat, aber seinen Gegnern aus argumentativen Gründen als Gedankenexperiment präsentiert.

\*\* »[...] es kommt Schlimmeres vor. Recht häufig ist das fingierte Experiment, auf das man sich beruft, nicht nur unrealisiert, sondern auch unrealisierbar« (Duhem 1978, S. 270). Er spricht von einem »absolut unrealisierbare[n] Experiment«, wenn es einen Körper voraussetzt, »den man in der Natur nicht antrifft, physikalische Eigenschaften, die niemals beobachtet wurden«. Dies kann man das Kriterium der „irrealen Randbedingungen“ nennen. Die »absurden [Gedanken]experimente« haben dagegen eine »noch unlogischere[n] Form«, weil es ihnen darum geht, »einen Lehrsatz [zu] beweisen, der, wenn er als Ausdruck einer experimentellen Tatsache angesehen wird, einen Widerspruch aufweist« (Hervorhebungen im Text). Duhem spricht hier von der absurden Schlussfolgerung des Gedankenexperiments. Bei dem nach Poincaré bezeichneten Typ – beispielhaft repräsentiert durch dessen Modell einer „nicht-Euklidischen Welt“ (Poincaré 1914, S. 66–70) – geht es dagegen nicht um kontradiktorische Folgerungen, sondern Prämissen: Hier werden gezielt Gesetze oder gesetzesartige Allaussagen angenommen, die den akzeptierten Standards widersprechen, um deren Implikationen herauszuarbeiten. Dies ist die logische Differenz zur Duhemschen Typisierung.

Dass Duhem dem Gedankenexperiment keinen theoretischen Wert zuerkennt, ist darauf zurückzuführen, dass die Übereinstimmung mit der Erfahrung sein einziges Wahrheitskriterium für eine Theorie darstellt. Eine solche Übereinstimmung vermag aber nicht das Gedankenexperiment, sondern nur das Realexperiment zu leisten. Stärker kohärenztheoretische Instanzen, wie die Übereinstimmung einer Theorie mit anderen Theorien, werden dadurch ausgeschlossen.

- 3) Das Gedankenexperiment kann zum einen von einer Situation ausgehen, deren Randbedingungen nicht realisierbar sind; wohl aber wird bei der Schlussfolgerung von den akzeptierten theoretischen Aussagen Gebrauch gemacht. Die Kreativität und Phantasie des „Gedankenexperimentators“ ist hier besonders gefordert, um eine experimentelle Ausgangssituation herzustellen, die neuartige Schlussfolgerungen erlaubt.
- 4) Das Gedankenexperiment kann aber zum anderen auch die theoretischen Voraussetzungen verändern, also Naturgesetze oder gesetzesartige Aussagen einführen, die dem akzeptierten Wissensstand widersprechen. Hier werden gezielt Inkonsistenzen in das theoretische System eingeführt, um anhand der Schlussfolgerungen Informationen über dessen logische Struktur zu erhalten.\*

Unterschiedliche Merkmale von Gedankenexperimenten	Typisierung	Funktionen
realisierbar (möglich)	und realisiert	„Duhemscher“ Typ
	und nicht realisiert	„Galileischer“ Typ
nicht realisierbar (unmöglich)	aufgrund von Antezedenzbedingungen	„Maxwellscher“ Typ
	aufgrund theoretischer Prämissen	„Poincaréscher“ Typ
		Planung, Antizipation, Bewährung/Widerlegung
		?
		?
		Explikation und „Schichtung“ theoretischer Annahmen
		In jedem Fall: heuristische und didaktische (insb. veranschaulichende) Funktion

Abb. 3.2: Vier Typen von Gedankenexperimenten

Zusammenfassend ist – ganz entgegen Duhems Auffassung – allen vier aufgeführten Typen von Gedankenexperimenten großer heuristischer und auch didaktischer Wert zu bescheinigen. Man könnte es geradezu als „Duhemsches Paradoxon“ bezeichnen, dass er trotz seiner ausgedehnten Beschäftigung mit der Wissenschaftsgeschichte und Fragen der Wissenschaftsvermittlung diesen Schluss nicht gezogen

\* Anhaltspunkte hierfür gibt (Buschlinger 1993, S. 57 f.), mit Bezug auf (Rescher 1964). Solche Gedankenexperimente können sich nur dann des Vorwurfs erwehren, bloße *science fiction* zu sein, wenn die theoretische Variation so erfolgt, dass eine starke Ähnlichkeitsbeziehung zwischen Ausgangsprämissen und Variationen besteht. Dabei ist allerdings zu konzedieren, dass eine solche starke Ähnlichkeitsforderung im Allgemeinen nur ein schwaches Abgrenzungskriterium liefert.

hat.\* Die oftmals „metaphorische“ Rede der Gedankenexperimente muss hier gar kein Nachteil sein; eher ist sie ein Zeichen der Fruchtbarkeit dieser gedanklichen Entwürfe auf dem Weg hin zu Theorien über die fraglichen Erfahrungsbereiche. Wenn nach Einstein, der wie Galilei ein Meister des Gedankenexperiments ist, »all unser Denken [...] von [der] Art eines freien Spiels mit Begriffen« (Einstein 1955, S. 3) ist, so kann man das Gedankenexperiment als eine besondere und gelegentlich sogar unverzichtbare Form dieses Spiels mit Begriffen auffassen, das Erfahrung und Spekulation zusammenhält.

### 3.2.3 Poppers „theoriekritische“ und die „theoriebewährende“ Funktion von Gedankenexperimenten

Können nun aber Gedankenexperimente auch gute Gründe liefern, um Theorien zu akzeptieren oder zu verwerfen? Sir Karl Popper stellt seine eigene Analyse\*\* primär unter diese Fragestellung, ohne (im Unterschied zu Duhem) die »Fruchtbarkeit von Gedankenexperimenten«, insbesondere in heuristischer Hinsicht, in Frage zu stellen (Popper 1959, S. 397 f.). Popper geht dabei unausgesprochen von einer wichtigen und zutreffenden historischen Annahme aus: dass nämlich Gedankenexperimente dort systematisch besonders relevant werden, wo es entweder um eine Entscheidung zwischen bereits entwickelten und miteinander rivalisierenden Theorien oder aber um eine Entscheidung zwischen grundsätzlich verschiedenen Interpretationen einer Theorie geht.\*\*\*

In Hinblick auf Theorien unterscheidet Popper einen „kritischen“ und einen „apologetischen“ Gebrauch von Gedankenexperimenten,

\* Mit der Bezeichnung „Duhemsches Paradoxon“ folge ich einem Vorschlag von Gert König. Als „Machsches Paradoxon“ bezeichnet er treffend Machs Bezugnahme auf Duhems Kritik des Gedankenexperiments (Mach 1980, S. 188, Anm. 1), da Machs Position (ganz anders als Duhems) durch eine Hochschätzung des Gedankenexperiments gekennzeichnet ist.

\*\* Der fragliche Anhang \*XI zur „Logik der Forschung“ enthält keinen Datierungshinweis (ein „Zusatz“ stammt aus dem Jahr 1968), in der ersten englischen Ausgabe von 1959 ist er jedoch bereits enthalten; vgl. zu Poppers Beitrag auch die Kritik von (Krimsky 1973).

\*\*\* Letzteres im Falle der Quantenmechanik, die den Bezugspunkt für seine Analyse des Gedankenexperiments abgibt. Diese implizite Poppersche Annahme ließe sich in der Tat vielfach belegen.



wobei er sich (erwartungsgemäß) allein für den theoriekritischen Gebrauch ausspricht:

Nun ist der Gebrauch des Gedankenexperiments als kritisches Argument zweifellos berechtigt: man versucht damit zu zeigen, daß der Urheber einer Theorie bestimmte Möglichkeiten übersehen hat. Offenbar hat dann auch der Gegner das Recht, solchen kritischen Einwänden entgegenzutreten, etwa [sic!] indem er nachweist, daß das vorgeschlagene Gedankenexperiment prinzipiell unmöglich ist [...]. (Popper 1959, S. 398 f.)

Er führt weiter zwei methodologische Regeln (Krimsky 1973, S. 327 f.) zum „kritischen“ Gebrauch aus: einmal darf die Zurückweisung eines kritischen Gedankenexperiments keine Veränderungen enthalten, die dessen „kritisches Potential“ herabsetzen;\* dann darf bei einer solchen Zurückweisung nicht von anderen Theorien, deren Widerlegung nicht in Rede steht, Gebrauch gemacht werden.\*\* Es sind demnach also nur so bestimmte Gedankenexperimente, die die Funktion der Theoriewiderlegung wahrnehmen können. Poppers ganze Argumentation zum Gedankenexperiment erscheint indes in mindestens zwei Punkten problematisch:

- 1) Das „etwa“ im oben aufgeführten Zitat weist auf eine Unbestimmtheit Poppers bezüglich der Zurückweisung kritischer Gedankenexperimente hin, lässt aber den Schluss zu, dass es ihm ausreichend erscheint, ein Gedankenexperiment als (prinzipiell) unrealisierbar nachzuweisen, um es als kritisches Argument zu erledigen. „Kritische“ Gedankenargumente hätten dann also grundsätzlich zwar nicht unbedingt realisierte, aber realisierbare Gedankenexperimente zu sein. Dieser Gedanke geht insofern positiv über Duhem hinaus, als er auch dem Galileischen Typus eine theoriekritische Funktion einräumt.

\* »Allgemein ist meines Erachtens der argumentative Gebrauch von Gedankenexperimenten nur dann berechtigt, wenn die Ansichten des Gegners klar ausgesprochen sind und wenn die Regel befolgt wird, daß die eingeführten Idealisierungen Konzessionen an den Gegner oder wenigstens für ihn annehmbar sein müssen« (Popper 1959, S. 399; Hervorhebungen im Text). Den hier der Kürze halber gebrauchte Begriff „kritisches Potential“ verwendet Popper nicht.

\*\* Popper führt dieses Kriterium gegen Bohrs Rückgriff auf Einsteins allgemeine Relativitätstheorie im Kontext der Quantenmechanik (Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon) an, ohne es explizit zu formulieren (Popper 1959, S. 402). Die Motivation hierfür liegt auf der Hand: Das zweite Kriterium soll verhindern, dass die mögliche Falsifikation auf eine Hilfstheorie abgewälzt wird.

Aber er geht nicht weit genug. „Alle kritischen Experimente müssen realisierbar sein“: Um einen solchen Allsatz zu widerlegen, reicht bekanntlich ein Gegenbeispiel aus. Nun ist Newtons berühmtes Eimerexperiment zugunsten des absoluten Raumes realisierbar und auch realisiert. Es ist zudem affirmativ, im Sinne Poppers sogar apologetisch bezüglich der Newtonschen Theorie. Machs ebenso berühmter Gegenvorschlag, man möge den Eimer ruhen lassen, und den ganzen Fixsternhimmel um ihn drehen, erscheint nicht realisierbar. Er geht zudem für Newtons Theorie negativ aus und ist im Sinne Poppers zweifellos ein kritisches Argument. Realisierbar und apologetisch einerseits (Newton), nicht realisierbar und kritisch andererseits (Mach): In Poppers Sicht ist dies eine völlig verkehrte Welt – als verkehrt aber erscheint hier eben Poppers Sicht des kritischen Gedankenexperiments. Man könnte diesem Argument vielleicht entgegen, Machs Gedankenexperiment sei insofern doch realisierbar (und sogar realisiert), als hinter seinem Vorschlag die These von der Äquivalenz der Eimer- und Fixsternrotation stehe, also Newtons Realisierung ausreiche. Dieses Argument setzt aber bereits die Annahme der Machschen These voraus und schwächt, entgegen Poppers erster Regel, die argumentative Kraft des Machschen Gedankenexperiments.

- 2) Gedankenexperimente, gleich welcher Art, können nach Popper keine theoriestützende Funktion haben, sondern allenfalls eine theoriewiderlegende, d. h. kritische. Diese Auffassung scheint nun auch im Rahmen von Poppers eigener Wissenschaftstheorie unbegründet und sogar falsch zu sein, denn sie widerspricht seiner Theorie der Bewährung. Bewährung ist ja nach seiner Auffassung ein Maß der Rationalität des Fürwahrhaltens einer Theorie und als solches »ein Maß für die Strenge der Prüfung, die sie bestanden hat« (Popper 1993, S. 105). Die kritische Prüfung ist dabei ausdrücklich nicht auf empirische und insbesondere experimentelle Instanzen beschränkt. Sie ist vielmehr zunächst und vor allem der Versuch einer unabhängigen Widerlegung einer Theorie. Unabhängig wiederum ist ein Widerlegungsversuch nicht nur dann, wenn er auf neue, bei der Theorieformulierung verwendete empirische Daten zurückgreift, sondern auch dann, wenn er sich akzeptierter unabhängiger Theorien bedient. Hier liegt nun gerade eine Möglichkeit des Gedankenexperiments, die Popper völlig übersehen hat: Gedankenexperimente können nämlich Theorien be-

währen, sogar ausgezeichnet bewähren. Hier implizit eine Asymmetrie zwischen widerlegenden Experimenten und widerlegenden Gedankenexperimenten zu behaupten, wie Popper es tut, entbehrt wohl jeder Grundlage. Die Möglichkeit der Theoriebewährung durch ein Gedankenexperiment sei kurz und schematisch an der schwierigeren Form, dem nichtrealisierbaren Gedankenexperiment aufgezeigt, und zwar am Maxwellschen Typ (Krimsky 1973, S. 331–334): Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt in populärer Darstellung, dass das Maß der Entropie (oder Unordnung) in einem geschlossenen System zunimmt oder allenfalls gleich bleibt. Werden etwa bei einem System, das aus zwei Gefäßen mit einer kalten Flüssigkeit A und einer heißen Flüssigkeit B besteht, beide Teile verbunden, so erhöht sich die Entropie: Die sich im Mittel „ordentlich“ langsam bewegenden Moleküle von A und die sich „ordentlich“ schnell bewegenden von B vermischen sich; es entsteht ein „unordentliches“ Geschwindigkeitsgemisch.

Maxwell misstraute zunächst dem zweiten Hauptsatz. In „kritischer“, d. h. Popperscher Absicht führte er ein so genanntes *finite being* (endliches Wesen) als Gedankenkonstruktion in das fragliche System ein. Dieser (erst später so genannte) „Maxwellsche Dämon“ sei mit der Fähigkeit ausgestattet, alle Teilchen zu erkennen und ihre Geschwindigkeiten festzustellen. Er könnte nun durch Schließen und Öffnen der Verbindung zwischen den beiden Systemteilen die als schnell erkannten Moleküle in A, die als langsam erkannten in B zurückhalten und so die alte Ordnung wiederherstellen. Gegen die (damals) neue Thermodynamik scheint Maxwells Gedankenexperiment zu zeigen, dass eben doch alle Prozesse im Sinne der „alten“ Mechanik umkehrbar sind.

Maxwells Dämon beschäftigt die Physik seit nunmehr einem guten Jahrhundert. Seine Geschichte ist allerdings die einer sukzessiven „Entdämonisierung“: Nachdem ihm zunächst große widerlegende Kraft zuerkannt wurde und er geradezu ein als Paradoxon der klassischen Physik verstanden wurde, fügt er sich mittlerweile gut in das Theoriegebäude der Physik ein. Hier sei nur auf eine Episode dieser Geschichte hingewiesen: Leon Brillouin machte 1949 darauf aufmerksam, dass der Dämon Orte und Geschwindigkeiten einzelner Teilchen nur dann bestimmen kann, wenn er die einzelnen Teilchen in der Flüssigkeit auch identifizieren kann. Wenn er dies tut (etwa mit Hilfe elektromagnetischer Strahlen), muss er dem System Energie zuführen.

Man kann zeigen, dass die damit verbundene Zunahme an Entropie größer ist als die Abnahme, die die ordnende Hand des Dämons bewirkt. Lässt man also die Elektrodynamik, die in diesem Kontext unproblematisch erscheint, im Rahmen einer Messtheorie des Dämons zu, so büßt dieser seine widerlegende Kraft ein. Ebenso verhält es sich bei anderen messtheoretischen Verfeinerungen mit Hilfe von Quantenmechanik und Informationstheorie. Der Maxwellsche Dämon widerlegt somit keinesfalls die Thermodynamik. Vielmehr führt er diese Theorie bis an ihre Grenzen, zeigt auf, wie sie mit anderen Theorien zusammenhängt und wie sie sich so kohärent in die Gesamtheit unseres wissenschaftlichen Wissens einfügt. In diesem Sinne bewährt er die Thermodynamik in geradezu ausgezeichneter Weise.

Es geht bei diesem Beispiel nicht darum zu zeigen, dass Wissenschaftsgeschichte anders verläuft, als es Poppers „Logik der Forschung“ fordert. Entsprechende Nachweise sind ja längst erbracht. Es geht hier vielmehr um ein systematisches Argument, veranschaulicht am historischen Beispiel: Poppers vermeintlich „kritische“ Theorie des Gedankenexperiments verbietet ja gleichsam dogmatisch die „Entdämonisierung“ des Maxwellschen Dämons mit Hilfe anderer naturwissenschaftlicher Theorien. Letztlich ist diese Schwierigkeit seiner Wissenschaftstheorie mit dem Gedankenexperiment, wie im Einzelnen nachgewiesen werden könnte, auf seine „dezisionistische“ Behandlung des Holismus-Problems zurückzuführen. Popper kann daher weder akzeptieren noch überhaupt sehen, dass selbst nicht realisierbare Gedankenexperimente eine Theorie wie die Thermodynamik sehr wohl bewähren können. Er begibt sich damit einer wichtigen Möglichkeit, die sein eigener „Hauptsatz der Bewährung“ sehr wohl gestattet: »Auch das, was man ‚positiv‘ nennen könnte, ist es [...] nur aufgrund negativer Methoden.« (Krimsky 1973, S. 21)\*

### 3.2.4 Kuhns „möglichkeitsbestimmende“ oder „theoriekonstitutive“ Gedankenexperimente

Es stellt sich nun die weitere Frage, ob über die untersuchte „negative Methode“ Poppers hinaus – deren Anwendung auf das Gedankenexperiment bei Popper selbst offenbar entschieden zu kurz greift – Ge-

\* Zur Holismus-Problematik in Poppers Wissenschaftstheorie s. näher (Popper 1994/1997, I, S. 163 f. und S. 348–350).

dankenexperimente auch eine positive bzw. konstruktive Instanz für erfahrungswissenschaftliche Theorien darstellen können. Hinweise hierauf, wenn auch letztlich keine Begründung hierfür, finden sich bei Thomas S. Kuhn.\* Er stellt, ähnlich wie Popper, Gedankenexperimente von vornherein in den Kontext des Theoriewechsels bzw. (in seiner Terminologie) des Paradigmenwechsels.\*\* Dabei kommt ihnen eine doppelte Funktion zu, sie sind nämlich (in Poppers Terminologie) sowohl „kritisch“ als auch „apologetisch“: kritisch, insofern sie theoretische Probleme innerhalb der vorhandenen Theorie aufweisen und diese sogar manchmal für eine geeignet gewählte Erfahrungssituation in die Form eines Paradoxons bringen, apologetisch, insofern sie durch neue theoretische Annahmen eine Auflösung dieses Paradoxons anbieten. Gleichzeitig wird dabei – und dies ist für Kuhn der entscheidende Punkt – ein neues Begriffssystem etabliert, das das alte ablöst und neues Wissen über einen gewissen Gegenstandsbereich ermöglicht.

Zur Illustration sei eines der vielen Gedankenexperimente aufgeführt, das Galilei gegen Aristoteles' Bewegungslehre vorbringt: Aristoteles stellt in Buch IV seiner „Physik“ den Satz auf, dass zwei Körper in einem Medium unter gleichen Bedingungen um so schneller fallen, je schwerer sie sind.\*\*\* Ihre Geschwindigkeit wäre demnach ihrem Gewicht proportional. Galilei führt diesen Satz mit folgender Argumentation *ad absurdum*: Der größere Stein A falle mit einer Geschwindigkeit von acht Einheiten, der kleinere B mit vier Einheiten.

\* Die Arbeit (Kuhn 1978) erschien im Original 1964, also nach Poppers Anhang \*XI (Popper 1957), auf den Kuhn keinen Bezug nimmt.

\*\* »Das Ergebnis von Gedankenexperimenten kann das gleiche sein wie das von wissenschaftlichen Revolutionen: sie können den Wissenschaftler instand setzen, etwas als wesentlichen Bestandteil seines Wissens zu verwenden, was dieses Wissen ihm bisher unzugänglich gemacht hatte. In diesem Sinne verändert sich sein Wissen von der Welt.« (Kuhn 1978, S. 350 f.)

\*\*\* »Wir sehen ja, daß (Körper), die größeren Antrieb haben, sei es an Schwere oder an Leichtigkeit, wenn alle übrigen Bedingungen gleichbleiben, schneller eine gleiche Strecke durchmessen, und zwar in dem Verhältnis, welches die (dabei vorkommenden) Größen zueinander haben.« (Aristoteles 1995, S. 96) Aristoteles leitet aus diesem Gesetz gerade die Unmöglichkeit eines leeren Raumes ab: »Also müßte (im Leeren) alles gleichschnell sein. Aber das geht nicht.« (Aristoteles 1995, S. 96) Er verwendet also gerade Galileis Gesetzhypothese, um die Unmöglichkeit des Vakuums in der Form eines indirekten Schlusses zu „beweisen“. Dies illustriert, dass mit der Annahme eines Gedankenexperimentes vorliegender Art die Übernahme leitender Hintergrundannahmen einhergeht.

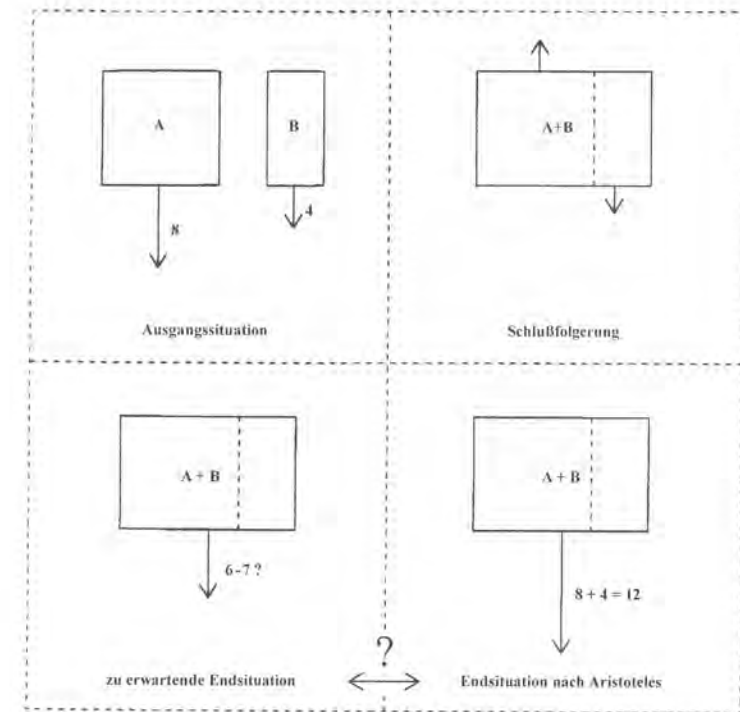


Abb. 3.3: Galileis „weltbildveränderndes“ Gedankenexperiment

Vereint man beide zu einem Körper  $A + B$ , so ist zu erwarten, dass  $A$  durch  $B$  langsamer und  $B$  durch  $A$  schneller wird. Die gemeinsame Geschwindigkeit muss demnach irgendwo in der Mitte liegen, vielleicht bei sechs bis sieben Einheiten. Nach Aristoteles aber muss  $A + B$  schneller sein als  $A$ : zwölf Einheiten! Galilei leitet aus diesem Widerspruch das Argument ab, dass tatsächlich alle Körper, unabhängig von ihrem Gewicht, gleich schnell fallen müssen (Galilei 1973, S. 57 f.).

Kuhns Untersuchung liefert eine neue und wichtige Einsicht zu Gedankenexperimenten dieser Art: Mit der Annahme des Gedankenexperimentes von Galilei geht die Adaption eines ganz neuen begrifflichen Rahmens einer Theorie der Bewegung einher. In der Tat lässt sich zeigen, dass der Übergang zu Galileis Fallgesetz nicht möglich ist,

ohne Grundbegriffen wie „Geschwindigkeit“, „Raum“ und auch „Körper“ eine andere Bedeutung zu geben. Simplicios Verwirrung\* ist daher auch völlig berechtigt: Sie hat ihren Grund darin, dass mit der Annahme des formallogisch zwingend erscheinenden Schlusses ein semantischer Bruch einhergeht, der im Argument selber nicht zutage tritt. Das Gedankenexperiment verdankt seine argumentative Kraft der Logik, aber seine eigentliche theoretische Bedeutung liegt auf der Ebene der Semantik. In zwei Punkten erscheint Kuhns Theorie des Gedankenexperiments gleichwohl revisionsbedürftig:

- 1) Für Kuhn geht der Übergang von Aristoteles zu Galilei mit der Beseitigung von „Unstimmigkeiten“ und (versteckten) „Widersprüchen“ innerhalb der Begriffe der alten Theorie einher.\*\* Tatsächlich kann aber wohl nur von Widersprüchen zwischen den alten, in sich konsistenten Aristotelischen Begriffen und den neuen, „faktisch-apriorischen“ Hintergrundannahmen Galileis über die Bewegung die Rede sein. Zum Beispiel vollzieht sich Galileis Gedankenexperiment zur Fallbewegung im Vakuum, für Aristoteles hingegen ist bereits der Ausdruck „freier Fall“ kontradiktorisch und kann daher gar kein Begriff einer Bewegungslehre sein. Galileis

\* Dem Aristoteliker Simplicio legt Galilei die Worte in den Mund: »Ich bin ganz verwirrt, denn mir will es nun scheinen, als ob der kleine Stein, dem grösseren zugefügt, dessen Gewicht und daher durchaus auch dessen Geschwindigkeit vermehre, oder jedenfalls, als ob letztere nicht vermindert werden müsse.« (Galilei 1973, S. 58)

\*\* »Ich begann mit der Auffassung, daß eine wichtige Klasse von Gedankenexperimenten den Wissenschaftler mit einem Widerspruch oder einer Unstimmigkeit konfrontiert, die in seiner Denkweise steckte. Das Erkennen des Widerspruchs erschien dann als ein wesentlicher erster Schritt seiner Beseitigung. Als Ergebnis des Gedankenexperiments wurden klare Begriffe entwickelt, die die bisherigen verworrenen ersetzten.« (Kuhn 1978, S. 347) Kuhn selber macht allerdings auch klar, dass es sich hierbei um eine unhistorische Beschreibung handelt (Kuhn 1978, S. 329). Die gerade zitierte Passage setzt er so fort: »Die im Gefolge der Gedankenexperimente ‚berichtigten‘ Begriffe waren an sich nicht verworren. Wenn ihr Gebrauch zu Problemen führte, so unterschieden sich diese nicht von denen, die jedes auf Experimenten beruhende Gesetz oder jede solche Theorie schafft. Das heißt, sie entstanden nicht allein aus dem Begriffsapparat, sondern aus den Schwierigkeiten bei dem Versuch, diesen auf eine bisher unverarbeitete Erfahrung anzuwenden.« (Kuhn 1978, S. 348; Hervorhebung im Text) Kuhns Rede bleibt jedoch insofern unbestimmt, als er nicht zwischen selbstwidersprüchlichen Begriffen (wie dem der Geschwindigkeit bei Aristoteles) und einem Widerspruch zwischen Begriffen und solchen Hintergrundannahmen, die über die Einführung neuer Gesetzesmöglichkeiten entscheiden (wie Aristoteles' Ablehnung des Vakuums) unterscheidet (Sorensen 1992, S. 125).

Gedankenexperiment lässt sich insofern auch als ein *möglichkeitsbestimmendes* bezeichnen, als mit seiner Annahme neue, „faktisch-apriorische“ Bindungen darüber eingegangen werden, welche Erwartungen im Rahmen der Theorie überhaupt an die Natur gerichtet werden können.

- 2) Kuhn bemerkt, dass Gedankenexperimente in ihrer »[...] Rolle stark der [...] wirklicher Laborexperimente und Beobachtungen [ähneln]«. \* Dies scheint nun aber gerade bei Theorieablösungen nicht der Fall zu sein. Vielmehr muss man, wenn man der historisch begründeten Auffassung von Imre Lakatos folgt, dass Theorien überhaupt nie durch Einzelerfahrung, sondern nur durch neue Theorien eliminiert werden,\*\* hier tatsächlich eine klare Asymmetrie zwischen Experiment und Gedankenexperiment zugunsten des letzteren konstatieren: Gedankenexperimente haben ein größeres theorieelimitierendes wie auch theorieprägendes Potential als gewöhnliche Experimente, weil sie die neue Theorie gleichsam am „reinen Fall“ explizieren können.

Ob man dieser Kritik folgen mag oder nicht: In Hinblick auf erfahrungswissenschaftliche Theorien liegt bei Kuhn zweifellos der weitestgehende und tiefste Gebrauch vor, der vom Gedankenexperiment gemacht werden kann. Seine wesentliche Funktion ist dabei keine theoriekritische oder theoriebewährende, sondern eine *theoriekonstitutive*. Wenn hier auch von „möglichkeitsbestimmenden“ Gedankenexperimenten die Rede ist, soll damit klar gemacht werden, dass sie nicht unter die eingangs vorgeschlagenen vier Typen fallen, sondern diese vielmehr insofern bestimmen, als sie die Grenze zwischen Realisierbarem und nicht Realisierbarem neu definieren. Die Analyse solcher Gedankenexperimente eignet sich daher auch in besonderem Maße, um charakteristische Elemente eines „Weltbildes“ wie auch des „Weltbildwandels“ zu vermitteln.

\* Kuhn bezieht sich hier auf eine vergleichbare „Doppelrolle“, wonach beide aufdecken können, »daß die Natur einem bisherigen System von Erwartungen nicht entspricht« und »aufzeigen, wie die Erwartungen und die Theorie abgeändert werden müssen.« (Kuhn 1978, S. 348)

\*\* »The falsificationist pattern of 'conjectures and refutations', that is, the pattern of trial-by-hypothesis followed by error-shown-by-experiment breaks down. A theory can only be eliminated by a *better* theory, that is, by one which has excess empirical content over the corroborated content of its predecessors, some of which is subsequently confirmed.« (Lakatos 1973/74, S. 320 f.)

### 3.3 Einstein, das Gedankenexperiment und die Popularisierung seiner Physik

»Einstein was a great thought experimenter; only Galileo was his equal« (Brown 1991, S. 99). Diese Einschätzung von J. Robert Brown wird in der Literatur zum Gedankenexperiment weitgehend geteilt. Einstein war insbesondere ein Meister des Gedankenexperiments in theoriekritischer Absicht. In seiner Autobiographie finden wir, dass er bereits mit 16 Jahren einen gedanklichen „Ritt“ auf einem Lichtstrahl vollführte und dabei, rückblickend geurteilt, auf »den Keim zur speziellen Relativitätstheorie« stieß (Einstein 1955, S. 20). Von diesen Anfängen bis zu den späten Debatten um die Quantenmechanik begegnen bei Einstein eine Vielzahl kritischer Gedankenexperimente, die darauf aus sind, logische Inkonsistenzen in und zwischen physikalischen Theorien herauszuarbeiten, überflüssige metaphysische Hintergrundannahmen aufzudecken und die ihnen korrespondierenden theoretischen Terme ohne Beobachtungsrelevanz aus der physikalischen Theorie zu entfernen. Die meisten von ihnen sind gerade Beispiele gegen das verbreitete Vorurteil, das Gedankenexperiment sei ein Einfallstor für empirisch haltlose Spekulationen: Sie dienen Einstein vielmehr umgekehrt der Aufweisung verborgener oder durch Gewohnheit mehr oder weniger evident gewordener Annahmen der Physik, die es zu eliminieren gilt.

Ohne weitere Ausführungen zu physikalischen oder wissenschaftstheoretischen Detailfragen seien hier einige typische Beispiele in visueller Form in Erinnerung gerufen (Norton 1991):

- a) das Gedankenexperiment zur Relativbewegung von Magnet und Leiter zu Beginn seiner Arbeit über die „Elektrodynamik bewegter Körper“ von 1905. Einstein zeigt hier eine theoretische Asymmetrie in der Maxwellschen Theorie bezüglich absoluter Bewegung auf, der auf der Beobachtungsebene keine Asymmetrie korrespondiert;
- b) der berühmte Einsteinsche „Gravitationsaufzug“ in „Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie“ von 1917. Die Wirkung jedes homogenen Gravitationsfeldes auf eine Masse ist äquivalent einer gleichförmig beschleunigten Bewegung derselben; letztlich geht es Einstein hier um die Eliminierung der Unterscheidung von träger und schwerer Masse in der klassischen Mechanik;

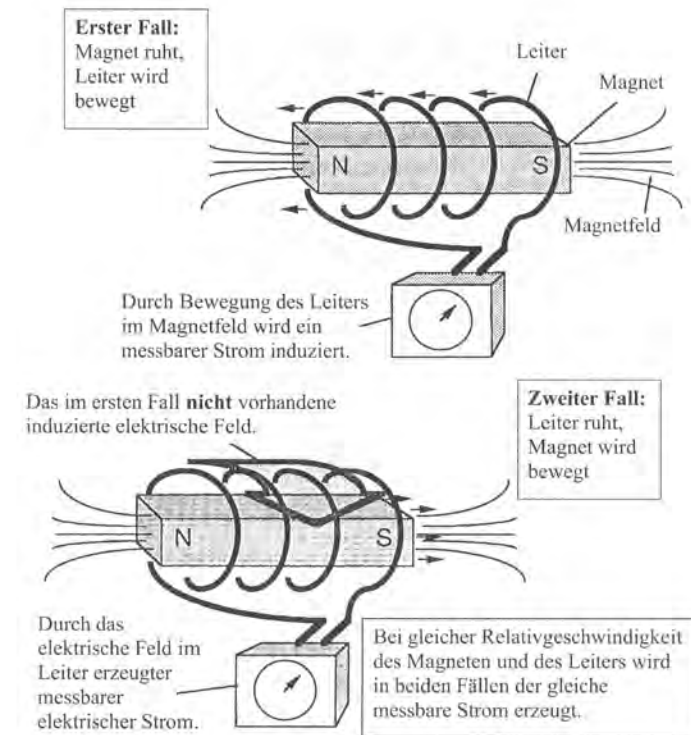


Abb. 3.4: Einsteins Magnet- und Leiter- Gedankenexperiment (aus Norton 1991, S. 146)

- c) die Einsteinsche „Photonenbox“. Sie war nicht erfolgreich in der von Einstein verfolgten Kritik der Kopenhagener Quantenmechanik, wohl aber sehr fruchtbar in Hinblick auf deren weitere Interpretation.

Jedes dieser drei Beispiele ist in hervorragender Weise geeignet, Einsteins Kritik an physikalischen Theorien (der klassischen Elektrodynamik, der klassischen Mechanik und der Quantenmechanik in der Kopenhagener Interpretation) zu veranschaulichen und mit Einsteins eigenen Grundannahmen zu kontrastieren, ohne in allzu vorausset-

zungsreiche physikalische Detaildiskussionen zu geraten, aber auch, ohne irreführenden Trivialisierungen zu erliegen. Wichtige Elemente des Einsteinschen physikalischen Weltbildes (wie das Relativitätsprinzip und die Äquivalenz von träger und schwerer Masse) lassen sich bereits mit ihrer Hilfe vermitteln.

Im Weiteren soll es aber nicht um die wichtigen physikalischen und philosophischen Hintergründe dieser Beispiele gehen und auch nicht darum, dass Einstein in diesen Kontexten kaum das Wort „Gedankenexperiment“ gebraucht. Es geht mir vielmehr um deren Rolle bei der Ausbreitung und Popularisierung seiner Lehre. Und da scheint mir die Auffassung unzutreffend zu sein, die von Einstein selber in die Diskussion gebrachten Gedankenexperimente hätten zwar zunächst die Popularität seiner Lehre befördert, dabei aber auch über Gebühr Missverständnisse heraufbeschworen und das Gedankenexperiment als Methode in der Physik selbst in Misskredit gebracht.\* Das ist unbelegt und scheint mir in dieser Allgemeinheit auch unbelegbar zu sein. Nimmt man mit Klaus Hentschel in Bezug auf die popularisierende Einstein-Literatur zweckmäßig eine vierfache Schichtung von der Primär- bis hin zur Quartärliteratur an, mag die These für letztere, für die hauptsächlich „vulgarisierende“ Einstein-Literatur, vielleicht zutreffen. Aber dieser hoffnungslosen Gattung von Einstein-Verunstaltung war auch mit anderen Darstellungsmethoden nicht zu einem

\* »Die Methode des ‚Gedankenexperiments‘, kaum dass sie bei den Physiker unter diesem Namen wahrgenommen wurde, ist ihnen, soweit es den internen Gebrauch betrifft, sofort verleidet worden – wegen ihres zu großen Erfolgs in der breiten Öffentlichkeit. Gedankenexperimente wurden zum Synonym eines mit Einstein entstandenen, einzigartigen neuen *sozialen Phänomens* der öffentlichen Beschäftigung mit Physik. Alle Welt machte plötzlich Gedankenexperimente. Wenn es um Eisenbahnen und Aufzüge geht, kann jeder mit Einstein mitreden.« (Kühne 2005, S. 245)

Der Autor „spielt“ insgesamt mit drei Gedanken zum Gedankenexperiment bei Einstein: (1.) der Verwendung des Wortes „Gedankenexperiment“, obwohl er die seltene Verwendung immer auch wieder selber herunterspielt (manchmal geht es ihm um die Sache „Gedankenexperiment“, manchmal eben nicht); (2.) mit den (durchaus feststellbaren) Fehldeutungen von Einsteins Gedankenexperiment, als ob es die nicht zu allen anderen Ausführungen bzw. Darstellungsmethoden der Relativitätstheorien gegeben hätte; (3.) mit Einsteins allgemeiner Kritik der Intuition (der allerdings auch positive Stellungnahmen Einsteins entgegenstehen). Bedauerlich ist, dass dabei die Rezeptionsgeschichte der Einsteinschen Gedankenexperimente nicht aufgearbeitet und weitestgehend ohne Belege argumentiert wird; einschlägige Untersuchungen zur Einstein-Rezeption (wie insbes. Hentschel 1990) werden gar nicht zur Kenntnis genommen.

Verständnis der Einsteinschen Ideen zu verhelfen. Autoren wie etwa Max Born dagegen, die um die physikalische Korrektheit und logische Präzision ihrer Vermittlungen der Relativitätstheorien besorgt waren, scheuten keineswegs davor zurück, Einsteins gedankenexperimentelle Methode zum Zwecke der logischen Analyse und zugleich der Veranschaulichung aufzugreifen (Born 1920). Gleiches lässt sich auch für die Popularisierung Einsteins im philosophischen Kontext durch kenntnisreiche Philosophen wie etwa Moritz Schlick belegen (Schlick 1921). Und dass Einsteins „Gravitationsaufzug“ noch in Betrieb ist und seine „relativistischen Züge“ auch noch nach einhundert Jahren ordentlich dampfen und ihren didaktischen Dienst tun, lässt sich in der neuesten Literatur besichtigen. Das scheint mir auch wissenschaftspsychologisch plausibel, denn die Einsteinsche Revolutionierung des physikalischen Weltbildes ist eine Revolutionierung auch tief verwurzelter Anschauungsvorurteile über Raum und Zeit, die sich mit Gedankenexperimenten als „Intuitionspumpen“ (wie sie gelegentlich genannt werden) gewöhnlich leichter bewältigen lässt als allein mit abstrakten Prinzipien und formalen Ableitungen.

### 3.4 Schlussbemerkung

Dass es sich beim Gedankenexperiment nicht nur aus wissenschaftspsychologischer und -didaktischer, sondern gerade auch aus wissenschaftstheoretischer Perspektive um eine ernst zu nehmende Methode handelt, habe ich im Hauptteil dieses Beitrages deutlich zu machen versucht: Das Gedankenexperiment ist ein durchaus geeignetes Instrument, um wissenschaftliche Theorien zu bewähren oder zu kritisieren; manche Gedankenexperimente können sogar konstitutiv für wissenschaftliche Theoriebildung sein. Es ist daher an der Zeit, es in der naturwissenschaftlichen Ausbildung nicht nur als „Notnagel“ (im Sinne Duhems) für mangelnde Realexperimente anzusehen – sowenig es angehen kann, es als „Ersatz“ des Realexperiments auszugeben –, sondern seine Möglichkeiten für eine nachhaltigere naturwissenschaftliche Bildung wahrzunehmen: Viele Gedankenexperimente ermöglichen es, die logisch-begrifflichen Grundlagen naturwissenschaftlicher Theorien mit relativ sparsamen technischen Voraussetzungen zu analysieren und zu reflektieren; naturwissenschaftlicher Theorie-wandel kann mit ihrer Hilfe der Schülerin, dem Studierenden und

dem interessierten Laien nahegebracht werden. Einstein hat diese Möglichkeiten früh erkannt und sich ihrer mit großem Erfolg bedient. Dass es seinem eigenen „Weltbild der Physik“ besonders gerecht wird, mag abschliessend dieses Zitat aus „Physik und Realität“ unterstreichen:

Physik ist ein in Entwicklung begriffenes logisches Gedankensystem, dessen Grundlagen *nicht* durch eine induktive Methode aus den Erlebnissen herausdestilliert, sondern nur durch *freie Erfindung* gewonnen werden kann. Die Berechtigung (Wahrheitswert) des Systems liegt in der Bewährung von Folgesätzen an den Sinneserlebnissen, wobei die Beziehung der letzteren zu ersteren nur intuitiv erfassbar ist. Die Entwicklung vollzieht sich in der Richtung wachsender Einfachheit des logischen Fundaments. Um diesem Ziele näher zu kommen, müssen wir uns damit abfinden, dass die logische Grundlage immer erlebnisferner und der gedankliche Weg von den Grundlagen bis zu jenen Folgesätzen [...] immer beschwerlicher und länger wird. (Einstein 1936, S. 105; Hervorhebungen im Text)

## Literatur

- Aristoteles (1995) Physik. Übers. und hg. von HG Zekl. Hamburg: 1–258
- Born M (1920) Die Relativitätstheorie Einsteins und ihre physikalischen Grundlagen. Berlin
- Brillouin L (1949) Life, thermodynamics and cybernetics. In: American Scientist 37: 554–568
- Brown JR (1991) The laboratory of the mind. London/New York
- Brown JR (1993) Why empiricism won't work. In: Hull, Forbes, Okruhlik (1993): 271–279
- Bunzl M (1996) The logic of thought experiments. In: Synthese 106: 227–240
- Buschlinger W (1993) Denk-Kapriolen? Gedankenexperimente in Naturwissenschaften, Ethik und Philosophy of Mind. Würzburg
- Cole D (1984) Thought and thought experiments. In: Philosophical Studies 45: 431–444
- Comenius JA (1658) Orbis sensualium pictus hoc est omnium principium in mundo rerum, et in vita actionum, pictura et nomenclatura. Nürnberg
- Diemer A (Hrsg) (1968) Beiträge zur Entwicklung der Wissenschaftstheorie im 19. Jahrhundert (Studien zur Wissenschaftstheorie, 1.). Meisenheim a. G.

- Duhem P (1978) Ziel und Struktur der physikalischen Theorien. Übers. von F. Adler. Leipzig 1908; neu hg. von L. Schäfer. Hamburg
- Einstein A (1905) Zur Elektrodynamik bewegter Körper. In: Annalen der Physik (4) 17: 891–921
- Einstein A (1917) Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie. Braunschweig
- Einstein A (1930) Rede zur Eröffnung der 7. Großen Deutschen Funkausstellung und Phonoschau in Berlin am 22. August 1930 [Tonbandabschrift]; zit. nach Renn (2004)
- Einstein A (1936) Physik und Realität. In: Aus meinen späten Jahren. Frankfurt a.M./Berlin 1984: 63–106
- Einstein A (1934) Mein Weltbild. Hrsg. v. Carl Selig. 3. Aufl. Frankfurt/M., Berlin, Wien 1956 (repr. 1977)
- Einstein A (1955) Autobiographisches. In: Schilpp PA (Hrsg) Einstein als Philosoph und Naturforscher. Stuttgart: 1–35
- Freese H-L (1995) Abenteuer im Kopf: Philosophische Gedankenexperimente. Weinheim
- Frege G (1962) Grundgesetze der Arithmetik. Begriffsgeschichtlich abgeleitet. 2 Bde., Jena 1893/1903 (repr. Darmstadt/Hildesheim)
- Galilei G (1973) Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend (1638). Übers. und hrsg. von A. von Oettingen. Leipzig 1891–1904 (repr. Darmstadt)
- Galilei G (1982) Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das Ptolemäische und das Kopernikanische. Übers. und erl. von E. Strauss. Leipzig 1891 (repr. Darmstadt)
- Genz H (1999) Gedankenexperimente. Weinheim
- Gooding D (1993) What is experimental about thought experiments? In: Hull, Forbes, Okruhlik (1993): 280–290
- Grant E (1981) Much ado about nothing. Theories of space and vacuum from the Middle Ages to the Scientific Revolution. Cambridge
- Hägqvist S (1996) Thought experiments in philosophy. Edsbruk
- Hacking I (1993) Do thought experiments have a life of their own? In: Hull, Forbes, Okruhlik (1993): 302–309
- Hentschel K (1990) Interpretationen und Fehlinterpretationen der speziellen Relativitätstheorie durch Zeitgenossen Albert Einsteins. Basel et al.
- Hermann A (1994) A. Einstein. Der Weltweise und sein Jahrhundert. Eine Biographie. München/Zürich

- Holton G (1998) Einstein, die Geschichte und andere Leidenschaften. Übers. von R. Sengerling. Braunschweig/Wiesbaden
- Horowitz T, Massey GJ (Hrsg) (1991) Thought experiments in science and philosophy. Savage (Maryland)
- Hull D, Forbes M, Okruhlik K (Hrsg) (1993) Proceedings of the 1992 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association. Vol. 2, East Lansing (Michigan)
- Humboldt W von (1980) Theorie der Bildung des Menschen (o.J.). In: Flitner A, Giel K (Hrsg) Werke. Bd. 3, 3. Aufl., Darmstadt: 234–240
- Kant I (1974) Kritik der reinen Vernunft (1781). Hg. von W. Weischedel. 2 Bde., Frankfurt/M.
- König G (1968) Der Wissenschaftsbegriff bei Helmholtz und Mach. In: Diemer A (Hrsg) (1968): 90–114
- Koyré A (1980) Von der geschlossenen Welt zum unendlichen Universum. Übers. von R. Dornbacher. Frankfurt/M.
- Krimsky S (1973) The use and misuse of critical Gedankenexperimente. In: Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie 4: 323–334
- Kühne U (2005) Die Methode des Gedankenexperiments. Frankfurt/M.
- Kuhn TS (1978) Eine Funktion für das Gedankenexperiment (1964). In: Kuhn TS: Die Entstehung des Neuen. Studien zur Struktur der Wissenschaftsgeschichte. Hg. von L. Krüger; übers. von H. Vetter. Frankfurt/M.: 327–356
- Kutschmann W (1999) Naturwissenschaft und Bildung. Der Streit der „Zwei Kulturen“. Stuttgart
- Lakatos I (1973/74) The role of crucial experiments in science. In: Studies in History and Philosophy of Science 4: 309–325
- Lukrez (Titius Lukretius Carus) (1989) Vom Wesen des Weltalls. Übers. von D. Ebener Leipzig
- Mach E (1897) Über Gedankenexperimente. In: Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht 10: 1–5
- Mach E (1980) Erkenntnis und Irrtum (1905). 5. Aufl. Leipzig 1929 (repr. Darmstadt)
- Massey BD (1991) Do all rational folk reason as we do? Frege's thought experiment reconsidered. In: Horowitz, Massey (1991): 99–110
- McAllister JW (1996) The evidential significance of thought experiment in science. In: Studies in History and Philosophy of Science 37: 233–250
- Nersessian N (1993) In the theoretician's laboratory: Thought experiments as mental modeling. In: Hull, Forbes, Okruhlik (1993): 291–301

- Norton J (1991) Thought experiments in Einstein's work. In: Horowitz, Massey (1991): 129–148
- Oersted HC (1822) Über Geist und Studium der allgemeinen Naturlehre. In: [Schweiggers] Journal für Chemie und Physik 36: 458–488
- Oersted HC (1844) Naturlaerens mekaniske Deel. Kjobenhavn
- Oersted HC (1851) Der mechanische Theil der Naturlehre. Übers. von L. Meyn. Braunschweig
- Poincaré H (1914) Wissenschaft und Hypothese (1902). Übers. und erl. von F. und L. Lindemann. 3. Aufl. Leipzig
- Popper KR (1959) Über den Gebrauch und Mißbrauch von Gedankenexperimenten, besonders in der Quantentheorie. In: Popper (1982): 397–411 (Anhang \*XI)
- Popper KR (1982) Logik der Forschung (1934). 7. Aufl. Tübingen
- Popper KR (1994/1997) Vermutungen und Widerlegungen. Übers. von G. Albert [u.a.]. Tübingen
- Popper KR (1993) Objektive Erkenntnis. Ein evolutionärer Entwurf. Übers. von H. Vetter. Hamburg
- Poser H (1984) Wovon handelt ein Gedankenexperiment? In: Poser, Schütt (1984): 181–198
- Poser H, Schütt H-W (Hrsg) (1984) Ontologie und Wissenschaft. Philosophische und wissenschaftshistorische Untersuchungen zur Frage der Objektkonstitution (TUB Dokumentation, 19.). Berlin: 181–198
- Pulte H (2001) Labore des Geistes [Rezension von Genz (1999)]. In: Wissenschaftlicher Literaturanzeiger 40: 10
- Renn J (2004) Einstein im Grenzgebiet von Wissenschaft und Politik. In: Physik in unserer Zeit 35 (2): 55
- Rescher N (1964) Hypothetical reasoning. Amsterdam
- Rescher N (1991) Thought experiments in presocratic philosophy. In: Horowitz, Massey (1991): 31–41
- Schlick M (1917) Raum und Zeit in der gegenwärtigen Physik. Zur Einführung in das Verständnis der allgemeinen Relativitätstheorie. Berlin
- Schlick M (1921) Einsteins Relativitätstheorie. In: Mosse Almanach: 105–123
- Sorensen RA (1992) Thought experiments. Oxford
- Wanning F (1999) Gedankenexperimente: Wissenschaft und Roman im Frankreich des 19. Jahrhunderts. Tübingen
- Tetlock PE, Belkin A (Hrsg) (1996) Counterfactual thought experiments in world politics. Logical, methodological and psychological perspectives. Princeton (N.J.)



- Thomé H (2004) Art. Weltbild. In: Historisches Wörterbuch der Philosophie 12 (2004): 460–463
- Weizsäcker CF von (1943) Zum Weltbild der Physik. 2. Aufl. 1944 Leipzig
- Weizsäcker CF von (1985) Aufbau der Physik. München
- Wilkes KV (1988) Real People. Personal identity without thought experiments. Oxford