

IMPLIKATIONEN DES ENERGIEPRINZIPS BEI HERMANN VON HELMHOLTZ

ERKENNTNISTHEORETISCHE UND NATURPHILOSOPHISCHE VORAUSSETZUNGEN.

Gregor Schiemann
Institut für Philosophie
Humboldt-Universität zu Berlin

Helmholtz hat seine Schrift "Über die Erhaltung der Kraft" mit einer berühmten, etwa 5 Seiten umfassenden Einleitung versehen. In ihr trägt er erkenntnistheoretische und naturphilosophische Voraussetzungen des Energieprinzips vor, für die bereits damals in einer physikalischen Abhandlung eigentlich kein Platz mehr vorgesehen war. Sie münden in der programmatischen Formulierung einer mechanistischen Naturanschauung, die er in seinen bisherigen Schriften nur mit Zurückhaltung geäußert hat. Dass er sie nun seiner Schrift voranstellt, hat einen einfachen Grund: Helmholtz glaubt, dass es sich bei der Energieerhaltung um ein Prinzip handle, dessen Geltung ebenso Resultat wie Indiz einer mechanischen Verfassung der Welt sei.

Die damit hergestellte Verbindung von Energieerhaltung und mechanistischer Naturauffassung ist wissenschaftshistorisch von grösster Bedeutung. Ihr beachtlicher innerwissenschaftlicher Einfluss trug dazu bei, dass die sich durchsetzende Anerkennung des Erhaltungssatzes noch einmal zu einer ungeahnten Renaissance des Mechanismus führte. Nachdem die Tradition mechanistischen Denkens in den ersten Jahrzehnten des vergangenen Jahrhunderts an Boden verloren hatte, prägte es in der zweiten Hälfte wieder verstärkt die Ausrichtung der Forschung. Erst auf diesem Hintergrund lässt sich die ganze Tragweite der letalen Krise des Mechanismus, die die Entwicklung der Physik bis in die ersten Jahrzehnte unseres Jahrhunderts hinein bestimmte, erkennen.

In wissenschaftstheoretischer Hinsicht hat Helmholtz' Beitrag zur letzten Erfolgsgeschichte des Mechanismus zwei Seiten, die zugleich in einem Abhängigkeits- und in einem Spannungsverhältnis stehen. Dem Erhaltungsprinzip gibt er nämlich ausser einer mechanistischen Begründung auch eine selbständige Formulierung, ohne die seine Geltung nicht als empirischer Beleg für die mechanische Struktur der betreffenden Prozesse aufgefasst werden kann.

Der Status dieser beiden Seiten ist äusserst unterschiedlich beurteilt worden. In der Begründung haben die meisten Interpreten eine metaphysische Konzeption gesehen, die die Geltung der Energieerhaltung vor aller Erfahrung beweisen wolle. Helmholtz orientiere sich hierbei vornehmlich an Kants Erkenntniskritik. Die bahnbrechende Wirkung seines Ansatzes könne deshalb auch als Zeichen für die wiedererstarkende Stellung der idealistischen Wissenschaftsauffassung in den Naturwissenschaften gewertet werden, die durch ihn in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts überhaupt repräsentativ vertreten sei.¹

Als Aussage, die unmittelbar auf experimentelle Resultate der Forschung rekurriert, ist hingegen die bei Helmholtz nachweisbare selbständige Formulierung des Prinzips verstanden worden. An dieser, von metaphysischen Annahmen eher freien Fassung knüpfte in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts die positivistische und mechanismusfeindliche Strömung der Energetik an.² Dass sich die Gegner des Mechanismus teilweise auf Helmholtz stützen konnten, gibt zur Frage Anlass, ob er mit seiner Schrift nicht den ersten Spatenstich für das Grab der dort von ihm selbst mit Nachdruck propagierten Naturauffassung getan hat.

Meine Rekonstruktion von Helmholtz' Begründung der Energieerhaltung beabsichtigt, vor allem das Verhältnis von empirischen und nichtempirischen Elementen aufzuklären. Als erstes möchte ich zeigen, worin die nichtempirischen Elemente bestehen und dass Helmholtz bereits in der Einleitung, wo der selbständige Energiebegriff noch nicht entwickelt ist, an entscheidenden Stellen auf die wissenschaftliche Erfahrung Bezug nimmt. Insofern dieser Nachweis gelingt, wird der Begründung einiges von ihrem vermeintlich metaphysischen Charakter genommen, ohne die Verbindung zwischen Mechanismus und Energieerhaltung zu lösen. Im Gegensatz zur Transzendentalphilosophie macht Helmholtz die Geltungsbedingungen seines

¹ Dass die mechanistische Naturauffassung, wie sie Helmholtz in der Einleitung vertritt, das Ergebnis einer metaphysischen Deduktion sei, die nur aus seiner (historisch für diese Zeit nicht belegbaren) Auseinandersetzung mit Kant verständlich gemacht werden könne, hat mit grösstem Einfluss HEIMANN (1974) behauptet. Diese Sicht wird trotz mancher kritischer Einwände auch von WINTERS (1985), FULLINWIDER (1990), HEIDELBERGER (1994), BEVILACQUA (1994), DARRIGOL (1994) und KRÜGER (1994) geteilt. Exemplarisch für weitreichende wissenschaftstheoretische Folgerungen, die aus seinem angeblichen Kantianismus gezogen werden, ist die Beurteilung des Verhältnisses zwischen Helmholtz und seinem Schüler Heinrich Hertz in JANIK UND TOULMIN (1977) und D'AGOSTINO (1975). Eine erst mit der weiteren Entwicklung von Helmholtz' Wissenschaftsauffassung einsetzende Hinwendung zum Empirismus sehen WINTERS (1985) und HEIDELBERGER (1994). Auf Helmholtz' durchgängigen Realismus bzw. Naturalismus weisen in jüngerer Zeit HATFIELD (1990), BUCHWALD (1994), SCHIEMANN (1997) und HAYDER (1997) hin. Auf die, mit einer vermeintlichen idealistischen Position von Helmholtz allerdings durchaus verträglichen Beziehungen zwischen seiner Erkenntnistheorie und dem logischen Empirismus machen ausser JANIK UND TOULMIN (1977) auch MAJER (1985), LEROUX (1995) und HAYDER (1997) aufmerksam.

² Zur Energetik vgl. deren wichtigsten Proponenten HELM (1898), zu ihrer Konkurrenz zum Mechanismus vgl. JUNGnickel AND MCCORMACH (1986), Bd. II, S. 211 ff., und WISE (1983), S. 19 ff., der als repräsentative Positionen der "Opposition gegen Helmholtz' [mechanistisches] Programm" (a.a.O., S. 19) den Positivismus von Ernst Mach und die Energetik von Wilhelm Ostwald und Georg Helm anführt.

Mechanismus von zukünftigen empirischen Ergebnissen der Wissenschaft abhängig. Er gibt seinem Mechanismus in diesem Zusammenhang eine hypothetische Geltung, an deren bloss vorübergehenden Charakter er aber bemerkenswerterweise keinen Zweifel hegt. Die Einleitung ist von der Erwartung einer bald schon zu erreichenden absoluten, wenn vielleicht auch nicht universellen Wahrheitsgeltung des Mechanismus getragen. (1.)

Im zweiten Teil gehe ich der Frage nach, in welchem Mass die mit grosser Siegesgewissheit vorgetragene mechanistische Begründung in die Formulierungen des Erhaltungssatzes Eingang findet. Helmholtz, so zeigt eine nähere Betrachtung seiner Schrift, verwendet mehrere Energiebegriffe. Haben diese insgesamt oder nur teilweise einen von speziellen naturphilosophischen Annahmen unabhängigen Status? Auf welche Teile der Schrift hätte sich ein Wissenschaftler im vergangenen Jahrhundert stützen können, wenn er von der Energieerhaltung, nicht aber von Helmholtz' Mechanismus überzeugt gewesen wäre? (2.)¹

1. DIE BEGRÜNDUNG DES MECHANISMUS

Um nun systematisch den Punkt zu bestimmen, an dem die Empirie Eingang in Helmholtz' erste Grundlegung des Mechanismus findet, möchte ich die von ihm dabei genannten Voraussetzungen der physikalischen Wissenschaften in zwei Gruppen einteilen. Die erste betrifft die methodischen (a.i) und begrifflichen (a.ii) Voraussetzungen der Forschung, die zunächst unabhängig von Erfahrung gelten; die zweite schränkt diese Geltung ein, indem sie die Reichweite der Methode und die Bestimmung des Ziels der Forschung Erkenntnissen unterordnet, die allein in der Erfahrung gewonnen werden können (b). Nicht den allgemeinen Bedingungen der physikalischen Forschung, sondern ihren speziellen Ergebnissen entnimmt Helmholtz dann die vermeintlichen Hinweise auf die mechanische Struktur der Natur (c). Dieser Argumentation entspricht es, dass er dem physikalischen Naturwissen einen, mit der Zeit abnehmenden hypothetischen Charakter zuweist (d).

A) VORAUSSETZUNGEN DER PHYSIK

(i) Die methodischen Voraussetzungen gehen von einer strikten Zweiteilung der physikalischen Wissenschaften in einen experimentellen und einen theoretischen Teil aus:

¹ Bei der folgenden Rekonstruktion handelt es sich um die stark gekürzten Abschnitte B.II.1.a. und b. aus SCHIEMANN (1997).

"Aufgabe der [... physikalischen Naturwissenschaften] ist es einmal, die Gesetze zu suchen, durch welche die einzelnen Vorgänge in der Natur auf allgemeine Regeln zurückgeleitet, und aus den letzteren wieder bestimmt werden können. [...] Die Aufsuchung [... dieser Regeln] ist das Geschäft des experimentellen Theils unserer Wissenschaften. Der theoretische Theil derselben sucht dagegen, die unbekannteten Ursachen der Vorgänge aus ihren sichtbaren Wirkungen zu finden; er sucht dieselben zu begreifen nach dem Gesetze der Causalität. Wir werden genöthigt und berechtigt zu diesem Geschäft durch den Grundsatz, dass jede Veränderung in der Natur eine zureichende Ursache haben m ü s s e."¹

Der wissenschaftlichen Arbeitsteilung entspricht die *Trennung des Gesetzesbegriffes vom Kausalprinzip*. Eine hinter den sichtbaren Wirkungen stehende Ursache zu finden ist etwas anderes, als eine allgemeine Regel bzw. ein Gesetz aufzustellen. Gesetze, die unmittelbar auf die sichtbaren Wirkungen bezogen bleiben und deshalb durchaus phänomenalen Charakter haben, werden nicht als Ursachen angesehen. Beispielsweise wäre das Gravitationsgesetz nicht die Ursache für den freien Fall, sondern nur seine Beschreibung. Ob andere allgemeine Regeln oder substantielle Entitäten als Ursachen in Frage kommen, lässt Helmholtz an dieser Stelle offen. Er beschränkt sich darauf, seiner Überzeugung Ausdruck zu verleihen, dass es "letzte[] Ursachen" geben müsse, "welche nach einem unveränderlichen Gesetz wirken".² Da er damit aber bereits das Feld der ersten Gruppe von Voraussetzungen verlässt, möchte ich diese Bestimmung erst später erörtern.

Festzuhalten bleibt, dass sich aus dem (metaphysisch) vorausgesetzten Kausalgesetz noch keine Anhaltspunkte für eine mechanistische Naturauffassung ergeben. Als Voraussetzung der theoretischen Physik impliziert das Kausalgesetz nur, dass diese Disziplin nicht anders vorgehen kann, als nach Wirkursachen für experimentelle Gesetze zu fragen - ungeachtet einer möglicherweise akausalen Naturverfassung, die zwar nicht der Physik, vielleicht aber anderen Disziplinen verständlich sein könnte. Für die Physik ist damit sowohl eine teleologische Naturbetrachtung als auch die Erfassung von zufälligen Ereignissen ausgeschlossen.

(ii) Gegenüber der naturphilosophisch nur schwach bestimmenden Kausalitätsvoraussetzung scheinen die im Anschluss behandelten begrifflichen Voraussetzungen, die Helmholtz "Abstractionen" nennt, allerdings einen Mechanismus einzuschließen. Helmholtz reduziert nämlich die gesamte wissenschaftliche Begrifflichkeit auf die *zwei Grundbegriffe der beweglichen Materie und der auf Materie bezogenen Kraft*.³ Auf eine mechanistische Ontologie

¹ HELMHOLTZ (1847), S. 3 f. (Hervorheb. im Text).

² HELMHOLTZ (1847), S. 4.

³ Helmholtz stellt nur ausnahmsweise einen Zusammenhang zwischen seinem Kausalitätsverständnis und

deutet dabei vor allem der Umstand hin, dass er die Veränderbarkeit der Materie auf räumliche Bewegungen einschränkt:

"Die Wissenschaft betrachtet die Gegenstände der Aussenwelt nach zweierlei Abstraktionen: einmal ihrem blossen Dasein nach, abgesehen von ihren Wirkungen auf andere Gegenstände oder unsere Sinnesorgane; als solche bezeichnet sie dieselben als *M a t e r i e*. [...] Qualitative Unterschiede dürfen wir der Materie an sich nicht zuschreiben, denn wenn wir von verschiedenartigen Materien sprechen, so setzten wir ihre Verschiedenheit immer nur in die Verschiedenheit ihrer Wirkungen, d.h. in ihre Kräfte."¹

Die Begriffe der Materie und Kraft enthalten jeweils Bestimmungen, die nicht auf den anderen reduzierbar sind. So fasst Helmholtz die Materie nicht nur als das Bewegliche im Raum auf. Er schreibt ihr als Eigenschaft ausserdem die Massenerhaltung zu, die er im Unterschied zur dynamischen Grundlegung des Mechanismus von Leibniz und Kant² nicht auf das Wirken von Kräften zurückführt. Schliesslich ist durch die dritte Eigenschaft der Ruhe auch angedeutet, dass der Materie mechanische Trägheit eigen sein soll. Gegenüber der Materie ist die Kraft der Inbegriff des qualitativ Verschiedenen, das nicht aus den Bewegungen der Materie abgeleitet, sondern als Grundzug des Natürlichen angenommen wird. Der Kraftbegriff wird zwar als eigenständiger Begriff eingeführt, bleibt aber als "Vermögen Wirkungen auszuüben"³ weitgehend unbestimmt. Man kann lediglich annehmen, dass Kraftwirkungen, die "qualitative Unterschiede" hervorrufen sollen, nicht allein in Druck- und Stösswirkungen bestehen können. Es sind vielmehr alle Wirkungen zugelassen, solange sie sich nur auf ein Substrat beziehen, das den Bestimmungen der Materie entspricht.

Bemerkenswerterweise unterscheidet Helmholtz dabei zwei verschiedene Wirkungen von "Gegenstände[n] der Aussenwelt": Sichtbare Wirkungen auf "unsere Sinnesorgane" und unsichtbare "Wirkungen auf andere Gegenstände". Zur "Kenntniss" der "Gegenstände der Natur" gelange man nur, indem man von ersteren auf ein "Wirkendes" schliesse.⁴ Diese sehr gewichtige Feststellung, mit der Helmholtz die Einführung des Kraftbegriffes begründet, bedarf einer Erläuterung. Es fragt sich nämlich, ob die Feststellung, dass wir zur "Kenntniss" der Natur nur über die Sinnesorgane gelangen, überhaupt auf die Arbeit der Naturforschung angewendet werden kann. Ist mit dieser "Kenntniss" schon eine wissenschaftliche Erkenntnis gemeint? Ich möchte das mit Hinweis auf die "Zeichentheorie" von Helmholtz bezweifeln. In dieser legt er

diesen beiden "Abstraktionen" her. Vgl. SCHIEMANN (1997), Abschnitt B.II.1.a, Anm. 17.

1 HELMHOLTZ (1847), S. 4 f.

2 Vgl. SCHIEMANN (1997), Abschnitt A.III.3.

3 HELMHOLTZ (1847), S. 5.

4 Ebenda.

dar, dass die Sinnesorgane dem wahrnehmenden Bewusstsein nur Zeichen bzw. Symbole von der Welt liefern, die nicht mehr mit der Aussenwelt gemein haben als Namen mit den von ihnen bezeichneten Personen.¹ Derart abgewertet heisst "Kenntniss" ein lebensweltliches, für die alltägliche Orientierung gerade hinreichendes Wissen, das von der naturwissenschaftlichen Erkenntnis experimentell ermittelter Gesetze und theoretisch begründeter Ursachen prinzipiell zu unterscheiden ist.²

Man kann also sagen, dass Helmholtz am Beispiel der vorwissenschaftlichen Erfahrung den allgemeinen Naturcharakter, qualitativ verschiedene Wirkungen auszuüben, veranschaulicht. Diese weitgefaste Bedeutung des Kraftbegriffes schwächt die mit dem Begriff der "beweglichen Materie" bereits vorgegebene Kontur einer mechanistischen Naturauffassung ab und eröffnet die Möglichkeit, die begrifflichen Voraussetzungen auch unabhängig von einer bestimmten Ontologie aufzufassen. Da es sich um Vorstellungen handelt, die aller Wissenschaft zugrunde liegen, sollten auch die nichtmechanischen Zweige inbegriffen sein. Materie ist dann die Bezeichnung für jegliches Dasein und Kraft für jegliche (auch nichträumliche!) Veränderung dieses Daseins. Helmholtz scheint seine Voraussetzungen auch in diesem Sinn verstanden zu haben, wenn er im Anschluss betont:

"Es ist einleuchtend, dass die Begriffe von Materie und Kraft in der Anwendung auf die Natur nie getrennt werden dürfen. Eine reine Materie wäre für die übrige Natur gleichgültig [...]; eine reine Kraft wäre etwas, was dasein sollte und doch wieder nicht dasein, weil wir das Daseiende Materie nennen.³ [...] Beide Begriffe] sind [...] Abstractionen von dem Wirklichen, in ganz gleicher Art gebildet".⁴

An dieser Stelle tritt neben dem allgemeinen Bedeutungsgehalt der beiden Begriffe ihr realistischer und durchaus nicht transzendentalphilosophischer Charakter hervor.⁵ Im Gegensatz zu Kant, der die Begriffe Materie und Kraft als Bedingung der Erfahrung auf die möglichen Gegenstände der äusseren Erfahrung bezog, zieht Helmholtz diese Begriffe als "Abstractionen" von einer absolut gesetzten, d.h. unabhängig vom Erkennen angenommenen Wirklichkeit ab. Um mit Kant zu sprechen, abstrahieren Helmholtz' Begriffe nicht vom Gegebenen.

¹ Vgl. SCHIEMANN (1997), Abschnitt B.II.3.a, Teil α.i.

² In einer seiner letzten Veröffentlichungen wird Helmholtz den Ausdruck "Kenntniss" ausdrücklich vom bewussten Wissen abgrenzen: HELMHOLTZ (1894), S. 540, bzw. HELMHOLTZ (1885 ff.), S. 598; vgl. SCHIEMANN (1997), Abschnitt B.III.1., Anm. 87.

³ Diese Bemerkung ist vermutlich gegen die zur Zeit der Abfassung der Schrift noch wirksamen Einflüsse der romantischen Naturphilosophie gerichtet. Vgl. WISE (1981).

⁴ HELMHOLTZ (1847), S. 5.

⁵ Dies hat bereits HEYFELDER (1897) festgestellt: "Die Weltanschauung *Helmholtz'* ist derjenigen konform, die *Kant* als transzendentalen Realismus bezeichnet, und zu der er die seine als transzendentalen Idealismus in bewussten Gegensatz bringt!" (a.a.O., S. 55 - Hervorheb. im Text).

nen, wie sie müssten, wenn ihre Geltung allein auf reinem Denken beruhen sollte, sondern werden vom Gegebenen abstrahiert.¹ Zwar ist, was überhaupt zu erkennen ist, bei Helmholtz durch die Aussenwelt unhintergebar vorgegeben. Aber bei jeder begründenden Herleitung scheinen die erkenntniskonstitutiven Begriffe willkürlich gewählt. Warum betrachtet die Wissenschaft die Gegenstände der Aussenwelt ausgerechnet nach den von Helmholtz angegebenen "Abstractionen" und nicht nach weiteren oder gänzlich anderen? Dass es wohl verfehlt wäre anzunehmen, Helmholtz habe es der Freiheit des forschenden Geistes anheimstellen wollen, zu entscheiden, was abstrahiert werden soll und was nicht, zeigt die nächste Gruppe von Voraussetzungen, welche bestimmte Erfahrungen absolut setzen.

B) REICHWEITE UND ZIEL DER PHYSIK

Sie betreffen die Reichweite der physikalischen Methode sowie die Bestimmung des Ziels der physikalischen Forschung und lassen sich an der von Helmholtz in der Einleitung aufgeworfenen Frage entwickeln, ob die Naturerkenntnis dem Fassungsvermögen des menschlichen Geistes entspreche,²

"ob also die Natur vollständig begreiflich sein müsse, oder ob es Veränderungen in ihr gebe, die sich dem Gesetze einer nothwendigen Causalität entziehen, die also in das Gebiet einer Spontaneität, Freiheit, fallen [...]; jedenfalls ist es klar, dass die Wissenschaft, deren Zweck es ist, die Natur zu begreifen, von der Voraussetzung ihrer Begreiflichkeit ausgehen müsse, und dieser Voraussetzung gemäss schliessen und untersuchen, bis sie vielleicht durch unwiderlegliche Facta zur Anerkennung ihrer Schranken genöthigt sein sollte"³.

Im Gegensatz zur Behandlung der ersten Gruppe von Voraussetzungen wird hier *die Möglichkeit eines faktischen Hindernisses* in Erwägung gezogen, das für die empirische Erforschung und kausale Erklärung der Natur unüberwindlich sein könnte. Dabei wollte Helmholtz an dieser Stelle mit dem Begriff der Freiheit wohl kaum ein spezifisch menschliches Vermögen ansprechen. Er wird eher an real wirksame Prinzipien gedacht haben, die die belebte Natur gegenüber der unbelebten insgesamt auszeichnen und nicht wirkursächlichen, sondern teleologischen Zusammenhängen folgen.⁴ Noch bevor aber eine in der Natur vorhandene Spontani-

¹ KANT (1900 ff.), Bd. II (*De mundi sensibilis atque intelligibilis forma et principiis*), S. 394 (§ 6).

² Angesichts der Möglichkeit, dass die Mannigfaltigkeit der äusseren Natur das Fassungsvermögen des Geistes übersteigen könnte, stärkt Kant die transzendentalen Prinzipien der Einheit der Erkenntnis, vgl. KANT (1781), B 681 ff., KANT (1790), S. 410 ff. (§ 78), und dazu SCHIEMANN (1992).

³ HELMHOLTZ (1847), S. 4.

⁴ Diese Deutung legt sich nahe, weil Helmholtz den Freiheitsbegriff an anderer Stelle (HELMHOLTZ (1856 ff.), S. 454, vgl. SCHIEMANN (1997), Abschnitt B.II.3.a, Teil β.ii) ausdrücklich auch auf das Tierreich anwendet.

tät des Organischen den Bereich des kausal Erforschbaren empirisch von aussen zu begrenzen vermag, steht für Helmholtz schon fest, dass das Kausalitätsprinzip im Inneren dieses Bereiches nicht endlos auf Erfahrung angewandt werden könne. Über eine rein zeitlich gefasste Einteilung der Ursachen in veränderliche und unveränderliche kommt er zum Begriff der "letzten Ursache":

"Die nächsten Ursachen, welche wir den Naturerscheinungen unterlegen, können selbst unveränderlich sein oder veränderlich; im letzten Fall nöthigt uns derselbe Grundsatz [der Kausalität] nach anderen Ursachen wiederum dieser Veränderung zu suchen, und so fort, bis wir zuletzt zu letzten Ursachen gekommen sind".¹

Der *Kausalitätsbegriff* wird damit um eine zweite, für Helmholtz' Wissenschafts- und Naturauffassung kennzeichnende Bedeutung erweitert: Wurde in der ersten Bedeutung von "jede[r] Veränderung in der Natur" behauptet, dass sie "eine zureichende Ursache" habe,² werden nun (wiederum von - noch fundamentaleren? - Gesetzen unterschieden) "Ursachen" eingeführt, denen selbst keine Ursachen zugrunde liegen, weil ihnen die Eigenschaft zukommt, Veränderungen zu bewirken, ohne dabei selbst einer Veränderung unterworfen zu sein. Wegen ihrer Unveränderlichkeit könnten die "letzten Ursachen" auch schlicht Bedingungen heissen. Es sind diejenigen realen Bedingungen, auf die die Naturerscheinungen, sofern sie begreiflich sind, mit letzter Gewissheit zurückgeführt werden sollen. Mit ihnen ist ein Reduktionsprogramm bezeichnet, das nicht a priori, sondern nur vermittels der wissenschaftlichen Erfahrung einer Lösung näher gebracht werden kann. Letztursachen können nicht gesetzt werden; sie liegen "in der Natur" und sind von der Wissenschaft "aufzufinden".³ Indem Helmholtz ihre Bestimmung das "endliche Ziel"⁴ nennt, bringt er zudem zum Ausdruck, dass es sich seiner Ansicht nach um eine erreichbare Aufgabe handelt. Im Hinblick auf dieses Endziel und unter Berücksichtigung der Möglichkeit akausaler Grundzüge der Natur verändert sich der Charakter der methodologischen Voraussetzungen grundlegend. Sie werden einer *antimetaphysischen Leitvorstellung* untergeordnet, in der die Reichweite der kausalen Methode durch Erfahrung definitiv begrenzt ist.

Nachdem Helmholtz' Naturauffassung sowohl durch ihre Ontologie als auch durch ihre realistische Wirklichkeitsauffassung von Kants dynamischem Mechanismus unterschieden ist, findet die Differenz zwischen den beiden Ansätzen in den unterschiedlichen Kausalitätsvorstellungen eine weitere Zuspitzung. Für Kant kann Kausalität sowenig durch die Empirie ein-

1 HELMHOLTZ (1847), S. 4.

2 Ebenda.

3 Ebenda.

4 Ebenda.

geschränkt sein wie letzte Ursachen ohne Widerspruch denkbar sind.¹ Im Vergleich zu Helmholtz ist Kant zweifellos der konsequentere Mechanist. Für ihn ist die Natur ausnahmslos kausal verfasst, und es gibt kein Phänomen, das nicht auf mechanische Ursachen reduzierbar wäre.

C) DIE MECHANISCHE STRUKTUR DER NATUR

Die Voraussetzungen der zweiten Gruppe, die auch noch keine mechanistische Naturauffassung präjudizieren, sind mit denen der ersten Gruppe in einer Hinsicht verbunden: Weil Letztursachen "Wirkung hervorbringen", kann es sich bei ihnen nur um Kräfte handeln. Noch ist aber ihre Struktur nicht näher charakterisiert. Die Hinwendung zu einer mechanischen Kraftbestimmung bezeichnet nun genau diejenige Stelle der Einleitung, an der Helmholtz auf spezielle wissenschaftliche Erfahrung Bezug nimmt:

"Materien mit unveränderlichen Kräften (unverteilbaren Qualitäten) haben wir in der Wissenschaft (chemische) Elemente genannt. Denken wir uns aber das Weltall zerlegt in Elemente mit unveränderlichen Qualitäten, so sind die einzigen noch möglichen Aenderungen in einem solchen System räumliche d.h. Bewegungen, und [...] die Kräfte nur Bewegungskräfte [...]"

Also näher bestimmt: Die Naturerscheinungen sollen zurückgeführt werden auf Bewegungen von Materien mit unveränderlichen Bewegungskräften, welche nur von den räumlichen Verhältnissen abhängig sind."²

Im Rekurs auf das Vokabular der Forschungspraxis seiner Zeit gewinnt Helmholtz die ersten Festlegungen für seine, bisher nur in vagen Umrissen bestimmte, mechanistische Programmatik. Auf dem Hintergrund des forschungserprobten Elementbegriffes hat die anschließende Erwägung ("Denken wir uns aber ...") weniger den Charakter eines Gedankenexperimentes als vielmehr den Anspruch, eine schon durch die Ergebnisse der Forschung nahegelegte elementaristische Naturauffassung konsequent zu Ende zu denken. Erst an dieser Stelle ergibt sich als notwendige Folgerung die *Bestimmung der Kräfte* als "Bewegungskräfte". Nicht mehr jede Kraftwirkung, sondern nur noch die ortsverändernde der Mechanik ist von nun an als elementare Wechselwirkung zugelassen.

Bei der Verengung des Kraftbegriffes findet allerdings eine kaum merkliche Verschiebung in der *Bedeutung des Ausdruckes "Element"* statt. In der damaligen Chemie bezeichnete er gemeinhin den Sachverhalt einer endlichen Verschiedenheit der Qualitäten, insofern sie chemischen Substanzen entsprechen. Mit Substanzen bzw. Elementen waren hierbei diejenigen

¹ KANT (1781), B 232 ff. (2. Analogie der Erfahrung) und B 472 (3. Antinomie).

² HELMHOLTZ (1847), S. 5.

Stoffe der Chemie gemeint, die einer einzigen Sorte von hypothetisch angenommenen Atomen zugeordnet wurden. Weder die Atomhypothese noch der Elementbegriff implizierte notwendig ontologische Annahmen über die Struktur der Materie.¹ Über diesen beschränkten Sinngehalt geht Helmholtz' Begriff erheblich hinaus. Elemente sind für ihn nicht nur durch ihre chemischen Qualitäten und durch die Verhältnisse, in denen sie sich untereinander verbinden, bestimmt, sondern sie werden als physikalische Objekte und letzte Bestandteile einer zerlegbaren Materie verstanden. Auch wenn Helmholtz an dieser Stelle den Atombegriff nicht verwendet, so ist doch klar, dass die Materie nur diskret in bewegliche Elemente zerlegt werden kann. Und da alle Veränderung in die Kräfte gelegt ist, können sich die körperlichen Partikel, die als Elemente übrig bleiben, auch nicht in ihrer Gestalt unterscheiden. Elemente sind damit zu Atomen, zum Unteilbaren der Materie, geworden.²

Die sich an den Elementbegriff anschliessende Vorstellung einer diskreten Zerlegung der Materie ist nur eine von zwei Vorgaben für die nähere Bestimmung der Kräfte, die Helmholtz im Fortgang der Einleitung vornimmt. Die andere besteht in der kommentarlos-selbstverständlichen *Übernahme des Formalismus der physikalischen Mechanik*, deren Prinzipien und Gesetze für Helmholtz den Stellenwert von Resultaten der wissenschaftlichen Erfahrung haben.³ Helmholtz geht von der Annahme aus, dass sich die chemischen Elemente wie mechanisch bewegte Punkte behandeln liessen. Die zwischen ihnen wirksamen Kräfte würden nur entlang der Verbindungslinie wirken und in ihrer Stärke nur von der Entfernung abhängig

¹ In den entsprechenden empirischen Untersuchungen der Chemie ging es nicht um die Feststellung von physikalischen Kraftwirkungen zwischen den Atomen, sondern vor allem um die Anwendung eines Systems von relativen Atomgewichten und um den Nachweis von äquivalenten Verbindungsverhältnissen chemischer Substanzen (vgl. STRÖKER (1967), S. 156 ff.). Die Atomhypothese erwies sich in diesen streng experimentell orientierten Forschungen als ein nützliches Hilfsmittel, das nur in Bezug auf die speziellen Versuchsanordnungen eine numerische Einteilung der Relationen zwischen Substanzen unterstellte, ohne dabei auf Aussagen über die Realität oder Existenz von Atomen angewiesen zu sein (vgl. NYE (1984), S. XV, und WHITT (1990)). Der von den Chemikern gegen Ende des 18. und zu Beginn des 19. Jahrhunderts häufig thematisierte Unterschied zwischen der forschungsnützlichen Hypothese chemischer Elemente und der physikalischen Realität von Atomen findet sich repräsentativ in A. L. Lavoisiers Vorwort zu den *Elementen der Chemie* ausgesprochen: Man könne sich des Elementbegriffes als eines Prinzips der Zerlegung bedienen, ohne etwas über Atome zu wissen (LAVOISIER (1790), S. XXIV). Zerlegung in diesem Sinn bedeutet nicht eine Aufteilung in diskrete Bestandteile, sondern eine Isolierung der reinen Substanzen.

² Vgl. hierzu SCHIEMANN (1997), Abschnitt B.II.1.a., Anm. 26.

³ In einer posthum veröffentlichten und nicht datierten Schrift zur Geschichte der Mechanik nennt Helmholtz auf seine Art die zwei Annahmen für die nähere Bestimmung der Kräfte: Mit dem auf Galilei und Newton zurückgehenden physikalischen Begriff der Kraft und dem auf Boyle, Lavoisier, Priestley und Cavendish zurückgehenden Begriff der chemischen Elemente seien "die principiellen Fragen im Wesentlichen entschieden." (KOENIGSBERGER (1902 f.), Bd. 2., S. 40).

sein. Eben diese sogenannten Zentralkräfte sind zugleich auch die einzigen von Helmholtz zu dieser Zeit anerkannten energieerhaltenden Kräfte.¹

Materielle Punkte und die ihnen zugeordneten Bewegungskräfte konstituieren bei Helmholtz einen *dualen Mechanismus* wie er paradigmatisch von Newton und Boscovich vertreten wurde. Auch Newton nahm für die Wechselwirkungen zwischen den von ihm postulierten submikroskopischen Partikel anziehende und abstossende Kräfte an. Boscovich vervollständigte diesen Ansatz, indem er sein universelles Kraftgesetz, das Anziehung und Abstossung zwischen je zwei Punkten als Funktion ihrer Entfernungen definierte, homogen in alle Raumrichtungen wirken liess.²

Im Gegensatz zu Boscovich unterlässt es Helmholtz jedoch, Angaben über die Stärke ("Intensität") dieser Kräfte zu machen. Damit bleibt offen, ob zwischen den materiellen Punkten ein universelles Kraftgesetz wirkt oder ob - entsprechend der verschiedenen chemischen Elemente - verschiedene elementare Kräfte vorhanden sind. Der einzige Hinweis, den Helmholtz gibt, liegt in der durchgängigen Verwendung des Plurals für den Begriff der Kraft. In jedem Fall ist die Aufgabe der Naturwissenschaft auf die Stärkebestimmung(en) beschränkt:

"Es bestimmt sich also endlich die Aufgabe der physikalischen Naturwissenschaften dahin, die Naturerscheinungen zurückzuführen auf unveränderliche, anziehende und abstossende Kräfte, deren Intensität von der Entfernung abhängt. [...]
[...] wenn einmal die Zurückleitung der Erscheinungen auf einfache Kräfte vollendet ist, und zugleich nachgewiesen werden kann, dass die gegebene die einzig mögliche Zurückleitung sei, welche die Erscheinungen zulassen [... , dann] wäre dieselbe als die nothwendige Begriffsform der Naturauffassung erwiesen, es würde derselben alsdann also auch objective Wahrheit zuzuschreiben sein."³

D) DER WAHRHEITSANSPRUCH DES MECHANISMUS

Es ist die inhaltliche Bestimmung seiner Naturauffassung, ihr mechanistischer Charakter, den Helmholtz durch Bezug auf wissenschaftliche Erfahrung zu begründen versucht. Dabei tritt

¹ Helmholtz räumt 1881 ein, dass auch eine andere Form von Kräften energieerhaltend sein kann. Zentralkräfte sind von Helmholtz später einschränkender definiert worden als noch 1847. In den in seinem Todesjahr gehaltenen *Vorlesungen über die Dynamik discreter Massenpunkte* werden Zentralkräfte nur durch ihre Richtung (entlang der Verbindungslinie zwischen zwei Punkten) und nicht durch die entfernungsabhängige Intensität bestimmt (HELMHOLTZ (1897 ff.), Bd. I.2, S. 143). Bilden diese die inneren Kräfte eines Punktsystems, folgt aus ihnen nicht mehr Energie-, sondern Drehimpulserhaltung (a.a.O., S. 157 ff.). Vgl. hierzu SCHIEMANN Abschnitt A.I.2.b.

² Vgl. SCHIEMANN (1997), Abschnitt A.III.2.

³ HELMHOLTZ (1847), S. 6 f.

deutlich der *Wahrheitsanspruch* hervor, den er für seine Naturauffassung erhebt. Im vorgegebenen Rahmen einer kausalen Naturerklärung soll es das "endliche Ziel" der theoretischen Physik sein, Zentralkräfte bestimmter Stärke als "letzte Ursachen" "in der Natur aufzufinden"¹ und die Reduktion der Naturerscheinungen auf diese Kräfte zu "vollenden"². Diese Zurückführung soll zudem "die einzig mögliche" sein, d.h. sie soll nicht als eine Erklärung neben anderen Erklärungen stehen, sondern absolute Geltung haben. Insofern die diskrete Materiestruktur nur hypothetisch angenommen ist, erweist sich der Erkenntnisfortschritt gerade darin, Hypothesen in wahre Aussagen zu verwandeln. Mit dieser auf ein System der Naturerkenntnis abzielenden Fortschrittskonzeption fällt Helmholtz - von einem heutigen Standpunkt aus betrachtet - hinter Kant zurück. Denn Kant, der die vollständige Bestimmung der Struktur der Grundkräfte vor aller Erfahrung für möglich hielt, hat das Ziel einer systematischen Gesamterkenntnis der Natur als "regulative Idee" verstanden, dem sich die Forschung nur approximativ nähern könne.³

Für Helmholtz aber ist die Forschung erst dann im Besitz der Wahrheit über die letzten Ursachen der Natur, wenn sie den Nachweis erbringt, dass es allein diese Ursachen sind, die von den "Erscheinungen zu[ge]lassen" werden. Damit ist nicht nur die Lösung der theoretischen Aufgabe, die Phänomene auf Zentralkräfte zurückzuführen, an die Empirie zurückgebunden, wie dies auch in der allgemeinen Bestimmung der theoretischen Physik ("Ursachen der Vorgänge aus ihren sichtbaren Wirkungen [...] finden") angelegt ist. Die Aufgabenstellung selbst unterliegt der Überprüfung durch Erfahrung. Helmholtz verfügt noch über keine "nothwendige Begriffsform" (bewegte Materie und Zentralkräfte), deren Anwendbarkeit auf Erfahrung ("objective Wahrheit") lediglich zu bestätigen wäre. Vielmehr muss sich die Notwendigkeit dieser Begriffsform erst noch empirisch "erweisen". Das trifft auch für das Kausalgesetz zu, weshalb seine Gültigkeit nicht einfach feststeht, sondern durch den weiteren Fortschritt der Naturerkenntnis beschränkt werden könnte.

Obwohl Helmholtz sich der Wahrheit seiner Naturauffassung also noch keinesfalls sicher sein kann, zweifelt er dennoch nicht daran, dass sich absolute Geltung in endlicher Zeit werde erreichen lassen. Diese *ungebrochene Zuversicht* lässt sich nicht aus den in der Einleitung ansatzweise entwickelten erfahrungsunabhängigen Voraussetzungen erklären, denn aus ihnen ist keine bestimmte Programmatik ableitbar. Vielmehr scheint sich Helmholtz durch den erreichten Stand der Forschung bestätigt zu sehen. Tatsächlich konnte er sich auf innerwissenschaftliche Entwicklungen stützen, die einen Nährboden für mechanistische Naturbetrachtun-

¹ HELMHOLTZ (1847), S. 4.

² HELMHOLTZ (1847), S. 7.

³ KANT (1781), B 697 ff.

gen bildeten und um so mehr ins Gewicht fielen, als das kulturelle Ansehen der experimentellen Naturforschung um die Jahrhundertmitte im Verhältnis zur ersten Hälfte des Jahrhunderts erheblich gestiegen war.¹ Hierbei ist vor allem an den Rückgang des immer noch wirkamen Einflusses der romantischen und durchweg antimechanistischen Naturphilosophie,² an die (für den Physiologen Helmholtz so bedeutsame) Diskreditierung der materiellen Theorie der Wärme, an den beginnenden Siegeszug der Undulationstheorie des Lichtes und an die erfolgreiche Anwendung der Atomhypothese zu denken.³ Begünstigten all diese Faktoren die Wahrheitszuversicht, so zeugt der euphorische Ton der Einleitung vom Bewusstsein, selbst einen entscheidenden Beitrag auf dem Weg zur vollständigen Naturerklärung geleistet zu haben. Dieser soll im Zusammenhang zwischen der Einleitung und dem nachfolgend dargestellten Energieerhaltungssatz bestehen. Helmholtz glaubt, wie ich im nächsten Abschnitt zeigen werde, den Erhaltungssatz, dessen eminente Relevanz er schon bei der Abfassung der Schrift geahnt haben wird,⁴ aus der mechanistischen Ontologie abgeleitet zu haben, und er hofft, durch den Nachweis seiner Anwendbarkeit auf die verschiedensten physikalischen Phänomene eine rückwirkende Bestätigung des Mechanismus zu erhalten.

2. DIE ENERGETISCHE HEURISTIK DES MECHANISMUS

Nachdem sich aus der Einleitung zu *Ueber die Erhaltung der Kraft* erste Hinweise dafür ergeben haben, dass Helmholtz den Wahrheitsanspruch seines Mechanismus im engen Bezug auf wissenschaftliche Erfahrung begründet, sind die weiteren Ausführungen zum Energieerhaltungssatz geeignet, das Verhältnis zwischen mechanistischer Naturauffassung und experimenteller Naturforschung einer genaueren Bestimmung zu unterziehen.⁵

1 Literaturangaben vgl. SCHIEMANN (1997), Abschnitt B.II.1.b., Anm. 67.

2 Vgl. ENGELHARDT (1979), S. 161 ff.

3 Die materielle Theorie der Wärme und die Undulationstheorie werden von Helmholtz bereits in HELMHOLTZ (1846), S. 699 f., als Indizien für eine mechanistische Naturauffassung gewertet. Zur Atomhypothese nimmt Helmholtz in seinen Arbeiten vor dem Energieerhaltungssatz nicht (und später auch nur sehr zurückhaltend) Stellung.

4 Dafür spricht der Umstand, dass der Erhaltungssatz dem damaligen Entwicklungsstand der Forschung so sehr entsprach, dass seine Formulierung gleichsam in der Luft gelegen hat (vgl. KUHN (1959) und HELMHOLTZ (1883), S. 403 f.). Vom Bewusstsein, einen bedeutenden Satz gefunden zu haben, sind auch Helmholtz' Briefe an seinen Verleger bestimmt (vgl. KOENIGSBERGER (1902 f.), Bd. 1, S. 77 f.).

5 Helmholtz formuliert die relevanten Beziehungen der Energieerhaltung so deutlich, dass die von ihm dafür benutzten Ausdrücke ("lebendige Kraft", "Spannkraft" etc.) an den entsprechenden Stellen weitgehend durch Energiebegriffe ersetzt werden können. Dass trotz dieser Zuordnungsmöglichkeiten eine Vagheit des Kraftbegriffes bestehen bleibt und diese Vagheit zu einem konstitutiven Beitrag für die begriffliche Fort-

Die Einleitung legt die materietheoretischen Grundlagen für eine Erklärung des Energieerhaltungssatzes in der Tradition von Newtons Mechanik bzw. Mechanismus (a). Die Problematik dieser Erklärung besteht darin, dass mit ihr ein spezifisch mechanischer Energiebegriff verbunden ist, der für die energetischen Betrachtungen, wie sie Helmholtz in seiner Schrift vornimmt, zu eng ist. Helmholtz nennt bereits im zweiten Satz seiner Schrift nun noch eine andere Herleitungsmöglichkeit, den Satz von der Unmöglichkeit des Perpetuum mobile.¹ Dieser impliziert einen weiter gefassten Energiebegriff und führt auf einen Erhaltungssatz, der nur noch formal mit der Mechanik, und zwar mit ihrer auf Lagrange zurückgehenden Formulierung, verbunden ist.² Soll sich die Begründung der Geltung dieses Begriffes nicht nur auf eine mathematische Strukturanalogie stützen, muss man über den formalen Zusammenhang hinausgehen und auf die experimentelle Praxis der Forschung Bezug nehmen. Hierauf führe ich zurück, dass Helmholtz die Geltung zum einen als Verallgemeinerung bisheriger Erfahrungen bei energetischen Umsetzungen rechtfertigt und zum anderen als geeignetes Mass dieser Umsetzungen (b). Seine Ausführungen in der Schrift und in den sich anschliessenden Reden zum Energieerhaltungssatz aus den 50er und 60er Jahren zeigen, dass er in diesen Zusammenhängen wieder von einem einseitigen mechanistischen Verständnis der Energie ausgeht und sie als Heuristik seines Mechanismus funktionalisiert (c).

A) NEWTONSCHE ERKLÄRUNG DES ERHALTUNGSSATZES

Der in Newtonscher Tradition stehenden *Erklärung des Energieerhaltungssatzes* bedient sich Helmholtz, "um [...] unser Gesetz [der Energieerhaltung] ganz allgemein durchzuführen"³. Er geht von einer "beliebige[n] Anzahl materieller Punkte" aus, die sich in einem cartesischen Koordinatenraum befinden und zwischen denen die in der Einleitung definierten Zentralkräfte wirken. Auf jeden einzelnen Punkt dieses Systems wendet er die in einer Gleichung zusammengefassten beiden ersten Newtonschen Axiome an: Jede Kraftkomponente ist gleich dem Produkt aus Massekoeffizient und Geschwindigkeitsänderung in Richtung der Kraftwirkung.⁴

entwicklung der Physik geworden ist, hat ausführlich ELKANA (1974) dargelegt. Der Begriff der Energie geht auf W.J. Rankine zurück, auf den sich auch Helmholtz bezieht, wenn er später diesen Begriff zu verwenden beginnt. Bereits in HELMHOLTZ (1856), S. 407, betont er die Gleichheit seiner Grössen "lebendige Kraft" und "Quantität der Spannkraft" mit den von Rankine 1853 eingeführten Begriffen der aktuellen und potentiellen Energie.

1 HELMHOLTZ (1847), S. 3.

2 Dass Helmholtz zwei äquivalente Formulierungen der Mechanik, die Formulierungen von Lagrange und von Newton, in seiner Schrift verbunden hat, hat erstmals Elkana gezeigt: ELKANA (1974), S. 17 ff., 50 und 129 f.

3 HELMHOLTZ (1847), S. 13.

4 Wenn die drei Komponenten der Kraft $F X_i$ (d.h. $F = (X_1, X_2, X_3)$) und die der Geschwindigkeit $v v_i$ (d.h.

Das dritte Newtonsche Axiom (Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung) ist in der Struktur der Zentralkräfte berücksichtigt. Aus diesen Annahmen ergibt sich dann zwingend der Satz von der Erhaltung der Gesamtenergie für das Punktsystem,¹ wobei die gesamte Energie in die ausschliesslich geschwindigkeits- und massenabhängige (kinetische) Energie der materiellen Punkte und in denjenigen (potentiellen) Anteil, der unabhängig von der Bewegung aus der wechselseitigen Anziehung bzw. Abstossung der Punkte resultiert, aufgeteilt ist. Mechanisch besagt die Energieerhaltung für ein Punktsystem mit zentralwirkenden Kräften, dass die Veränderung des kinetischen Anteils der Veränderung des potentiellen entgegengesetzt gleich ist.²

Es handelt sich um eine streng *logische Deduktion*, in der aus mechanischen Gesetzen, d.h. den drei Newtonschen Axiomen, und den Randbedingungen, die das mechanische System charakterisieren, der Erhaltungssatz folgt.³ Die Energie eines mechanischen Systems ist mithin keine eigenständige, sondern eine abgeleitete Grösse. Da eine solche Betrachtung von der inneren Struktur eines Systems, das durch die raumzeitlichen Koordinaten seiner Teile und die zugehörigen Kräfte gegeben ist, ausgeht, schliesst sie sich an das von Newton entwickelte Konzept einer Mechanik an, das auf die Kenntnis der Kraftfunktionen angewiesen ist. Helmholtz beschränkt diese Erklärung nur auf die seiner Materietheorie entsprechenden mechanischen Systeme. Unter den naturtheoretischen Voraussetzungen der Einleitung ist damit einer Begründung der Energieerhaltung freilich auch schon Genüge getan. Wo die Natur ausnahmslos durch mechanisch bewegte und wechselwirkende Elemente bestimmt ist, gilt der Energieerhaltungssatz mit derselben Ausnahmslosigkeit.

Aus der Dualität von Kraft und Materie resultierend, besteht die spezifisch *mechanische Auffassung der Energie* in der strikten Zweiteilung der Gesamtenergie sowie in der Auszeichnung des kinetischen Anteils vor dem potentiellen.⁴ Dem Grundzustand der trägen Materie, ihrer

$v = (v_1, v_2, v_3)$ sind, dann heisst das erste Newtonsche Axiom: Aus $X_i = 0$ folgt $m_j \cdot dv_j/dt = 0$. Das zweite Axiom entspricht der Gleichung $X_i = m_j \cdot dv_j/dt$, die das erste Axiom impliziert. Von dieser Gleichung geht Helmholtz in HELMHOLTZ (1847), S. 13, aus.

1 Vgl. SCHIEMANN (1997), Abschnitt A.I.2.b.

2 HELMHOLTZ (1847), S. 14, Gleichung 4 für eine beliebige Zahl von materiellen Punkten mit dem für alle identischen Massekoeffizienten m_a , den Tangentialgeschwindigkeiten Q_a und q_a an zwei verschiedenen Orten r_{ab} und R_{ab} sowie dem Betrag der Kraft $|F| = \varphi$:

$$-\sum (r_{ab} \int^{R_{ab}} \varphi_{ab} dr_{ab}) = (\sum m_a \cdot Q_a^2 - \sum m_a \cdot q_a^2) / 2.$$

3 In der wissenschaftstheoretischen Terminologie der Gegenwart handelt es sich um eine sogenannte Gesetzeserklärung (d.h. die Erklärung eines Gesetzes aus einem Gesetz), die genau dem von Hempel und Oppenheim entwickelten D-N-Schema entspricht. Vgl. dazu SCHEIBE (1970), S. 270.

4 Vgl. hierzu auch PLANCK (1887), S. 136, und FRANK (1932), S. 328 f.

gleichförmigen Bewegung, wird kinetische Energie, die von der Lage unabhängig ist, zugeschrieben, und nur insofern Kräfte zu diesem Zustand hinzukommen, kann potentielle (lageabhängige) Energie auftreten.

B) LAGRANGESCHE FASSUNG DES ENERGIEBEGRIFFES

Die mechanistische Erklärung des Energieerhaltungssatzes beweist, warum er in mechanischen Systemen gilt. Nichtmechanische Energie kann jedoch wesentlich von mechanischer unterschieden werden: Jene muss weder an die Bewegung von Materie gebunden noch in zwei Teile aufgeteilt sein. Helmholtz' Leistung besteht nun darin, dem Erhaltungssatz eine formale Darstellung gegeben zu haben, die einen *eigenständigen Energiebegriff* impliziert, der nur noch in mathematischer Hinsicht an der Mechanik orientiert ist. Dieser Ansatz stützt sich insofern auf die Lagrange-Formulierung der Mechanik, als er an die Stelle des Kraftbegriffes denjenigen des Potentials setzt.¹ Zusammen mit der kinetischen Energie, die jedoch nicht mehr von der Lage der betreffenden Objekte unabhängig zu sein braucht, stellt der Potentialbegriff in der Lagrange-Formulierung den Ausgangspunkt aller Berechnungen dar. Weil Potentiale auch für nichtmechanische Phänomene, bei denen die Kraftfunktionen (noch) unbekannt sind, ermittelt werden können, kommt ihnen bei der Verallgemeinerung mechanischer Methoden eine Schlüsselfunktion zu.

Bei Helmholtz deutet sich diese Funktion bereits an: Zu Anfang seiner Schrift schenkt er der Darstellung der potentiellen Energie grosse Aufmerksamkeit und führt zu ihrer gesonderten Bezeichnung den Ausdruck "Spannkraft" ein.² Indem er die Grösse "Spannkraft" mit einem negativen Vorzeichen versieht, kann er den Erhaltungssatz in Analogie zur Massenerhaltung als Summationsprinzip aufstellen.³ Während die "lebendige Kraft" bzw. die kinetische Energie allen Formen bewegter Materie vorbehalten bleibt, können in der Spannkraft alle restlichen Energien zusammengefasst werden.⁴ Damit erhält die "Spannkraft" bei der Übertragung

¹ Vgl. SCHIEMANN (1997), Abschnitt A.I.2.b. Helmholtz erwähnt diesen Formalismus in seiner Schrift nicht, gibt aber an, sich in der Zeit zwischen 1838 und 1842 mit der analytischen Mechanik beschäftigt zu haben (HELMHOLTZ (1891), S. 10).

² HELMHOLTZ (1847), S. 11 f.

³ PLANCK (1887), S. 36 f.

⁴ In einer Formulierung Max Plancks wird dieses Verfahren besonders deutlich: "... die Kraft (gemeint ist die Energie - G.S.) ... erscheint ... in zwei Hauptformen: als lebendige Kraft oder als Spannkraft, beide können uns aber noch in der verschiedensten Weise entgegentreten: die lebendige Kraft als sichtbare Bewegung, als Licht, als Wärme, die Spannkraft als Hebung eines Gewichts, als elastische, als elektrische Spannung, als chemische Differenz u.s.w." (PLANCK (1887), S. 37). Demnach steht die lebendige Kraft für die Energie der sichtbaren und der unsichtbaren Bewegung (Licht konnte Helmholtz zufolge mit grosser Wahrscheinlichkeit mit Wärmestrahlung identifiziert werden, und Wärme war für ihn Ausdruck der

der in Newtonscher Tradition vorgenommenen Zweiteilung der Energie auf nichtmechanische Energieformen einen zentralen Stellenwert. In der ersten Formulierung des Erhaltungssatzes ist deshalb schon nicht mehr von materiellen Punkten die Rede:

"Es ist also stets die Summe der vorhandenen lebendigen und Spannkräfte constant. In dieser allgemeinsten Form können wir unser Gesetz als das Princip von der Erhaltung der Kraft bezeichnen."¹

Insgesamt lässt sich sagen, dass die mathematisch allgemeingültige Formulierung der Energieerhaltung durch eine strukturidentische Übertragung von ursprünglich mechanischen Gleichungen auf nichtmechanische Gesetzmässigkeiten zustande kommt. Nachdem der mechanische Erhaltungssatz aus den Bestimmungen eines Systems von materiellen Punkten abgeleitet und damit erklärt wurde, wird das allgemeine Prinzip durch formale Analogiebildung, die man nicht mehr als Erklärung bezeichnen kann, gewonnen. Auf dieser Grundlage erfolgt dann eine Erklärung anderer Art: Sie hat nicht mehr eine Gesetzesaussage, sondern die energieerhaltenden Einzelphänomene zum Gegenstand. Das Gesetz bildet jetzt den *unhinterfragten Obersatz* für eine wiederum streng logische Deduktion, mit der unter gegebenen Randbedingungen singuläre Vorgänge abgeleitet bzw. vorausgesagt werden können.² Da es in einer experimentell ausgerichteten Forschung gerade auf derartige Prognosen ankommt, ist diese Erklärungsform der Forschungspraxis angemessener als die naturtheoretisch interessierte Ableitung des mechanischen Energiesatzes.

Der allgemeine, nicht auf mechanische Arbeit beschränkte Energiebegriff wird von Helmholtz nun unterschiedlich begründet: Er versteht ihn einerseits als induktives Ergebnis wissenschaftlicher Erfahrung (i) und andererseits als eine reine Verhältnisbestimmung, die der wissenschaftlichen Erfahrung (metaphysisch) vorausgesetzt sein könnte (ii). Beide Verständnisweisen finden sich bereits in der Schrift von 1847, treten aber deutlicher erst in den später veröffentlichten Reden hervor.

(i) Die *induktive Begründung des Energieerhaltungssatzes* nimmt Bezug auf das Postulat der Unmöglichkeit eines Perpetuum mobile, dessen Äquivalenz mit dem Erhaltungssatz von

Elementarbewegung) und die Spannkraft für alle übrigen Energieformen ("u.s.w.").

¹ HELMHOLTZ (1847), S. 14 (Hervorheb. im Text).

² So leitet Helmholtz das Lenzsche bzw. Joulesche Gesetz $Q = I^2 \cdot R \cdot t$ für die Wärmeentwicklung (Q) in einem Leiter (mit Stromfluss I in einer Zeit t und dem Widerstand R) aus energetischen Betrachtungen ab (HELMHOLTZ (1847), S. 36 f. Vgl. ELKANA (1974), S. 127, und PLANCK (1887), S. 42).

¹ Helmholtz nennt "Wärme, Elektrizität, Magnetismus, Licht, chemische Verwandtschaftskräfte" (HELMHOLTZ (1854), S. 59).

Helmholtz zu Recht behauptet wird. In späteren Reden berichtet er von den Versuchen, die vor allem im 18., aber auch noch zu Beginn des 19. Jahrhunderts unternommen wurden, ein Perpetuum mobile zu konstruieren und in denen man sich umfassend mit nichtmechanischen Energieformen sowie ihrer Umsetzung in mechanische beschäftigt habe. Keine der bekannten Energieformen der unbelebten Natur sei bei der Suche nach einem Perpetuum mobile ausgespart worden.¹ Das Postulat von der Unmöglichkeit des Perpetuum mobile versteht er deshalb als Verallgemeinerung der vergangenen Erfahrung, keine ihm widersprechenden Tatsachen gefunden zu haben.² In diesem Sinn ist der Unmöglichkeitssatz ein durch Erfahrung zwar nicht beweisbares, aber doch gebotenes Axiom, das sich allgemein auf alle denkbaren Energieformen bezieht.

Ein Charakteristikum eines derart auf Erfahrung bezogenen Energiebegriffes besteht darin, dass diejenigen Prozesse erkennbar bleiben müssen, die nicht energieerhaltend sind. Während die Relevanz dieser Möglichkeit im Verlaufe von Helmholtz' Forschungen mehr und mehr abnimmt, ist heute die Annahme von Einschränkungen und partiellen Verletzungen des Energieerhaltungssatzes für die grundlegenden Theorien der Physik paradigmatisch geworden.³

(ii) Einen Ansatz für einen *relational verstandenen Energiebegriff* stellt die von Helmholtz als allgemeine Masseinheit für Energieumwandlungen in den Mittelpunkt gerückte mechanische Arbeit dar.⁴ Mit Bezug auf die unmittelbar messbare und insbesondere für technische Verwendungen⁵ wichtige Arbeitsgröße gibt Helmholtz dem Energieerhaltungssatz bereits 1847 die schon erwähnte Fassung: "dass es nicht möglich sein könne, [...] in das Unbegrenzte Arbeitskraft zu gewinnen"⁶.

Arbeit wird von oder an Systemen verrichtet, über deren innere Struktur gar nichts bekannt sein muss, um einen physikalisch zunehmenden oder abnehmenden Arbeitswert zu messen. Entscheidend ist vielmehr die Definition der (adiabatischen) Systemgrenzen, an denen die

² Vgl. SCHIEMANN (1997), Abschnitt B.II.1.b., Anm. 106.

³ In der Relativitätstheorie hat es keinen Sinn mehr, von der Energie als isolierter Erhaltungsgröße zu sprechen. In der Quantenmechanik gilt die Energieerhaltung im Rahmen der Unschärferelation je nach Interpretation entweder nicht mehr ausnahmslos oder nur noch mit statistischen Schwankungen ("Tunneleffekt" und "virtuelle Zustände").

⁴ Zum Begriff der Arbeit bei Helmholtz vgl. auch SCHIEMANN (1997), Abschnitt B.II.3.b, Teil γ .iv.

⁵ Helmholtz weist ausdrücklich darauf hin, dass Arbeit "das allgemeine von den Technikern angewendete Maass" sei (HELMHOLTZ (1862/3), S. 196, und entsprechend HELMHOLTZ (1854), S. 58 und 54).

⁶ HELMHOLTZ (1847), S. 3.

Energietransformationen stattfinden, und die Festlegung einer einheitlichen physikalischen Grösse, deren Wahl beliebig ist, solange sie nicht vom Verlauf der Zustandsänderungen abhängig ist. In dieser phänomenologischen, für die Zwecke der Wärmelehre ausreichenden Bestimmung ist allerdings mit der Umwandelbarkeit einer im System befindlichen Energie in eine äussere Arbeitsleistung der Erhaltungssatz selbst schon vorausgesetzt.¹

C) MECHANISTISCHES VERSTÄNDNIS DER ENERGIEERHALTUNG

Für Helmholtz freilich scheint die Wahl der Arbeitsgrösse als Masseinheit nicht willkürlich gewesen zu sein. In seiner Schrift von 1847 definiert er Arbeit durch eine unmittelbare Gleichsetzung mit kinetischer Energie.² Die Äquivalenz zwischen Arbeit und anderen Energieformen fasst er nicht allein als mathematisches Verhältnis physikalischer Grössen auf, sondern auch als *Ausdruck eines gemeinsamen Wesens aller Energieformen*, von denen die mechanische Arbeit deshalb ausgezeichnet wird, weil einzig bei ihr sichtbar ist, was bei allen anderen im Verborgenen wirkt: Trägheits- und kraftbewegte Materie.³ Paradigmatisch für die ontologisch verstandenen Gleichsetzungen, in denen augenscheinlich die auf die Newtonsche Mechanik zurückgehende Auffassung der Energie wieder durchschlägt, ist das wechselseitige Umsetzungsverhältnis von Wärme und mechanischer Arbeit. Aus ihm glaubt Helmholtz die mechanische Natur der Wärme geradezu ableiten zu können.⁴ Im mechanistischen Reduktionsprogramm erhält die Äquivalenz zwischen Arbeit und anderen Energieformen dementsprechend einen zentralen Stellenwert.

Gegenüber der mechanischen Erklärung des Energieerhaltungssatzes hat sich damit die Blickrichtung umgekehrt. Statt von einer mechanischen Materietheorie auf die bereichsweise

¹ Die Auffassung der Energie als einer Grösse, die nur als konstanter Wert für einen gegebenen Systemzustand definiert ist, wird von Max Planck konsequent ausgeführt (PLANCK (1887), S. 92 ff., insb. S. 99 und 146).

² HELMHOLTZ (1847), S. 8 f. Mit dieser Definition wird Arbeit auch mit Wärme identifiziert (a.a.O., S. 25). Die Umwandlung nichtmechanischer Energie in Arbeit wird zwar diskutiert (z.B. a.a.O., S. 21 und 32), ist aber noch nicht zentraler Bezugspunkt. In den frühen physiologischen Schriften spielt der Arbeitsbegriff zur Begründung des mechanischen Charakters der Wärme noch keine Rolle. Vgl. z.B. HELMHOLTZ (1846), S. 699.

³ "Wenn alle elementaren Kräfte Bewegungskräfte, alle also gleicher Natur sind, so müssen sie alle nach dem gleichen Maasse, nämlich dem Maasse der mechanischen Kräfte, zu messen sein. Und dass dies der Fall sei, ist in der That schon als erwiesen zu betrachten" (HELMHOLTZ (1869), S. 379 - Hervorheb. im Text).

⁴ Zur Illustration dient dabei die Erklärung der Reibungswärme: Wenn die Energie eines Systems mit Reibung, z.B. eines drehbar gelagerten Rades, erhalten bleibt und nur aus Bewegung besteht, dann muss die durch Reibung verursachte Abnahme der sichtbaren (Dreh-) Bewegung der Zunahme einer unsichtbaren (Wärme-) Bewegung äquivalent sein (z. B. HELMHOLTZ (1862/3), S. 214 ff.).

Gültigkeit der Energieerhaltung zu schliessen, bildet der Erhaltungssatz jetzt den Ausgangspunkt für eine Reduktion auf Mechanik. Aus der fehlerhaften Verabsolutierung der Zentralkräfte, die Helmholtz bis weit in die 70er Jahre hinein für die einzigen energieerhaltenden Kräfte hält, wird eine *energetische Heuristik* für den Mechanismus. Bereits in seiner Schrift von 1847 spricht er allgemein von der "heuristische[n] Wichtigkeit" des Energieerhaltungsgesetzes¹ und erklärt, dass es "dem Experiment einen Leitfaden an die Hand" geben könne.²

3. SCHLUSS

Auf die Frage, woher Helmholtz die Zuversicht für die Durchführung seines mechanistischen Reduktionsprogramms nimmt, wenn er es nicht metaphysisch begründet, kann jetzt, zumindest in Bezug auf die innerwissenschaftlichen Zusammenhänge, bestimmter geantwortet werden. Er sieht die Ontologie seines Mechanismus inhaltlich nicht nur durch den Elementbegriff der Chemie und die Methodik der physikalischen Mechanik bestätigt, sondern auch und vor allem durch den Nachweis energieerhaltender Prozesse. Die mechanistisch (miss-) verstandene Energetik scheint erstmals den Schleier, welcher bisher über der geheimen mechanischen Grundstruktur der Natur gelegen hat, zu lüften.

Literatur:

Bevilacqua, F. (1994): Helmholtz's *Über die Erhaltung der Kraft*: The Emergence of a Theoretical Physicist, in: Cahan (Hg.) (1994).

Buchwald, J.Z. (1994): Electrodynamics in Context: Object States, Laboratory Practice, and Anti-Romanticism, in: Cahan (Hg.) (1994).

Cahan, D. (Hg.) (1994): Hermann von Helmholtz and the Foundations of Nineteenth-Century Science. Berkeley usw.

D'Agostino, S. (1975): Hertz's Researches on Electromagnetic Waves, in: Historical Studies in the Physical Sciences 6, S. 261 ff.

Darrigol, O. (1994): Helmholtz's Electrodynamics and the Comprehensibility of Nature, in: Krüger (Hg.) (1994).

Elkana, Y. (1974): The Discovery of the Conservation of Energy. London.

Engelhardt, D. von (1979): Historisches Bewusstsein in der Naturwissenschaft von der Aufklärung bis zum Positivismus. Freiburg/München.

Frank, Ph. (1932): Das Kausalgesetz und seine Grenzen. Hg. v. A.J. Kox. Frankfurt am Main 1988.

¹ HELMHOLTZ (1847), S. 53.

² HELMHOLTZ (1847), S. 7. Beispiele für ein heuristisches Regelwerk, das von energetischen Umsetzungen ausgeht, findet man in PLANCK (1887), S. 110 ff. und 123 f.

- Fullinwider, S.P. (1990): Hermann von Helmholtz: The Problem of Kantian Influence, in: *Studies in History and Philosophy of Sciences* 21, S. 41 ff.
- Hatfield, G. (1990): *The Natural and the Normative. Theories of Spatial Perception from Kant to Helmholtz.* Cambridge/London.
- Hayder, D.J. (1997): *Spielraum: Helmholtz's Manifold Theory of Perception and the Logical Space of Wittgensteins's Tractatus.* Diss. Toronto.
- Heidelberger, M. (1994): Force, Law, and Experiment: The Evolution of Helmholtz's Philosophy of Science, in: Cahan (Hg.) (1994).
- Heimann, P.M. (1974): Helmholtz and Kant: The Metaphysical Foundations of *Über die Erhaltung der Kraft*, in: *Studies in History and Philosophy of Sciences* 5, S. 205 ff.
- Helm, G. (1898): *Die Energetik nach ihrer geschichtlichen Entwicklung.* Leipzig.
- Helmholtz, H. v. (1847): *Über die Erhaltung der Kraft* (Ostwald's Klassiker der exacten Wissenschaften Nr. 1). Leipzig 1889.
- Helmholtz, H. v. (1856 ff.): *Handbuch der Physiologischen Optik.* Leipzig 1856 (1. Lieferung: S. 1–192), 1860 (2. Lieferung: bis S. 432) und 1867 (3. Lieferung: bis S. 874).
- Helmholtz, H. v. (1846): Wärme, physiologisch, in: Helmholtz (1882 ff.), Bd. 2, S. 680 ff.
- Helmholtz, H. v. (1854): *Über die Wechselwirkung der Naturkräfte und die darauf bezüglichen neuesten Ermittlungen der Physik*, in: Helmholtz (1884), Bd. 1, S. 48 ff.
- Helmholtz, H. von (1856): *Theorie der Wärme*, in: *Fortschritte der Physik im Jahre 1853*, IX. Jg., Berlin.
- Helmholtz, H. v. (1856 ff.): *Handbuch der Physiologischen Optik.* Leipzig 1856 (1. Lieferung: S. 1–192), 1860 (2. Lieferung: bis S. 432) und 1867 (3. Lieferung: bis S. 874).
- Helmholtz, H. v. (1862/3): *Über die Erhaltung der Kraft*, in: Helmholtz (1884), Bd. 1, S. 187 ff.
- Helmholtz, H. v. (1869): *Über das Ziel und die Fortschritte der Naturwissenschaft*, in: Helmholtz (1884), Bd. 1, S. 367 ff.
- Helmholtz, H. v. (1883): *Anhang zu Helmholtz (1854a): Robert Mayer's Priorität*, in: Helmholtz (1884), Bd. 1, S. 401 ff.
- Helmholtz, H. v. (1884): *Vorträge und Reden.* 2 Bde. Braunschweig⁵ 1903.
- Helmholtz, H. v. (1885 ff.): *Handbuch der Physiologischen Optik.* Hamburg/Leipzig² 1896.
- Helmholtz, H. v. (1891): *Erinnerungen*, in: Helmholtz (1884), Bd. 1, S. 1 ff.
- Helmholtz, H. v. (1894): *Über den Ursprung der richtigen Deutung unserer Sinneseindrücke*, in: Helmholtz (1882 ff.), Bd. 3, S. 536 ff.
- Helmholtz, Hermann von (1882 ff.): *Wissenschaftliche Abhandlungen.* 3 Bde. Leipzig 1882 (Bd. 1), 1883 (Bd. 2) und 1895 (Bd. 3).
- Helmholtz, H. von (1897 ff.): *Vorlesungen über theoretische Physik.* Hg. v. Arthur König et al. 6 Bde. Leipzig und Hamburg 1897 ff.
- Heyfelder, V. (1897): *Über den Begriff der Erfahrung bei Helmholtz.* Diss. Berlin.
- Janik, A., und St. Toulmin (1973): *Wittgensteins Wien.* München/Wien 1985.
- Jungnickel, Ch., and R. McCormmach (1986): *Intellectual Mastery of Nature. Theoretical Physics from Ohm to Einstein.* 2 Vols. Chicago/London.
- Kant, I. (1781): *Kritik der reinen Vernunft* (2. Aufl., "B"), in: Kant, I. (1900 ff.), Bd. III.
- Kant, I. (1790): *Kritik der Urtheilskraft* (2. Aufl., "B"), in: Kant, I. (1900 ff.), Bd. V.
- Kant, I. (1900 ff.): *Kant's gesammelte Schriften.* Hg. v. der Königlich Preussischen (später: Deutschen) Akademie der Wissenschaften (zu Berlin). Berlin.

- Koenigsberger, L. (1902 f.): Hermann von Helmholtz. 3 Bde. Braunschweig.
- Krüger, L. (1994): Helmholtz über die Begreiflichkeit der Natur, in: Krüger (Hg.) (1994).
- Krüger, L. (Hg.) (1994): Universalgenie Helmholtz. Rückblick nach 100 Jahren. Berlin.
- Kuhn, Th.S. (1959): Energy Conservation as an Example of Simultaneous Discovery, in: M. Clagett (Hg.), *Critical Problems in the History of Science*. Madison.
- Lavoisier, A.L. (1790): *Elements of Chemistry*. Transl. by R. Kerr. New York 1965.
- Leroux, J. (1995): Helmholtz and Modern Empirism. In: M. Marion and R.S. Cohen (Hg.), *Québec Studies in the Philosophy of Science I*, 287 ff.
- Lübbig, H. (Hg.) (1995): *The Inverse Problem. Symposium ad memoriam Hermann von Helmholtz*. Weinheim.
- Majer, U. (1985): Hertz, Wittgenstein und der Wiener Kreis, in: H.-J. Dahms (Hg.), *Philosophie, Wissenschaft, Aufklärung: Beiträge zur Geschichte und Wirkung des Wiener Kreises*. Berlin.
- Nye, M.J. (1984): Introduction, in: Diess. (Hg.) (1984): *The Question of the Atom. From the Karlsruhe Congress to the First Solvay Conference, 1860–1911*. Los Angeles/San Francisco..
- Planck, M. (1887): *Das Princip der Erhaltung der Energie*. Leipzig.
- Scheibe, E. (1970): Ursache und Erklärung, in: L. Krüger (Hg.), *Erkenntnisprobleme der Naturwissenschaften*. Köln/Berlin.
- Schiemann, G. (1992): Totalität oder Zweckmässigkeit? Kants Ringen mit dem Mannigfaltigen der Erfahrung im Ausgang der Vernunftkritik, in: *Kant-Studien* 83, S. 294 ff.
- Schiemann, G. (1995): Zwischen klassischer und moderner Wissenschaftstheorie: Hermann von Helmholtz und Karl R. Popper, erkenntnistheoretisch verglichen, in: *Deutsche Zeitschrift für Philosophie* 43, S. 845 ff. Englisch in: Lübbig (Hg.) (1995).
- Schiemann, G. (1996a): Was heisst moderne Physik?, in: D. Hoffmann, F. Bevilacqua, R. Struwer (Hg.): *Emergence of Modern Physics. Proceedings of a Conference Commemorating a Century of Physics*. Berlin 23.3.-24.3.1995. Pavia : La Goliardica Pavese 1996, S. 437 ff.
- Schiemann, G. (1996b): The Loss of World in the Image. Origin and Development of the Concept of Image in the Thought of Hermann von Helmholtz and Heinrich Hertz. Erscheint in: D. Baird et al. (Hg.), *Heinrich Hertz. Classical Physicist, Modern Philosopher*. Boston Studies in the Philosophy of Science. Dordrecht.
- Schiemann, G. (1997): *Wahrheitsgewissheitsverlust. Hermann von Helmholtz' Mechanismus im Anbruch der Moderne. Eine Studie zum Übergang von klassischer zu moderner Naturphilosophie*. Darmstadt 1997.
- Ströker, E. (1967): *Denkwege der Chemie. Elemente ihrer Wissenschaftstheorie*. Freiburg/München.
- Whitt, L.A. (1990): Atoms or Affinities? The Ambivalent Reception of Daltonian Theory, in: *Studies in History and Philosophy of Sciences* 21, S. 57 ff.
- Winters, St.M. (1985): *Hermann von Helmholtz's Discovery of Force Conservation*. Diss. Baltimore.
- Wise, M.N. (1981): German Concepts of Force, Energy, and the Electromagnetic Ether: 1845–1880, in: G.N. Cantor and M.S.J. Hodge, *Conceptions of Ether*. Cambridge.
- Wise, M.N. (1983): On the Relation of Physical Science to History in Late Nineteenth-Century Germany, in: L. Graham, W. LePencies and P. Weingart (Hg.), *Functions and Uses of Disciplinary Histories*. Vol. VII.