

Die Hypothesisierung des Mechanismus bei Hermann von Helmholtz

Ein Beitrag zum Wandel der Wissenschafts- und
Naturauffassung im 19. Jahrhundert

Gregor Schiemann

Die letzten Jahrzehnte des neuzeitlichen Mechanismus begannen in der Mitte des vergangenen Jahrhunderts mit einer großen Renaissance. Die experimentelle Naturforschung schien sich in vielen ihrer spezialisierten Bereiche endlich dem Ziel zu nähern, alle Phänomene durch Zurückführung auf mechanisch bewegte Materie zu erklären. In den 70er Jahren jedoch trat dann insbesondere im Zusammenhang mit weiteren Umsetzungsversuchen des mechanistischen Erklärungsprogramms in der Elektro- und Thermodynamik seine begrenzte Reichweite deutlicher zutage. Die nie gänzlich verstummte Kritik am Mechanismus nahm in den natur- und wissenschaftstheoretisch interessierten Kreisen wieder zu, suchte nach alternativen Erklärungssystemen oder propagierte den vollständigen Verzicht auf einen naturwissenschaftlichen Erklärungsanspruch.¹

In den Strudel einer letalen Krise gerieten aber nicht nur die Inhalte des mechanistischen Erklärungsprogramms, sondern auch die dabei erhobenen tra-

¹ Exemplarisch für die Kritik am mechanistischen Erklärungsprogramm sind Mach 1872, Kirchhoff 1897, Helm 1898.

ditionellen Geltungsansprüche der Naturwissenschaften. Fragwürdig wurde, ob wissenschaftliche Erkenntnis die seit der Antike behauptete alleinige, für immer gültige und vollständige Erkenntnis der Natur sein könne.² Während im deutschen Idealismus dieser Wahrheitsanspruch noch einmal mit großem Einfluß auch auf die Naturwissenschaften formuliert wurde und erst mit dem Niedergang der Hegelschen Systemphilosophie an Boden verlor, war seine Kritik bereits vor dem 19. Jahrhundert durch den englischen Empirismus, namentlich durch das wissenschaftskritische Werk von David Hume, vorbereitet worden. Im Kontext der Auseinandersetzung um den Mechanismus verband sich in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts die Kritik an absoluten Geltungsansprüchen wissenschaftlicher Erkenntnis zum einen - wie beispielsweise bei Pierre Duhem und Henri Poincaré - mit einer Ablehnung des mechanistischen Erklärungsprogramms.³ Zum anderen wurde die Relativierung von Geltungsansprüchen aber auch von den Vertretern des Mechanismus selbst betrieben. Neben Emil du Bois-Reymond hat hierfür Hermann von Helmholtz das bedeutendste Beispiel gegeben.⁴

In der ersten Zeit seiner wissenschaftlichen Karriere, d.h. vom Ende der 40er bis etwa zum Ende der 60er Jahre, trägt Helmholtz seine mechanistische Naturauffassung noch mit absolutem Geltungsanspruch vor. Im Verlauf der 70er Jahre wird dann ein Wandlungsprozeß auffällig, der sich am deutlichsten in seinen öffentlichen Reden nachweisen läßt. Die mit dem Mechanismus verbundenen Geltungsansprüche werden einer Hypothesisierung unterworfen, wobei Helmholtz allerdings an den Grundaussagen seiner Naturauffassung im wesentlichen unbeirrt festhält. Er korrigiert zwar seine Aussagen über die elementaren Kräfte und modifiziert auch seine Ansichten über die elementare Struktur der Materie, bleibt aber unverändert seiner Auffassung treu, daß die Naturforschung insgesamt danach streben solle, die Phänomene auf mechanisch bewegte Substanz zurückzuführen. Was die mechanistische Reduktion nicht mehr aufrechterhalten kann, ist der Anspruch, eine endgültige Erklärung aller Phänomene zu erreichen. Sie hat einen unaufhebbar hypothetischen Cha-

2 Zum Wandel der Wissenschaftsauffassung im 19. Jahrhundert vgl. Diemer 1968 und Schnädelbach 1983.

3 Duhem 1978, Poincaré 1974.

4 Du Bois-Reymond 1974. Der Wandel der Mechanikauffassung von C.G.J. Jacobi, den Pulte 1993 untersucht hat, stellt ein weiteres Beispiel der Relativierung von Geltungsansprüchen innerhalb der Tradition des Mechanismus dar.

rakter gewonnen, und ihre vollständige Umsetzung kann lediglich noch als ein Ideal, als ein regulatives Prinzip der Forschung betrachtet werden.⁵

Die Entwicklung von Helmholtz' Mechanismus ist durch diesen Wandel im Geltungsanspruch gekennzeichnet und läßt sich - in einer noch sehr groben Übersicht - in zwei Perioden einteilen. Auf die erste Periode bis etwa zum Ende der 60er Jahre werde ich im ersten Teil meines Beitrages eingehen. Hier rekonstruiere ich umrißhaft die empiristische Begründung, die Helmholtz für den Wahrheitsanspruch seiner Naturauffassung gegeben hat. Im zweiten Teil werde ich dann die wichtigsten Merkmale der im Verlauf der 70er Jahre hervortretenden Hypothesisierungstendenz charakterisieren. Abschliessend will ich in einem dritten Teil zeigen, wie Helmholtz auf der Grundlage seines gewandelten Wissenschaftsverständnisses das Programm einer mechanistischen Naturerklärung mit großem wirkungsgeschichtlichen Einfluß weiter verfolgt hat.

1. Die Begründung des dualen Mechanismus

Mit seinen physiologischen, physikalischen und geometrischen Untersuchungen und mit öffentlichen Reden war Helmholtz maßgeblich daran beteiligt, den letzten Siegeszug des Mechanismus auf den Weg zu bringen.

Die von ihm selbst gegebene Begründung des Mechanismus ist von Anfang an einem Wandlungsprozeß unterworfen, der die grundlegenden Begriffe der Materie und der Kraft, der Ursache und des Gesetzes ebenso betrifft wie das Verhältnis der Geltung von wissenschaftlicher Erkenntnis und lebensweltlichen Wahrnehmungen. Von diesen Veränderungen weitgehend unberührt bleiben bis gegen Ende der 60er Jahre jedoch der (von Helmholtz teilweise

⁵ Veränderungen von Helmholtz' Wissenschafts- und Naturauffassung sind zwar in der Sekundärliteratur wiederholt, jedoch meist nur andeutungsweise, bemerkt worden. Insgesamt überwiegt die Einschätzung, daß den Elementen einer wissenschafts- und naturtheoretischen Veränderung gegenüber einem sich durchhaltenden Standpunkt eine eher untergeordnete Bedeutung zukomme: So z.B. bei Koenigsberger 1895, Conrat 1904, Erdmann 1921, Hörz und Wollgast 1971, Heimann 1974, Elkana 1974, Winters 1985. Nur König 1968 und Heidelberger 1993 messen dem Wandlungsprozeß von Helmholtz' Wissenschafts- und Naturauffassung und der damit verbundenen Hypothesisierungstendenz, die bereits von Erdmann 1921: 10 f. bemerkt wurde, größere Bedeutung bei.

selbst bestrittene)⁶ empirische Bezug und die grundlegenden inhaltlichen Bestimmungen der Begründung. Beides geht aus den Texten hervor, in denen sich Helmholtz zu seiner mechanistischen Naturauffassung äußert. Bei diesen Texten handelt es sich einerseits um die Einleitung zu seiner berühmten Schrift *Ueber die Erhaltung der Kraft* von 1847 und andererseits um zahlreiche seiner zu Lebzeiten vielbeachteten Reden, in denen Helmholtz Ergebnisse naturwissenschaftlicher Untersuchungen allgemeinverständlich darstellt, gegen andere Ansätze abgrenzt und allgemein zu den Zielen und Methoden der Wissenschaften Stellung nimmt. Während sein Mechanismus in den meisten Reden im Hintergrund bleibt,⁷ nimmt er in der Einleitung und in der Rede vor der Naturforscherversammlung in Innsbruck im Jahr 1869 ("Naturforscherrrede") explizit und umfassend zu seiner Naturauffassung Stellung. Diese beiden Texte bilden den Anfangs- und Schlußpunkt der ersten, relativ homogenen Periode in der Entwicklung seines Mechanismus.⁸ Um ihre strukturelle Gemeinsamkeit in der Begründung des absoluten Geltungsanspruches zu rekonstruieren, werde ich sie parallel besprechen.

Gemeinsam sind beiden Texten zwei Voraussetzungen, die Helmholtz der Begründung seines Mechanismus voranstellt. Die erste Voraussetzung betrifft das allgemeine Ziel der wissenschaftlichen Erkenntnis, das Helmholtz aus dem "Gesetze der Causalität" ableitet und das er 1847 als das "endliche Ziel der theoretischen Naturwissenschaften" formuliert, "die letzten unveränderlichen Ursachen der Vorgänge in der Natur aufzufinden" (Helmholtz 1882 ff., Bd. 1: 13). 22 Jahre später mißt er dementsprechend den naturwissenschaftlichen Fortschritt "nach dem Maasse, in welchem die [...] Kenntniss eines alle Naturerscheinungen umfassenden ursächlichen Zusammenhanges fortgeschritten ist" (Helmholtz 1903, Bd. 1: 377). In beiden Reden zweifelt er nicht daran, daß die Naturforschung das Endziel objektiver Wahrheit über die Natur tatsächlich erreichen kann. Mit Blick auf die bisherige Entwicklung der neuzeitlichen Wissenschaft, die sich ihm zufolge insgesamt auf die Lösung ihrer einen Aufgabe zubewegt, glaubt Helmholtz in der Naturforscherrrede, ein "befriedigendes Facit" ziehen zu können (a.a.O.: 395). Überdies stellt er klar, daß

⁶ Helmholtz 1856 ff.: 454; Helmholtz 1882 ff., Bd. 1: 68 f.

⁷ Z.B.: Helmholtz 1903, Bd. 1: 40, 45, 64, 178 und 217 f.; Helmholtz 1882 ff., Bd. 3: 569.

⁸ Die dieser Periode vorgelagerte Entwicklungsphase, in der Helmholtz erst andeutungsweise mechanistische Positionen vertritt, bleibt hier unberücksichtigt.

der Fortschritt "nicht [...] auf speculativem Wege", sondern nur in Abhängigkeit von der experimentellen Erfahrung vorankommen werde (a.a.O.: 375).

Obwohl Helmholtz wiederholt von der apriorischen Geltung der Kausalität gesprochen hat,⁹ gilt der Erfahrungsbezug auch für die Reichweite der kausalen Erforschung der Natur, die auf doppelte Weise empirisch begrenzt ist: Zum einen ist sie beendet, wenn sie, auf Erfahrung gestützt, "letzte Ursachen" findet. Zum anderen ist Helmholtz überzeugt, daß sich geistige Phänomene und willentliche Handlungen nie vollständig kausal erfassen lassen.¹⁰ Seine Naturauffassung ist gleichsam halbiert. Sie bezieht sich nur auf die geistlosen Naturerscheinungen und beansprucht, empirisch den Umfang dieser Erscheinungen und ihre kausale Erklärung aus "letzten Ursachen" angeben zu können.

Die zweite Voraussetzung ist in der Einleitung explizit und in der Naturforscherrede implizit enthalten: Helmholtz setzt die Begriffe der Materie und der Kraft als Grundbegriffe seiner Wissenschafts- und Naturauffassung. "Ihrem bloßen Dasein nach" bezeichne die Wissenschaft die "Gegenstände der Aussenwelt" als Materie; deren "Vermögen Wirkungen auszuüben" bezeichne sie hingegen als Kraft (Helmholtz 1882 ff., Bd. 1: 14). Während Helmholtz in der Einleitung bereits bei dieser Gelegenheit der Materie Massenerhaltung, Trägheit und räumliche Bewegung (als einzig mögliche Veränderung) zuschreibt, ist der Kraftbegriff noch so weit gefaßt, daß jedes Wirkende Kraft heißen kann.¹¹ Für die Bestimmung des Mechanismus ist damit eine duale Konzeption vorgezeichnet, in der sich weder die Eigenschaften der Materie vollständig auf Kräfte, noch die Eigenschaften der Kräfte vollständig auf Materie reduzieren lassen. Ob Helmholtz diese Vorentscheidung zu Recht nicht als Folgerung des Kausalgesetzes versteht, muß offenbleiben. Strenggenommen müßte er Materie und Kraft gemeinsam als Ursachen des Naturge-

⁹ Erstmals in Helmholtz 1903, Bd. 1: 116, später in Helmholtz 1856 ff.: 453; Helmholtz 1903, Bd. 2: 243; Helmholtz 1897 ff., Bd. I.1: 17.

¹⁰ Helmholtz 1882 ff., Bd. 1: 13. Helmholtz 1903, Bd. 1: 389 f. steht in dieser Hinsicht nicht in Widerspruch zu: Helmholtz 1903, Bd. 1: 37 und 171; Helmholtz 1856 ff.: 454; Helmholtz 1903, Bd. 2: 89 und 419.

¹¹ In den weiteren Abschnitten der Schrift meint Helmholtz mit dem Begriff der Kraft außer der mechanischen Kraft vor allem die heute als Energie bezeichnete physikalische Größe. Zur Vagheit beider Bedeutungen, die gleichwohl gut auseinanderzuhalten sind, vgl. Elkana 1974.

schehens bezeichnen. Er bezieht jedoch lebenslang den Begriff der Ursache meist einseitig auf den Kraftbegriff.¹²

Die Begründung der mechanistischen Naturauffassung setzt nun in beiden Texten am Begriff der Materie an: Helmholtz macht die grundlegende Annahme, daß die (wägbare) Materie in diskrete Elemente zerlegbar sei. Er entwickelt diese Annahme sowohl in der Einleitung als auch in der Naturforscherrede mit ausdrücklichem Bezug auf die experimentelle Forschung, wobei er sich in beiden Texten auf die Erkenntnisse der Chemie stützt. Um sich in der Einleitung "das Weltall zerlegt in Elemente" zu denken, beruft er sich auf die "(chemische[n]) Elemente" (Helmholtz 1882 ff., Bd. 1: 15). In der Naturforscherrede wird dieser rechtfertigende Erfahrungsbezug dann zum zentralen Argument der Begründung. Hier glaubt er, alle Bestimmungen der Materie unmittelbar der Chemie entnehmen zu können. Die Chemie habe "*erwiesen*", erklärt er, daß die von ihr entdeckten Elemente "wirklich unzerstörbar" seien und "alle Masse aus den von ihr gefundenen Elementen zusammengesetzt" sei (Helmholtz 1903, Bd. 1: 378 - Hervorheb. von mir). Elemente sind für ihn also nicht nur durch ihre chemischen Qualitäten und durch die Verhältnisse, in denen sie sich untereinander verbinden, bestimmt, sondern werden darüber hinaus als physikalische Objekte, als faktisch vorhandene Atome verstanden.

Was Helmholtz als erfahrungsfundierte Aussagen der Naturforschung ausgibt, hat für ihn in den 60er Jahren absolute Geltung. Die Naturwissenschaft könne mit dem ihr eigenen induktiven Verfahren zu Begriffen gelangen, in denen das Wesen eines Vorganges "klar vor Augen" liege, und allgemeine Gesetze von "unbedingter Gültigkeit" aufstellen, in denen sich die "Form des logischen Schliessens" vollende (Helmholtz 1903, Bd. 1: 170, 175 und 171). Unter Gesetzen versteht Helmholtz hierbei - knapp gesagt - mathematisch erfaßbare Kausalverhältnisse von Naturveränderungen.¹³

Daß zwischen den Elementen der Materie überhaupt Kräfte wirken müssen, ergibt sich aus dem dualen Charakter seiner Naturauffassung. Aber erst aus dem elementaristischen Aufbau der Materie schließt Helmholtz auf die Eigenschaften dieser Wechselwirkungen: Weil die Elemente allein ihre räumliche Position verändern, können die zwischen ihnen wirksamen Kräfte auch nur "Bewegungskräfte" sein.¹⁴ Ohne bereits auf die Struktur dieser Kräfte ein-

¹² Helmholtz 1882 ff., Bd. 1: 14 und 68; Helmholtz 1903, Bd. 1: 40 und 377; Helmholtz 1856 ff.: 454 f.

¹³ Helmholtz 1903, Bd. 1: 169 f. und 374 ff.; Helmholtz 1856 ff.: 454 f. u.ö.

¹⁴ Helmholtz 1882 ff., Bd. 1: 15. Entsprechend: Helmholtz 1903, Bd. 1: 379.

zugehen, benennt Helmholtz jetzt erst in beiden Texten die mechanistische Zielsetzung: Zurückführung der "Naturerscheinungen [...] auf Bewegungen von Materien *mit* unveränderlichen Bewegungskräften" (Helmholtz 1882 ff., Bd. 1: 15 - Hervorheb. von mir) oder, gleichbedeutend: "[...] das Endziel der Naturwissenschaft ist, [...] sich in Mechanik aufzulösen." (Helmholtz 1903, Bd. 1: 379).

Die letzte Formulierung macht deutlich, daß er in der physikalischen Disziplin der Mechanik diejenige Wissenschaft sieht, die allein für die nähere Bestimmung der Bewegungskräfte zuständig ist. Die "reinste Form des Ausdruckes der Kraft", heißt es in der Naturforscherrede, sei die "mechanische Kraft", deren Wirkung man in Bereichen von "verschwindend kleinen Massentheilchen" "aus beobachteten Erscheinungen [...] *herauszulesen*" vermöge (Helmholtz 1903, Bd. 1: 376 - Hervorheb. von mir). Nicht nur die Struktur der Materie, sondern auch die der elementaren Kräfte soll mit Gewißheit der induktiv verfahrenen Wissenschaft - in diesem Fall: der Mechanik - entnommen werden. Die elementaren Kräfte sollen deshalb gemäß dem zweiten Axiom von Newtons Mechanik nur Ursache von Bewegungsveränderungen sein. Im Zusammenhang mit seinen Arbeiten zum Energieerhaltungssatz setzt Helmholtz ihre Struktur darüber hinaus mit derjenigen der Gravitationskraft gleich und bestimmt sie als entfernungsabhängige Zentralkräfte, die sich nur in ihrer Stärke voneinander unterscheiden.¹⁵

Zusammenfassend können als die grundlegenden Bestimmungen von Helmholtz' Mechanismus in ontologischer Hinsicht die Dualität von trägen Elementen und bewegungsverändernden Kräften und in methodischer Hinsicht die Newton-Lagrange-Formulierung der Mechanik angesehen werden. Den Wahrheitsanspruch seiner Naturauffassung begründet Helmholtz nicht vor aller Erfahrung, sondern im Bezug auf Erfahrung, die die einzige von ihm anerkannte Geltungsbasis naturwissenschaftlicher Aussagen ist. Damit kommt die hier angedeutete Rekonstruktion zu einem Ergebnis, das auch für die Bewertung des Verhältnisses von Helmholtz und Kant, welches in der Vergangenheit ebenso häufig wie gegensätzlich beurteilt wurde,¹⁶ nicht folgenlos bleiben

¹⁵ Helmholtz 1882 ff., Bd. 1: 15 ff.; in der Rede von 1869 ist die Festlegung auf die Zentralkraftstruktur in der mechanischen Deutung der Energieerhaltung impliziert: Helmholtz 1903, Bd. 1: 379 ff.

¹⁶ Einige wenige Titel sind: Krause 1876, Schwertschlag 1883, Cassirer 1973: 92 ff., Heimann 1974 und Fullinwider 1990.

dürfte. Helmholtz' späte Erklärung, "die philosophischen Erörterungen der Einleitung [...] [seien] durch Kant's erkenntnistheoretische Ansichten [...] beeinflusst" (Helmholtz 1882 ff., Bd. 1: 68), findet zumindest durch die im Text eben dieser Einleitung vorgenommene Begründung des Mechanismus keine überzeugende Bestätigung.

Im Unterschied zu Kant vertritt Helmholtz keinen dynamischen (allein auf Kräften aufbauenden), sondern einen dualen Mechanismus, und er gibt dafür in der Hauptsache keine (im Sinne von Kant) metaphysische, sondern eine empiristische Begründung, die jener allerdings im Wahrheitsanspruch keinesfalls nachzustehen gedenkt.¹⁷ Für seinen Empirismus ist es im Zeitraum zwischen dem Ende der 40er und etwa dem Ende der 60er Jahre charakteristisch, daß er die Objektivität der wissenschaftlichen Erkenntnis streng gegen das bloß subjektive Zeugnis der unmittelbaren Sinneswahrnehmung abgrenzt. Das Verhältnis beider thematisiert er im Zusammenhang mit seiner Wahrnehmungstheorie, die er in den 50er und 60er Jahren entwickelt und die weniger für die Begründung des Wahrheitsanspruches des Mechanismus als für seine spätere Relativierung in wissenschaftstheoretischer Hinsicht relevant ist.¹⁸ Anfänglich läßt er zwischen wissenschaftlicher Erkenntnis und dem Zeugnis der Sinneswahrnehmung keinerlei Gemeinsamkeit zu.¹⁹ Erst im *Handbuch der physiologischen Optik* postuliert er 1867 eine Eigenschaft der Sinneswahrnehmung, mit der sie dem Wahrheitsstreben der Wissenschaft uneingeschränkt als empirisches Material zur Verfügung steht: Die Wahrnehmung ereigne sich gleichzeitig mit dem Wahrgenommenen und bilde deshalb die Zeitfolge des Wahrgenommenen ab.²⁰ Wissenschaft kann jetzt nicht nur, sondern muß auch, wie es später heißt, allein von "beobachtete[n] Thatsachen" (Helmholtz 1903, Bd. 2: 352) ausgehen.

¹⁷ Zu Kants metaphysischer Grundlegung eines dynamischen Mechanismus vgl. sein *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft* (1786), in: Kant 1902 ff., Bd. 4.

¹⁸ Von der umfangreichen Sekundärliteratur zu Helmholtz' Wahrnehmungstheorie sind zu nennen: Conrat 1904, Hatfield 1990 und Turner 1993.

¹⁹ Helmholtz 1882 ff., Bd. 2: 608 f.; Helmholtz 1903, Bd. 1: 40 f. und 171 f.

²⁰ Helmholtz 1856 ff.: 445. Entsprechend nur in: Helmholtz 1903, Bd. 1: 393.

2. Die Hypothesisierung der Wissenschafts- und Naturauffassung

Die in den 70er Jahren hervortretende Relativierung des Geltungsanspruches der mechanistischen Naturauffassung kann als Anwendung bereits vorliegender Bestimmungen der Wahrnehmungstheorie auf die wissenschaftliche Erkenntnis verstanden werden. Zu den kennzeichnenden Merkmalen der Helmholtzschen Wahrnehmungstheorie gehört, daß sie dem qualitativen Inhalt der Sinneswahrnehmung im Gegensatz zum Abbildcharakter der zeitlichen Struktur nur eine relative Geltung zumißt, die von der erfolgreichen Verarbeitung der jeweiligen Wahrnehmung abhängt. Nachdem Helmholtz bereits den Wirklichkeitsbezug wissenschaftlicher Erkenntnis auf Wahrnehmbares eingeschränkt hat, unterwirft er in der Folgezeit auch die wissenschaftliche Zielsetzung und Methodik zunehmend diesen schwankenden Geltungsbedingungen. Die Neuorientierung tangiert alle Bestimmungen seiner Wissenschaftsauffassung. Ihren ersten und auch deutlichsten Ausdruck findet sie aber in der auf wissenschaftlicher Erkenntnis basierenden Gesamtdeutung der Natur, wie Helmholtz sie in seinen öffentlichen Reden vertritt.

Gerade zwei Jahre, nachdem er an prominentester Stelle, auf dem Podium der Naturforscherversammlung, dem Atomismus gehuldigt hat, wendet sich Helmholtz in seiner Rede "Zum Gedächtniss an Gustav Magnus" "gegen das Streben, aus rein hypothetischen Annahmen über [den] Atombau der Naturkörper die Grundlagen der theoretischen Physik herzuleiten" (Helmholtz 1903, Bd. 2: 45). Während Helmholtz hier den Ausdruck "hypothetisch" noch abwertend gebraucht und auf noch nicht gefundene unsichtbare Entitäten bezieht, führt er wenig später den Begriff der Hypothese erstmals mit positivem Sinn in seine Wissenschaftsauffassung ein. "Jede berechtigte Hypothese", schreibt er 1874 in einer Vorrede zu dem von ihm mitübersetzten *Handbuch der theoretischen Physik* der englischen Physiker W. Thomson und P. G. Tait, "ist der Versuch, ein neues allgemeineres Gesetz aufzustellen" (Helmholtz 1903, Bd. 2: 416). Aus der Induktion gehen jetzt nicht mehr unmittelbar Gesetze, sondern Hypothesen hervor, aus denen Gesetze erst durch nachträgliche empirische Verifikation gewonnen werden.²¹ 1877, in der Rede "Das Denken in der Medizin", tritt die Verbindung des Wandels der Wissenschaftsauffassung mit

²¹ Helmholtz 1903, Bd. 2: 414. Vgl. a. Helmholtz 1897 ff., Bd. I.1: 18 f.

der Krise des Mechanismus bestimmter hervor. Einerseits gesteht Helmholtz dort ein, daß man bei einer "ursächliche[n] Erklärung" "nicht immer zurückgehn [könne] auf die Kräfte der Atome" (Helmholtz 1877: 31 f.).²² Genau diese Reduktion hatte er jedoch bisher für möglich und erforderlich gehalten. Andererseits erklärt er die Verifikation von Hypothesen zu einer Arbeit, die "eigentlich nie" aufhöre und "nie zur unbedingten Wahrheit" führe (Helmholtz 1877: 26 f.). Wenn aber die Verifikation nicht abschließbar ist, erhalten Gesetze selbst hypothetischen Charakter. In diesem Zusammenhang gelangt Helmholtz zu einem Wissenschaftsverständnis, das bereits die Grundüberzeugung des kritischen Rationalismus, wie ihn Karl R. Popper begründen wird,²³ vorwegnimmt: Die von Helmholtz wörtlich so genannte "Infallibilität" wird für ihn zum Kennzeichen einer falschen Wissenschaftlichkeit (Helmholtz 1877: 15).²⁴

Bei Helmholtz läuft die Hypothesisierung von Gesetzesaussagen noch nicht der Aufgabe der Wissenschaft zuwider, nach einer allein gültigen Naturerkenntnis zu streben. Diese Aufgabenstellung wird erst durch weitere Schritte des Hypothesisierungsprozesses fragwürdig. Neben geometrischen Überlegungen zur äquivalenten Darstellbarkeit des mathematischen Raumes²⁵ gehört dazu die Annahme, daß unverzichtbare erkenntnistheoretische Voraussetzungen eine unbegründbare Wahl zwischen entgegengesetzten Positionen implizieren. In diesem Sinn stellt er in seiner wohl bedeutendsten Rede "Ueber die Thatsachen in der Wahrnehmung" von 1878 an zentraler Stelle seiner eigenen realistischen Position die idealistische als ebenso unwiderlegbare und deshalb gleichberechtigte gegenüber und bezeichnet beide als "metaphysische Hypothesen" mit "vollkommene[r] wissenschaftliche[r] Berechtigung" (Helmholtz 1903, Bd. 2: 239).

Von wissenschaftlichen Hypothesen kann bei Helmholtz also in dreifachem Sinn die Rede sein: Im Sinn von noch nicht gefundenen oder fiktiv angenommenen unsichtbaren Entitäten, von nicht hinreichend verifizierten oder nicht vollständig verifizierbaren Gesetzen und schließlich im Sinn von unwiderlegbaren erkenntnistheoretischen Voraussetzungen.

²² Eine "ursächliche Erklärung" geben, heißt an dieser Stelle, ein Gesetz und die Bedingungen seiner Wirksamkeit angeben.

²³ Popper 1989: 14 ff.

²⁴ Vgl. entsprechend: Helmholtz 1903, Bd. 2: 239; Helmholtz 1882 ff., Bd. 2: 642.

²⁵ Helmholtz 1903, Bd. 2: 24 ff. und 230 ff.

Folgt man den öffentlichen Reden, so kann man insgesamt von einer Hypothesisierung der Wissenschafts- und Naturauffassung sprechen. Das Spektrum der zu berücksichtigenden Bedingungen und möglichen Ursachen dieses Prozesses ist vielfältiger Art und kann hier nur sehr fragmentarisch angesprochen werden. Zunächst folgt Helmholtz der in der europäischen Wissenschaft der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts durchgreifenden Tendenz zur Hypothesisierung von Geltungsansprüchen, die als Teil einer allgemeinen kulturhistorischen Umwälzung verständlich gemacht werden kann.²⁶ Helmholtz scheint hierbei insbesondere durch den englischen Empirismus und durch die Wissenschaftsauffassungen englischer Physiker beeinflusst zu sein. In John Stuart Mills Wissenschaftstheorie findet er das Wesen induktiver Schlüsse "am besten auseinandergesetzt" (Helmholtz 1856 ff.: 447), und den Ansichten von Michael Faraday, James Clerk Maxwell und William Thomson mißt er im Verlauf seiner Karriere wachsende Bedeutung zu.²⁷ Als ein wesentlicher Faktor im Rahmen seiner eigenen Forschungen ist vor allem der Ausbau seiner Wahrnehmungstheorie zu einer umfassenden Erkenntnistheorie zu berücksichtigen. Nicht auszuschließen ist im weiteren, daß der Wandlungsprozeß der Wissenschaftsauffassung durch die Krise seines Mechanismus maßgeblich angeregt ist. In dieser Krise spiegelt sich vermutlich ebenso eine Reaktion auf die eingangs erwähnte inhaltliche Kritik wie Helmholtz' Bemühen, sich öffentlich von materialistischen Weltanschauungen zu distanzieren.²⁸ Das Hervortreten der Krise seines Mechanismus fällt ferner beruflich mit seiner stärkeren Hinwendung zu physikalischen Problemen zusammen.²⁹ Schließlich schwächt der Geltungsverlust der wissenschaftlichen Erkenntnis rückwirkend aber auch den Wahrheitsanspruch des Mechanismus. Dessen gewandelten Stellenwert begründet Helmholtz jetzt wahrnehmungstheoretisch. In ebenso

26 Vgl. Anm. 2.

27 Nur die wichtigsten Hinweise können hier gegeben werden: Von seinen seit 1853 unternommenen Reisen nach England berichtet Koenigsberger 1902 f.; 1870 gibt Helmholtz ein Buch von John Tyndall über Faraday heraus, 1871 und 1874 den ersten und zweiten Teil des 1. Bandes des Handbuches von Thomson und Tait (s.o.), zu Maxwell vgl. insb. Helmholtz 1903, Bd. 2: 249 ff. und Helmholtz 1882 ff., Bd. 3: 209. Auf den Einfluß englischer Physiker auf den Wandlungsprozeß von Helmholtz' Wissenschafts- und Naturauffassung hat insbesondere Heidelberger 1993 hingewiesen.

28 Vgl. die erst in die zweite Auflage (1878) der Rede "Das Denken in der Medizin" aufgenommene Distanzierung vom Materialismus: Helmholtz 1903, Bd. 2: 186 f.

29 1871 beendet Helmholtz seine Tätigkeit als Professor für Physiologie in Heidelberg und wird Professor für Physik in Berlin.

pathetischen Worten, wie er ursprünglich die objektive Wahrheit des Mechanismus in Aussicht gestellt hatte, distanziert er sich 1878 grundsätzlich von allen reduktionistischen Absolutheitsansprüchen:

"Jede Zurückführung der Erscheinungen auf die zu Grunde liegenden Substanzen und Kräfte behauptet etwas Unveränderliches und Abschliessendes gefunden zu haben. Zu einer unbedingten Behauptung dieser Art sind wir nie berechtigt; das erlaubt weder die Lückenhaftigkeit unseres Wissens, noch die Natur der Inductionsschlüsse, auf denen all unsere Wahrnehmung des Wirklichen vom ersten Schritte an beruht." (Helmholtz 1903, Bd. 2: 243)

Das einzige prinzipielle Argument, das Helmholtz hier für die Ablehnung der unbedingten Geltung gibt, "die Natur der Inductionsschlüsse", ist seiner Wahrnehmungstheorie aus den 60er Jahren entnommen, deren Anwendung auf die Wissenschaftsauffassung ich an dieser Stelle exemplarisch vorführen möchte. Mit dem Ausdruck "Inductionsschluss" und seinen Synonymen bezeichnet Helmholtz sehr verschiedene Vorgänge,³⁰ die jeweils auf ihre Weise zur Relativierung der wissenschaftlichen Erkenntnis beitragen.

Von größter Bedeutung ist der Vorgang, der den grundlegenden Prozeß der Wahrnehmungsentstehung und -verarbeitung in lebenden Organismen betrifft.³¹ Nach Helmholtz kommen auf Empfindungen bezogene Wahrnehmungs- und Handlungsweisen in einem naturwüchsigen Lernvorgang induktiv zustande: Ähnliche Empfindungseinwirkungen und ihre erfolgreichen Verarbeitungen werden beständig im Gedächtnis gespeichert und, ohne daß sich das betreffende Individuum in der Regel dessen bewußt wäre, zu Wahrnehmungs- und Reaktionsregeln verallgemeinert. Tritt eine vergleichbare Empfindung wieder auf, bestimmen diese Regeln, nun ausnahmslos unbewußt, die dann entstehenden Wahrnehmungen und Reaktionen. Es handelt sich um die Ausbildung und Anwendung eines psychologischen Schemas, dessen Geltung Helmholtz nur am jeweiligen Erfolg mißt und eben deshalb weder als unveränderlich noch abschließend einschätzt.³²

Was sich hier am Beispiel der Geltung von Reduktionen zeigt, ließe sich in vergleichbarer Weise auch an den Grundbegriffen von Helmholtz' Wissenschaftsauffassung (insbesondere dem Kraft-, Gesetzes- und Raumbegriff) nachweisen: Elementare Wahrnehmungsprozesse garantieren und begrenzen

³⁰ Conrat 1904: 92 ff. Vgl. Helmholtz 1903, Bd. 1: 112 ff.; Helmholtz 1856 ff.: 430, 449 und 453 f.; Helmholtz 1903, Bd. 2: 226, 233, 243 f. und Anm. 31.

³¹ Helmholtz 1856 ff.: 447 und 449; Helmholtz 1903, Bd. 1: 358 ff.

³² Helmholtz 1856 ff.: 442 f.; Helmholtz 1885 ff.: 602 f.

zugleich - fast schon im Sinn eines modernen Lebenswelt-Aprioris - die Geltungsbedingungen der wissenschaftlichen Naturerkenntnis. Weil schon alltägliche Wahrnehmungen nur relativ zu ihrem niemals vollständig gesicherten Erfolg gelten, können die "Substanzen und Kräfte", die Helmholtz den Naturphänomenen unverändert zugrunde legt, nicht mehr mit Unbedingtheit angenommen werden.

Aber welchen Stellenwert hat das Zugrundeliegende, wenn reduktionistische Erklärungen weiterhin zugelassen sein sollen? Helmholtz gibt hierauf, ebenfalls in der Rede "Die Thatsachen in der Wahrnehmung", eine Antwort, in der er sich für die Fortführung eines, allerdings nicht mehr notwendig mechanistischen Reduktionsprogramms ausspricht:

"Setzen wir [...] voraus, dass das Begreifen [der Naturerscheinungen - G.S.] zu vollenden sein wird, dass wir ein letztes Unveränderliches als *Ursache* der beobachteten Veränderungen werden hinstellen können, so nennen wir das [das - G.S.] regulative Prinzip unseres Denkens, was uns dazu treibt, das *Causalgesetz*. Wir können sagen, es spricht das Vertrauen auf die *vollkommene Begreifbarkeit* der Welt aus. Das Begreifen [...] ist die Methode, mittelst deren unser Denken die Welt sich unterwirft [...] ." (Helmholtz 1903, Bd. 2: 243 - Hervorheb. im Text)

Helmholtz hält am Ziel einer vollständigen Naturerklärung fest, rückt es aber in eine so unerreichbare Ferne, daß das "Begreifen" zu einer gegenüber Inhalten gleichgültigen methodischen Aufgabe geworden ist. Ein regulatives Prinzip kann auch kein Objekt in der Erfahrung bedingen. Es gibt stattdessen eine heuristische Regel vor, die nie zu einer absoluten Grenze führt. Es ist dies das letzte Mal, daß Helmholtz von der "Vollendung" des Begreifens spricht. In den nachfolgenden Reden scheint sich seine Distanzierung von einer endlichen Zielsetzung zu vergrößern, er bleibt aber insgesamt unentschieden.³³

Für die Äußerungen, mit denen Helmholtz die Hypothesisierung seiner Wissenschafts- und Naturauffassung an den zentralen Stellen seiner Reden in den 70er Jahren vornimmt und von denen ich einige typische angeführt habe, findet sich Vergleichbares im Zeitraum davor nur in seinen wahrnehmungstheoretischen Arbeiten.³⁴ Diese stellen nicht so sehr schon eine Reflexion auf wis-

³³ Vgl. insb. Helmholtz 1903, Bd. 2: 358; Helmholtz 1897 ff., Bd. I.1.: 17 f.

³⁴ So findet der in der ersten Auflage des *Handbuches der physiologischen Optik* auf Wahrnehmungen bezogene relative Wahrheitsbegriff (Helmholtz 1856 ff.: 443) in der zweiten Auflage auch auf die wissenschaftliche Erkenntnis Anwendung (Helmholtz 1885 ff.: 590).

senschaftliche Erkenntnis dar als vielmehr eine nichtreflexive Thematisierung lebensweltlicher Wahrnehmungsvorgänge. Meine Rekonstruktion des Wandlungsprozesses ging davon aus, daß Helmholtz seine Wahrnehmungstheorie aus den 60er Jahren höchstens ansatzweise als Erkenntnistheorie verstanden hat.³⁵ Er baut sie erst im Verlauf der 70er Jahre zu einer solchen aus und kann mit ihr die mittlerweile eingetretene Geltungsrelativierung begründen.

Trotz des Einschnittes in Helmholtz' öffentlichen Stellungnahmen zu Beginn der 70er Jahre vollzieht sich der wahrnehmungstheoretisch vorbereitete Wandlungsprozeß allmählich und nicht immer kontinuierlich. Altes und Neues stehen teilweise unverbunden nebeneinander.³⁶ Daß sich die Konturen des Neuen erst langsam abzuzeichnen beginnen, ist Ausdruck der historischen Dimension, die der von Helmholtz mitgetragene Wandel hat: Er bricht mit der bis in die Antike zurückreichenden Tradition der Wahrheitssuche, die sich doch so nah schon an ihrem Ziel wähnte, und bereitet den modernen Prozeß der Wahrheitsrelativierung vor, der sich bis in die Gegenwart hinein fortgesetzt hat.

3. Mechanistische Analogien und mathematische Vereinheitlichung

Nachdem es für Helmholtz fragwürdig geworden ist, ob sich die Materie aus unveränderlichen Atomen zusammensetzt und ob die elementaren Wechselwirkungen nur aus instantan wirkenden mechanischen Zentralkräften bestehen,³⁷ gibt es für ihn, grob gesprochen, nur noch eine Möglichkeit, an den

³⁵ Helmholtz selbst bewertet seine Wahrnehmungstheorie erst seit etwa dem Ende der 60er Jahre als allgemeine Erkenntnistheorie: Implizit in Helmholtz 1903, Bd. 1: 394 f. und Bd. 2: 222, explizit in Helmholtz 1903, Bd. 1: 16 f. und Bd. 2: 188 und 338.

³⁶ Das gilt insbesondere für Helmholtz' Äußerungen zur Kausalität (Helmholtz 1856 ff.: 453 f.; Helmholtz 1903, Bd. 2: 243 f.). Auch in den Reden, in denen er die Relativierung ehemaliger Geltungsansprüche formuliert oder voraussetzt, betont Helmholtz den nichthypothetischen Charakter wissenschaftlicher Aussagen (z.B. Helmholtz 1903, Bd. 2: 218 und 252) und grenzt streng allgemeingültige Gesetze von Hypothesen ab (Helmholtz 1903, Bd. 2: 184 ff. und 240 u.ö.).

³⁷ 1878 ist Helmholtz bereits auf "neue Zerlegungen der jetzt bekannten chemischen Elemente gefaßt" (Helmholtz 1903, Bd. 2: 240), seit Beginn der 80er Jahre problematisiert er ansatzweise die bisher angenommene Struktur der elementaren Wechselwirkungen (Helmholtz 1882 ff., Bd. 1: 68 ff.; Helmholtz 1882 ff., Bd. 2: 1003 ff.).

Grundannahmen seiner bisherigen mechanistischen Naturauffassung und ihrer empirischen Geltungsbasis festzuhalten: Er muß den für sie einst geforderten Wahrheitsanspruch aufgeben und sie als Hypothesen formulieren, die dem allgemeinen Streben der Wissenschaft nach einer vollständigen Naturerklärung nützlich sind.

Mit einer Revision seiner Wissenschaftsauffassung schafft er die hierfür erforderlichen Voraussetzungen. Ihre Liberalisierung läßt jetzt verschiedene, einander möglicherweise widersprechende Hypothesen über einen Gegenstandsbereich zu. Der Mechanismus steht dabei als ein Weltbild neben anderen, prinzipiell gleichberechtigten Naturauffassungen. So behält Helmholtz seine Atomvorstellung als Hypothese bei, entwickelt aus ihr in einem ebenso kühnen wie genialen Gedanken die Idee einer elektrischen Elementarladung und läßt sich in seinen elektro- und thermodynamischen Arbeiten von der Überzeugung leiten, daß bewegte unsichtbare Substanzen und mechanische Kräfte Ursache der beobachtbaren Phänomene seien.³⁸

Aber Helmholtz befindet sich in einer Situation, in der die begrenzte Erklärungskraft des dualen Mechanismus allgemein ins Bewußtsein getreten ist. Die größte Schwierigkeit und größte Herausforderung für die mechanistische Erklärung der Natur stellen die elektromagnetischen Erscheinungen dar. Helmholtz vermutet, daß die elektrischen Kräfte mit den chemischen Verwandtschafts Kräften "durchaus identisch" seien (Helmholtz 1903, Bd. 2: 289), und er beginnt, sich mit der Thermodynamik chemischer Prozesse zu beschäftigen.³⁹ Im Zusammenhang mit den sich daran anschließenden Untersuchungen führt er systematisch einen Typ der Phänomendeutung ein, der - am Vorbild der Mechanik orientiert - in jene Stellen einrückt, an denen Erklärungen nicht bzw. noch nicht gegeben werden können: die Analogiebildung zwischen mechanischen Modellen und nicht-mechanischen Phänomenen.

Dabei geht Helmholtz vom mechanischen Prinzip der kleinsten Wirkung aus, aus dem sich durch formale Umwandlungen die empirisch verifizierten Gesetze der Energieerhaltung, der Elektro- und der Thermodynamik ergeben sollen. Sein Vorgehen besteht darin, daß er für ein mechanisches Modell, dessen innere Struktur vollständig bekannt ist und das in seiner konkreten Form nichts mit atomaren Prozessen zu tun haben soll, bestimmte Bedingungen so

³⁸ Zu den mechanistischen Annahmen in Helmholtz' späteren elektrodynamischen Arbeiten vgl. Buchwald 1985: 234 ff. Zu seinen thermodynamischen Arbeiten vgl. Klein 1972 und Bierhalter 1981.

³⁹ Helmholtz 1882 ff., Bd. 2: 958 ff. und 979 ff., Bd. 3: 92 ff.

festlegt, daß sich die empirischen Gesetze ergeben, wenn in den Bewegungsgleichungen des Modells die mechanischen Variablen durch thermo- bzw. elektrodynamische Variablen ersetzt werden.⁴⁰ Die Ähnlichkeitsrelation der Analogie muß sich also keinesfalls auf innere Strukturen beziehen. Helmholtz beweist lediglich die (vielleicht nur kontingente) Vergleichbarkeit der mathematischen Form von empirischen Gesetzen mit derjenigen der Bewegungsgleichungen von mechanischen Modellen.

Im Ergebnis glaubt er gezeigt zu haben, daß sich aus dem Prinzip der kleinsten Wirkung alle wesentlichen empirischen Gesetze der Physik ableiten lassen. In der unabhängig von der Annahme bestimmter Ursachen erzielten mathematischen Vereinheitlichung sieht er den entscheidenden Fortschritt seines Verfahrens.⁴¹ Man könnte sagen, daß Helmholtz die auf Substanzen und Kräften basierende frühere Argumentation durch eine stärker phänomenologisch angelegte Betrachtung ersetzt. Die in den Gesetzen ausgedrückten Verhältnisbestimmungen faßt er weiterhin als ein Abbild der - allerdings nur noch hypothetisch angenommenen - Wirklichkeit auf. Ideengeschichtlich besteht zwischen dieser relationalen Widerspiegelungstheorie und Ludwig Wittgensteins späterer Abbildtheorie der Bedeutung eine enge Verwandtschaft.⁴²

Die Intentionen, die Helmholtz mit seiner Methode der Analogiebildung verfolgt, beschränken sich allerdings bei weitem nicht auf die formale Vereinheitlichung physikalischer Gesetze. Er selbst rechtfertigt sein Vorgehen unter anderem damit, daß Erklärungen vorläufig noch nicht verfügbar seien, und kann sein Vorgehen nicht erläutern, ohne beständig auf die Hypothese unsichtbarer Bewegungsursachen zurückzugreifen.⁴³ Die Bedingungen, die er für seine mechanischen Modelle festlegt, sollen gleichermaßen auch für die den Phänomenen zugrundeliegende Struktur gelten.⁴⁴ Seine Untersuchungen legen darüber hinaus die Vermutung nahe, die Ursachen selbst könnten rein mechanischer Natur sein. Daß die konkrete Form seiner Modelle nicht als Ursache in Frage kommen soll, schließt keinesfalls die Möglichkeit aus, daß die Ursachen nicht mechanisch sein könnten. Unausgesprochen nutzt Helmholtz vielmehr die Uneindeutigkeit mechanischer Modelle, die darin besteht, daß für eine gegebene mechanische Bewegungsgleichung die Anzahl mechanischer

⁴⁰ Helmholtz 1882 ff., Bd. 3: 132 ff. und 223 ff.

⁴¹ Helmholtz 1882 ff., Bd. 3: 210; Helmholtz 1900: 287.

⁴² Vgl. Majer 1985.

⁴³ Helmholtz 1882 ff., Bd. 3: 117 f., 135 f., 176 f. und 286; Helmholtz 1900: 286 u. ö.

⁴⁴ Helmholtz 1882 ff., Bd. 3: 128 ff.

Modelle prinzipiell unbeschränkt ist.⁴⁵ Damit eröffnet sich der Analogiebildung ein weites Experimentierfeld, um aus verschiedensten Modellen eine Vielfalt hypothetischer Erklärungen zu entwickeln.

Nicht Helmholtz, sondern sein Schüler Heinrich Hertz wird diesen Aspekt weiterer Relativierung des Mechanismus systematisch ausbauen. Den von Helmholtz noch aufrechterhaltenen Unterschied zwischen Modellbildung und Erklärung wird Hertz in seiner Wissenschaftstheorie ebenso beseitigen wie den Abbildungscharakter der Gesetze. Modelle müssen dann lediglich noch in ihren Voraussagen mit der Wirklichkeit übereinstimmen.⁴⁶ Was als leichte Lockerung des ursprünglich selbst verkündeten Wahrheitsanspruches bei Helmholtz begann, wird schon zu seinen Lebzeiten und noch ganz im Rahmen der mechanistischen Naturauffassung bei Hertz zu einem Verlust des Wirklichkeitsbezuges führen, wie er größer in der wissenschaftlichen Erkenntnis bis heute kaum denkbar ist.

Literatur:

- Bierhalter, Günther: Zu Hermann von Helmholtzens mechanischer Grundlegung der Wärmelehre aus dem Jahre 1884. *Archives for the History of Exact Sciences*, 25, 1981, 71 - 84.
- Buchwald, Jed Z.: *From Maxwell to Microphysics*. Chicago: 1985.
- Cahan, David: *Hermann von Helmholtz and the Foundation of Nineteenth-Century Science*. Berkeley/Los Angeles (California)/ London: 1993.
- Cassirer, Ernst: *Das Erkenntnisproblem in der Philosophie und Wissenschaft der neueren Zeit*. Vierter Band: Von Hegels Tod bis zur Gegenwart (1832 - 1932). Darmstadt: 1973.
- Conrat, Friedrich: *Hermann von Helmholtz' psychologische Anschauungen*. Halle: 1904.
- Diemer, Alwin: Die Begründung des Wissenschaftscharakters der Wissenschaft im 19. Jahrhundert - Die Wissenschaftstheorie zwischen klassischer und moderner Konzeption. In: Alwin Diemer (Hg.): *Beiträge zur Entwicklung der Wissenschaftstheorie im 19. Jahrhundert*. Meisenheim am Glan: 1968.

⁴⁵ Vgl. die Helmholtz vermutlich bekannte Bemerkung von Maxwell 1873, Bd. 2: 416, sowie den späteren Beweis Poincarés 1890: IX ff.

⁴⁶ Hertz 1894: 1 ff.

- Du Bois-Reymond, Emil: Ueber die Grenzen des Naturerkennens (1872). In: Ders.: *Vorträge über Philosophie und Gesellschaft*. Hamburg: 1974.
- Duhem, Pierre: *Ziel und Struktur der physikalischen Ideen* (franz. EA 1904 f.). Autorisierte Übersetzung von Friedrich Adler. Mit einem Vorwort von Ernst Mach. Nachdr. d. Aufl. von 1908. Hamburg 1978.
- Elkana, Yehuda: *The Discovery of the Conservation of Energy*. London: 1974.
- Erdmann, Benno: *Die philosophischen Grundlagen von Hermann von Helmholtz' Wahrnehmungstheorie* (Abh. Preuss. Akad., phil.-hist. Klasse, Nr. 1). Berlin: 1921.
- Fullinwider, S. P.: Hermann von Helmholtz: The Problem of the Kantian influence. In: *Stud. Hist. Phil. Sci.* 21, 1990, 41 - 55.
- Hatfield, Gary: *The Natural and the Normative. Theories of Spatial Perception from Kant to Helmholtz*. Cambridge (Mass.)/London: 1990.
- Heidelberger, Michael: Force, Law, and Experiment: The Evolution of Helmholtz's Philosophy of Science. In: Cahan (1993).
- Heimann, P. M.: Helmholtz und Kant: The Metaphysical Foundation of "Ueber die Erhaltung der Kraft". In: *Stud. Hist. Phil. Sci.*, 5, 1974, 205 - 38.
- Helm, Georg: *Die Energetik nach ihrer geschichtlichen Entwicklung*. Leipzig: 1898.
- Helmholtz, Hermann von: *Handbuch der physiologischen Optik*. Leipzig: 1856 ff.
- Helmholtz, Hermann von: *Das Denken in der Medicin*. Berlin: 1877.
- Helmholtz, Hermann von: *Wissenschaftliche Abhandlungen*. 3 Bde. Leipzig: 1882 ff.
- Helmholtz, Hermann von: *Vorträge und Reden* (1. Auflage 1884). 2 Bde. Braunschweig: 1903.
- Helmholtz, Hermann von: *Handbuch der physiologischen Optik*. 2. Auflage. Hamburg/Leipzig: 1885 ff.
- Helmholtz, Hermann von: Rede über die Entdeckungsgeschichte des Princips der kleinsten Action. In: Adolf Harnack (Hg.): *Geschichte der königl. preuss. Akademie der Wiss. zu Berlin*. Berlin: 1900, Bd. 2, S. 282 ff.
- Helmholtz, Hermann von: *Vorlesungen über theoretische Physik*. Hg. von Arthur König et al. 6 Bde. Leipzig: 1897 ff.
- Hertz, Heinrich: *Die Prinzipien der Mechanik*. Leipzig: 1894.
- Hörz, Herbert, und Siegfried Wollgast: Einleitung zu: *Hermann von Helmholtz, Philosophische Vorträge und Aufsätze*. Berlin: 1971.
- Kant, Immanuel: *Kants gesammelte Schriften*, hrsg. v. der Königlich Preussischen (später: Deutschen) Akademie der Wissenschaften (zu Berlin). Berlin: 1902 ff.
- Kirchhoff, Gustav: *Vorlesungen über Mechanik* (1. Auflage 1876). Leipzig: 1897.
- Klein, Martin J.: Mechanical Explanation at the End of the Nineteenth Century. In: *Centaurus* 17, 1972, S. 58 - 82.
- Koenigsberger, Leo: *Hermann von Helmholtz's Untersuchungen über die Grundlagen der Mathematik und der Mechanik*. Heidelberg: 1895.
- Koenigsberger, Leo: *Hermann von Helmholtz*. 3 Bde. Braunschweig: 1902 f.
- König, Gert: Der Wissenschaftsbegriff bei Helmholtz und Mach. In: Alwin Diemer (Hg.): *Beiträge zur Entwicklung der Wissenschaftstheorie im 19. Jahrhundert*. Meisenheim am Glan: 1968.
- Krause, Albrecht: *Kant und Helmholtz über den Ursprung und die Bedeutung der Raumschauung und der geometrischen Axiome*. Lahr: 1876.
- Lenoir, Timothy: *The strategy of life. Teleology and Mechanics in Nineteenth Century German Biology*. Dordrecht/Boston/ London: 1982.

- Mach, Ernst: *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*. Prag: 1872.
- Majer, Ullrich: Hertz, Wittgenstein und der Wiener Kreis. In: H.-J. Dahms (Hg.): *Philosophie, Wissenschaft und Aufklärung*. Berlin: 1985.
- Maxwell, James Clerk: *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 2. Vols., Oxford: 1873.
- Poincaré, Henri: *Electricité et Optique*. Paris: 1890.
- Poincaré, Henri: *Wissenschaft und Hypothese*. (franz. EA 1902, dt. Üb. 1904) Nachdruck der dritten, verb. Aufl. von 1914. Darmstadt: 1974.
- Popper, Karl: *Die Logik der Forschung* (1. Auflage 1934). Tübingen: 91989.
- Pulte, Helmut: Zum Niedergang des Euklidianismus in der Mechanik des 19. Jahrhunderts. In: *Neue Realitäten. XVI. Dt. Kongress für Philosophie*. Berlin: 1993, 833 ff.
- Schnädelbach, Herbert: *Philosophie in Deutschland 1831 - 1933*. Frankfurt: 1983.
- Schwertschläger, Joseph: *Kant und Helmholtz erkenntnistheoretisch verglichen*. Freiburg: 1883.
- Turner, R. Steven: Consensus and Controversy: Helmholtz on the Visual Perception of Space. In: Cahan (1993).
- Winters, Stephen M.: *Hermann von Helmholtz' Discovery of Force Conservation*. Diss. Baltimore: 1985.

Sonderdruck aus:

Universalgenie Helmholtz

Rückblick nach 100 Jahren

Herausgegeben
von Lorenz Krüger



Akademie Verlag