



HERMANN VON HELMHOLTZ

Philosophische und  
populärwissenschaftliche  
Schriften

Herausgegeben von  
Michael Heidelberger, Helmut Pulte  
und Gregor Schiemann

FELIX MEINER VERLAG | HAMBURG

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische  
Daten sind im Internet über <http://portal.dnb.de> abrufbar.  
ISBN 978-3-7873-2896-3 (3 Bände)  
ISBN eBook: 978-3-7873-2897-0

Zitervorschlag: HPPS I

Gedruckt mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

© Felix Meiner Verlag Hamburg 2017. Alle Rechte vorbehalten.  
Dies gilt auch für Vervielfältigungen, Übertragungen, Mikroverfilmungen  
und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen,  
soweit es nicht §§ 53 und 54 UrhG ausdrücklich gestatten.  
Satz: Da-TeX Gerd Blumenstein, Leipzig. Druck: Strauss, Mörtenbach.  
Bindung: Litges & Dopf, Heppenheim. Gedruckt auf alterungsbeständigem  
Werkdruckpapier (ANSI-Norm resp. DIN-ISO 9706), hergestellt aus  
100 % chlorfrei gebleichtem Zellstoff. Printed in Germany.

[www.meiner.de](http://www.meiner.de)

# Inhalt Band 1

## HERMANN VON HELMHOLTZ – LEBEN UND WERK

1. Helmholtz' Leben .....	XI
1.1 Potsdam und Berlin: Energieerhaltung, Biophysik .....	XI
1.2 Königsberg: Sinnesphysiologie, Zeichentheorie der Wahrnehmung, Erkenntnistheorie .....	XV
1.3 Bonn und Heidelberg: Weiterführung der Sinnesphysiologie .....	XXII
1.4 Heidelberg: Grundlagen der Geometrie, Wissenschaftspolitik .....	XXVII
1.5 Berlin: Elektrodynamik, Physikalisch-Technische Reichsanstalt .....	XXXII
2. Helmholtz' Werk und die <i>Philosophischen und</i> <i>populärwissenschaftlichen Schriften</i> .....	XXXVIII
2.1 Zum Werk: Wissenschaft, Philosophie, Popularisierung .....	XXXVIII
2.2 Zielsetzung und Textauswahl der Edition .....	XLIX
2.3 Hinweise zur Texteinrichtung .....	LII
2.4 Gesamtbibliographie .....	LIII
2.5 Danksagungen .....	LV
Auswahlbibliographie .....	LVI

## ZU LEBZEITEN VERÖFFENTLICHTE SCHRIFTEN

1 Einleitung zu »Ueber die Erhaltung der Kraft« .....	3
2 Ueber die Natur der menschlichen Sinnesempfindungen .....	10
3 Ueber Goethe's naturwissenschaftliche Arbeiten .....	27

4	Ueber die Wechselwirkung der Naturkräfte und die darauf bezüglichen neuesten Ermittlungen der Physik . . . . .	50
5	Anhang zu dem Vortrag »Ueber die Wechselwirkung der Naturkräfte« . . . . .	84
6	Ueber das Sehen des Menschen . . . . .	100
7	Ueber die physiologischen Ursachen der musikalischen Harmonie . . . . .	130
8	On the Application of the Law of the Conservation of Force to Organic Nature . . . . .	167
9	Ueber das Verhältniss der Naturwissenschaften zur Gesammtheit der Wissenschaft . . . . .	181
10	Ueber die Erhaltung der Kraft . . . . .	208
11	Lectures on the Conservation of Energy. . . . .	249
12	Eis und Gletscher . . . . .	318
13	Von den Wahrnehmungen im Allgemeinen. § 26 der ersten Auflage des »Handbuchs der Physiologischen Optik« . . . . .	355
14	Von den Wahrnehmungen im Allgemeinen. § 26 der zweiten Auflage des »Handbuchs der Physiologischen Optik« . . . . .	399
15	Ueber die thatsächlichen Grundlagen der Geometrie . . . . . Correctur zu dem Vortrag vom 22. Mai 1868 . . . . .	449 456
16	Die neueren Fortschritte in der Theorie des Sehens. . . . .	458
17	Ueber die Thatsachen, die der Geometrie zum Grunde liegen . . . . .	554
18	Ueber das Ziel und die Fortschritte der Naturwissenschaft . . . . .	576

**Inhalt Band 2**

## ZU LEBZEITEN VERÖFFENTLICHTE SCHRIFTEN

19	Ueber den Ursprung und die Bedeutung der geometrischen Axiome .....	607
20	The Axioms of Geometry.....	639
21	Vorrede zur Übersetzung von John Tyndalls »Faraday und seine Entdeckungen«.....	648
22	Zum Gedächtniss an Gustav Magnus .....	652
23	The Axioms of Geometry To the Editor of The Academy .....	668
24	Induction und Deduction .....	671
25	Recent Progress in the Theory of Electrodynamics .....	680
26	Ueber das Streben nach Popularisirung der Wissenschaft... ..	691
27	Zöllner contra Tyndall .....	704
28	Ueber die Entstehung des Planetensystems .....	719
29	Optisches über Malerei .....	756
30	Wirbelstürme und Gewitter .....	797
31	Das Denken in der Medicin.....	821
32	Ueber die akademische Freiheit der deutschen Universitäten .....	847
33	Ueber den Ursprung und Sinn der geometrischen Sätze; Antwort gegen Herrn Professor Land .....	867
34	Die Thatsachen in der Wahrnehmung .....	886
35	Beilagen zu dem Vortrag »Die Thatsachen in der Wahrnehmung«.....	919
36	Ueber die elektrischen Maasseinheiten nach den Berathungen des elektrischen Congresses, versammelt zu Paris 1881 .....	937
37	Die neuere Entwicklung von Faraday's Ideen über Elektrizität .....	953

38	Sir William Thomson's »Mathematical and Physical Papers« .....	996
39	Antwortrede gehalten beim Empfang der Graefe-Medaille zu Heidelberg 1886 .....	1006
40	Rede über die Entdeckungsgeschichte des Principis der kleinsten Action .....	1014
41	Zur Geschichte des Principis der kleinsten Action .....	1037
42	Josef Fraunhofer.....	1052
43	Zählen und Messen, erkenntnistheoretisch betrachtet ...	1063
44	Zur Erinnerung an R. Clausius.....	1095
45	Suggestion und Dichtung.....	1100
46	Bemerkungen über die Vorbildung zum akademischen Studium.....	1102
47	Erinnerungen.....	1114
48	Goethe's Vorahnungen kommender naturwissenschaftlicher Ideen .....	1130
49	Ansprache an Hrn. Emil du Bois-Reymond zur Feier seines fünfzigjährigen Doctorjubilaums am 11. Februar 1893 ...	1155
50	Einleitung zu den Vorlesungen über theoretische Physik (§§ 1–8) .....	1161
51	Heinrich Hertz.....	1182

### Inhalt Band 3

#### NACHGELASSENE SCHRIFTEN

52	Aufzeichnung über die Grundbegriffe der Mathematik und Physik .....	1197
53	Anatomievortrag .....	1206
54	Notiz zu den Axiomen der Geometrie .....	1214
55	Aufzeichnung zur Elektrodynamik .....	1215
56	Analyse des thatsächlich vorhandenen Wissens .....	1221

57	Zur Theorie der Anziehungen innerhalb magnetisierbarer oder dielektrischer Medien .....	1222
58	Nachträgliche Betrachtungen zur Faraday-Lecture .....	1224
59	Zur elektrodynamischen Theorie optischer Erscheinungen .....	1227
60	Gutachten über ein philosophisches Werk .....	1229
61	Geometrie-Gutachten .....	1230
62	Naturforscherrede .....	1231
63	Kundt-Grabrede .....	1239
64	Wie wissenschaftliche Entdeckungen zum Vorschein kommen .....	1241
65	Geschichte der Naturwissenschaften .....	1244
66	Über den hypothetischen Charakter des Kausalgesetzes ...	1252

## ANHANG

Gesamtbibliographie .....	1255
Deutschsprachige Veröffentlichungen von Hermann v. Helmholtz .....	1258
Englischsprachige Veröffentlichungen von Hermann von Helmholtz .....	1310
Französischsprachige Veröffentlichungen von Hermann von Helmholtz .....	1326
Personenverzeichnis .....	1337
Sachwortverzeichnis .....	1347



# Hermann von Helmholtz – Leben und Werk<sup>1</sup>

## 1. Helmholtz' Leben<sup>2</sup>

### *1.1 Potsdam und Berlin: Energieerhaltung, Biophysik*

Hermann Ludwig Ferdinand Helmholtz wurde am 31. August 1821 in Potsdam als ältestes von sechs Kindern geboren, von denen zwei früh verstarben. Der Vater Ferdinand war angesehener Professor für alte Sprachen am Potsdamer Gymnasium und weckte in seinem Sohn Begeisterung für die klassischen Bildungsideale. Helmholtz' Vater wäre, wie der Helmholtz-Biograph Leo Koenigsberger schreibt, »am liebsten seiner inneren Neigung folgend Philosoph geworden«<sup>3</sup>. Er war mit dem Sohn des Philosophen Johann Gottlieb Fichte befreundet, der mit ihm studiert hatte und Pate von Hermann wurde. Das Interesse des jungen Hermann an erkenntnistheoretischen Fragen war, wie er später schrieb, dadurch geweckt worden, dass er seinen Vater, »der einen tiefen Eindruck von Fichte's Idealismus behalten hatte, mit Collegen, die Hegel oder Kant verehrten, oft habe streiten hören«<sup>4</sup>. Aus einem bis in das letzte Lebensjahr des Vaters (1859) teilweise intensiv geführten Briefwechsel geht hervor, dass dieser seinen Sohn vergeblich von der Philosophie Fichtes zu überzeugen versuchte.<sup>5</sup> Helmholtz' Mutter Karoline, geb. Penne, war die Tochter eines Hannoverschen Artillerieoffiziers, der

<sup>1</sup> Die zitierte Sekundärliteratur ist in der Auswahlbibliographie am Ende dieser Einleitung enthalten. Die Kürzel zu Helmholtz-Texten beziehen sich auf die am Ende der Ausgabe befindliche Gesamtbibliographie. Ist dabei einer Jahreszahl ein E vorangestellt, findet sich der fragliche Eintrag in der Bibliographie der englischsprachigen, bei einem F in der Bibliographie der französischsprachigen Titel. Mit ›S.‹ gekennzeichnete Seitenverweise im laufenden Text oder in den Anmerkungen beziehen sich auf die Paginierung dieser Ausgabe.

<sup>2</sup> Quellen für Helmholtz' Biographie sind vor allem: Cahan 1993c, Du Bois-Reymond 1896, Helmholtz, A. v. 1929, Helmholtz' »Erinnerungen« von 1891, in dieser Ausgabe S.1114 ff., Kirsten 1986, Koenigsberger 1902/03, Kremer 1990 und Turner 1972.

<sup>3</sup> Koenigsberger 1902/03 I, 1.

<sup>4</sup> In dieser Ausgabe S.1126.

<sup>5</sup> Was von dem Briefwechsel bis heute aufgefunden worden ist, ist in Helmholtz 1993a und Koenigsberger 1902/03, S.285–293 dokumentiert.

in gerader Linie von William Penn, dem Gründer des Staates Pennsylvania in den USA, abstammte. Die Vorfahren mütterlicherseits waren französische Glaubensflüchtlinge.

Helmholtz' Interesse für Physik und Mathematik entwickelte sich schon während seiner Schulzeit: Zu Hause standen ihm die naturwissenschaftlichen und mathematischen Bücher aus der Bibliothek seines Vaters zur Verfügung, der in den oberen Klassen manchmal auch Mathematik und Physik unterrichten musste, und er versuchte sich in optischen und anderen Experimenten. Es reifte in ihm der Entschluss, nach dem Abitur Physik zu studieren. Da jedoch die Mittel seiner Eltern zur Finanzierung eines solchen Studiums nicht ausreichten, vermittelte ihn ein verwandter Oberstabsarzt an die sogenannte »Pepinière«, das *Königlich medizinisch-chirurgische Friedrich-Wilhelms-Institut* in Berlin, in dem vielversprechende junge Kandidaten auf Staatskosten zu Medizinern ausgebildet wurden. Die Bedingung dafür war, nach dem Studium für mehrere Jahre als Arzt an der Charité und in der preußischen Armee zu dienen.

Die Zöglinge der Militäranstalt besuchten die normalen Vorlesungen der medizinischen Fakultät der Universität. Helmholtz hörte dort auch bei Johannes Müller, dem bedeutendsten Physiologen seiner Zeit, der über die physikalisch-chemischen Ursachen des Lebens forschte und ihn nachhaltig beeinflusste. Im Kreis der Schüler von Müller traf Helmholtz auch die späteren Physiologen Ernst Brücke und Emil Du Bois-Reymond, mit denen er zeitlebens freundschaftlich und wissenschaftlich verbunden blieb.<sup>6</sup> Sie teilten mit ihm das Interesse an der Physik und scharten sich gemeinsam um den Physikprofessor Gustav Magnus, dessen Nachfolger Helmholtz später in Berlin werden sollte. Helmholtz hatte seinen Studiengenossen eine besondere Neigung für Mathematik voraus, in der er sich durch die Lektüre klassischer mathematischer Werke des 18. und frühen 19. Jahrhunderts autodidaktisch weiterbildete.

Nach seiner Promotion 1842 trat er seinen Dienst als Militärarzt an – zuerst an der Charité, dann beim *Königlichen Garde-Husaren-Regiment* in Potsdam, wo er bis 1848 blieb. In diese Zeit fiel die Abfassung des Artikels für Müllers »Archiv« unter dem Titel »Über das Wesen

<sup>6</sup> Zur Berliner Gruppe der Physiologie um Helmholtz und E. Du Bois-Reymond und dessen mechanistischer Orientierung vgl. Pulte 2015a.

der Fäulnis und Gärung«, in dem er sich gegen die damals noch verbreitete Auffassung von der Urzeugung des Lebens wandte. Helmholtz' frühe Arbeiten zeugen von seiner Auseinandersetzung mit dem Vitalismus und sind durch das Bemühen gekennzeichnet, den Bereich zu definieren, in dem Lebenskräfte prinzipiell auszuschließen sind.<sup>7</sup> Die Beziehungen zu seinen Freunden in Berlin pflegte er weiterhin. 1845 gründeten Mitglieder der Kreise um Magnus und Müller die *Physikalische Gesellschaft zu Berlin*, die 1899 in *Deutsche Physikalische Gesellschaft* umbenannt wurde und heute die weltweit größte Vereinigung von Physikern darstellt. In dieser Gesellschaft, der er auf Vermittlung von Du Bois-Reymond noch im Gründungsjahr beitrug und in der er Werner von Siemens kennenlernte, trug Helmholtz am 23. Juli 1847 seine epochemachende Abhandlung *Über die Erhaltung der Kraft* vor.<sup>8</sup> Helmholtz selber beschreibt später in seinen »Erinnerungen« die Schwierigkeit, den anwesenden »physikalischen Autoritäten« den Erhaltungsgedanken nahezubringen.<sup>9</sup>

Man kann diese frühe Abhandlung von Helmholtz sowie die Einleitung Du Bois-Reymonds zu seinen *Untersuchungen über thierische Elektrizität* (1848) als die Programmschriften der Biophysik oder – wie

<sup>7</sup> Helmholtz 1843a und Helmholtz 1845a. Für die Beurteilung von Helmholtz' früher Stellung zum Vitalismus ist seine sehr differenziert geführte Auseinandersetzung mit Justus von Liebig von großer Bedeutung, vgl. dazu Kremer 1990 und Lipman 1966.

<sup>8</sup> Der vollständige Titel lautet: *Über die Erhaltung der Kraft: Eine physikalische Abhandlung, vorgetragen in der Sitzung der physikalischen Gesellschaft zu Berlin am 23. Juli 1847* (Helmholtz 1847a bzw. 1889b, 1902d, 1907a, 1915a, 1966c, 1982a, 1982b, 1983b, 1996a, 1999a und 2011a).

<sup>9</sup> Vgl. hierzu S. 1120. Nach Helmholtz' Darstellung wurde seine Leitidee der Energieerhaltung nur von dem Mathematiker C. G. J. Jacobi anerkannt (s. hierzu Jacobi 1996 und Pulte 1994). Selbst Magnus wandte sich gegen die Art, wie Helmholtz experimentelle und mathematische Physik in seiner Arbeit miteinander verbunden hatte. Der mit Magnus befreundete Herausgeber der führenden »Annalen der Physik«, der Physiker Johann Christian Poggendorff, lehnte die Arbeit als zu theoretisch und zu wenig experimentell verankert ab, sodass sie als selbständige Veröffentlichung erscheinen musste (Koenigsberger 1902/03 I, 79). Zum Energieerhaltungsprinzip bei Helmholtz und im weiteren Kontext des 19. Jahrhunderts s. Breger 1982, Cahan 2012a und b, Harman 1982a, Winters 1985 und Schiemann 1997b, Kap. B.II.1. Vgl. auch Helmholtz 1871b, Beitrag d) bzw. 1971a, Beitrag f) sowie Helmholtz 1873a, E1853a, E1861a und E1864a.

Helmholtz sie nannte – der »jungen physiologischen Schule *J. Müller's* in Berlin, der ich selber angehörte«<sup>10</sup>, bezeichnen. Diese Schule vertrat die weitestgehende Reduktion der organischen Welt auf die Gesetze der Physik und Chemie, genauer: auf die Gesetze der Mechanik. Helmholtz wollte mit seiner Arbeit nachweisen, dass die mechanische Kraft eines Organismus und die in ihm erzeugte Wärme vollständig aus dem Stoffwechsel hergeleitet werden können.

Helmholtz fasste das Problem in ganz allgemeiner Form. Er sah es als Ziel der Naturwissenschaft an, die Naturerscheinungen zurückzuführen auf Bewegungen von Materie mit »unveränderlichen Bewegungskräften, welche nur von den räumlichen Verhältnissen abhängig sind« (S. 6) und insbesondere nicht von der Zeit oder Geschwindigkeit. Helmholtz glaubte, wenn diese Bedingung nicht erfüllt sei, gäbe es eine endlich große maximale Arbeitskraft, die aus einem System von »Naturkörpern« gewonnen werden kann. Sei sie nicht erfüllt, wenn also die zugrundeliegenden Kräfte zeit- oder geschwindigkeitsabhängig bzw. keine Zentralkräfte wären, könne Bewegungskraft aus Nichts entstehen oder für immer verloren gehen; es wäre also ein *perpetuum mobile* möglich.<sup>11</sup> Anknüpfend an die Tradition der »Erhaltung der lebendigen Kraft« in der Mechanik nahm Helmholtz eine Unterteilung vor, die der heutigen Differenz von kinetischer (»lebendige Kraft«) und potentieller Energie (»Spannkraft«) entspricht und brachte den Sachverhalt so zum Ausdruck: »In allen Fällen der Bewegung freier materieller Punkte unter dem Einfluss ihrer anziehenden und abstossenden Kräfte [...] ist der Verlust an Quantität der Spannkraft stets gleich dem Gewinn an lebendiger Kraft, und der Gewinn der ersteren dem Verlust der letzteren.

<sup>10</sup> S. Königsberger 1902/1903 III, 30. Bernfeld 1944 spricht von der »School of Helmholtz«, Cranefield 1957 von »organic physics of 1847« und 1966b vom »biophysical movement of 1847«. Vgl. auch Bernfeld 1981 und Cranefield 1966a.

<sup>11</sup> Das ist nicht einmal für mechanische Systeme richtig, denn Energieerhaltung gilt innerhalb eines Systems punktförmiger Massen, wenn die Kräfte konservativ und die Potentiale nur von den Entfernungen zwischen den Punkten abhängig sind. Kräfte, die nicht zeit- oder geschwindigkeitsabhängig sind, stellen nur eine besondere Klasse der energieerhaltenden Kräfte dar. Erst in den *Vorlesungen über theoretische Physik* findet sich eine korrekte Ableitung der mechanischen Erhaltungssätze des Impulses, des Drehimpulses und der Energie für Punktmassensysteme (vgl. Helmholtz 1898a, I.2, 147 ff.).

*Es ist also stets die Summe der vorhandenen lebendigen und Spannkräfte konstant.*<sup>12</sup>

Mit dieser Formulierung ist die Möglichkeit eröffnet, die verschiedenen Formen der Kräfte in den unterschiedlichen Zweigen der Physik in Bezug auf ihr mechanisches Äquivalent miteinander zu vergleichen. Folgerichtig stellt Helmholtz im Rest seiner Abhandlung das »Kraftäquivalent« der Mechanik, der Wärme, der elektrischen Vorgänge, des Magnetismus, des Elektromagnetismus fest und schließt mit Bemerkungen über die »Naturprozesse[...] der organischen Wesen«.<sup>13</sup> Hier fehlten zwar, wie er einräumt, noch Informationen zum Vergleich der Kraftäquivalente und auch die Chemie müsse mit einbezogen werden. Aber es ist unübersehbar, dass Helmholtz sein Gesetz als Heuristik für die zukünftige Entwicklung der Physiologie verstanden wissen wollte.

Die Abhandlung fand erst verzögert Anerkennung. William Thomson, der spätere Lord Kelvin, und andere britische Physiker formulierten Helmholtz' Gesetz der »Constanz der Kraft« als »Energieerhaltungssatz« um.<sup>14</sup> Nach dieser Fassung besagt Helmholtz' obengenannte Beziehung die Konstanz der Summe aus potentieller und kinetischer Energie – eine Formulierung, die heute noch gültig ist. Thomson gebrauchte den Ausdruck »Energie« ab ca. 1849 und der schottische Ingenieur William J. M. Rankine führte 1851 den Begriff der »potentiellen Energie« ein. Helmholtz hatte von »Energie« bisher nur in physiologischen Zusammenhängen gesprochen (»spezifische Sinnesenergie«, »Energie des Muskels«) und eignete sich erst ab ca. 1858 nach und nach die englische Sprech- und Denkweise von »Energie« für die Physik an.

### *1.2 Königsberg: Sinnesphysiologie, Zeichentheorie der Wahrnehmung, Erkenntnistheorie*

Nach einer kurzen Anstellung als Anatomielehrer an der Berliner Kunstakademie wurde Helmholtz 1849 als Nachfolger von Ernst Wilhelm von Brücke außerordentlicher Professor der Physiologie in Königsberg. Kurz vor Antritt seiner Stelle heiratete er seine Verlobte

<sup>12</sup> Helmholtz 1882a I, 25 (Hervorhebung im Text).

<sup>13</sup> Helmholtz 1882a I, 65

<sup>14</sup> Vgl. für das Folgende Cahan 2012a, 5 ff.

Olga von Velten (1827–1859), die jüngere Tochter eines Oberstabsarztes. Aus dieser Ehe gingen die Tochter Catharina (1850–1878, später verheiratete Branco) und der Sohn Richard (1852–1934, später Ingenieur und Konstrukteur von Dampflokomotiven) hervor. In Königsberg bestimmte Helmholtz erstmals die Nervenleitgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit der Fortpflanzung eines Nervenimpulses im Nerv, indem er den Zeitunterschied zwischen der Reizung und der dadurch ausgelösten Zuckung eines Froschschenkels maß.<sup>15</sup> Sowohl bei der theoretischen Konzeption des Experiments als auch bei der erforderlichen technischen Beherrschung kleinster Zeitdimensionen zeigte er sich als hervorragender und geschickter Experimentator.

Auch diese Arbeit stieß anfänglich auf einige Skepsis. Sein Lehrer Johannes Müller hatte noch sechs Jahre früher die Meinung vertreten, man werde wohl nie die Mittel besitzen, die Geschwindigkeit der Fortleitung von Erregungen im Nerv zu messen, da die dafür nötige Zeit unendlich klein sei.<sup>16</sup> Nach Helmholtz' Messungen ist die Geschwindigkeit der Fortleitung einer Erregung mehr als zehnmals kleiner als die Schallgeschwindigkeit in der Luft. In einer populärer gehaltenen Nachfolgearbeit von 1851 verglich Helmholtz erstmals die Nervenfasern mit »elektrischen Telegraphendrähten«, die »augenblicklich jede Nachricht von den äussersten Grenzen her dem regierenden Centrum [also dem Gehirn] zuführen, und dann ebenso dessen Willensmeinung nach jedem einzelnen Theile des Ganzen zurückbringen, um daselbst in Ausführung zu kommen.«<sup>17</sup> Nach Meinung von Helmholtz haben also Nerven keinen Einfluss auf das, was sie fortleiten. Helmholtz' Experiment revolutionierte bis in unsere Zeit die Experimentierpraxis in den Lebenswissenschaften und setzte neue hohe Maßstäbe für ihre Genauigkeit. Auch die Konzentration auf zeitliche Aspekte war richtungsweisend: Bis heute zieht die Neurophysiologie neben bildgebenden Verfahren vor allem aus zeitlichen Messungen Rückschlüsse auf die innere Beschaffenheit des Gehirns und die beteiligten Mechanismen.

Helmholtz widmete sich nun verstärkt sinnesphysiologischen Untersuchungen und erfand 1850 den Augenspiegel, mit dem man auf

<sup>15</sup> Helmholtz 1850a = 1883a, 764–843. Vgl. Schmidgen 2009.

<sup>16</sup> Vgl. Koenigsberger 1902/03 I, 118 f.

<sup>17</sup> Helmholtz 1851b oder c, 181 = 1883a, 873. Die Analogie stammt ursprünglich wohl von Emil Du Bois-Reymond; vgl. Kirsten 1986, 111.

Grund eines einfachen Prinzips den Augenhintergrund des Menschen durch die Pupille hindurch betrachten kann. Diese Vorrichtung, die Helmholtz sehr populär machte, eröffnete den Augenärzten eine neue Welt ungeahnter Möglichkeiten und brachte ihrem Erfinder viel Ruhm ein.<sup>18</sup> »Für meine äussere Stellung vor der Welt«, schrieb Helmholtz später, »war die Construction des Augenspiegels sehr entscheidend.« (S. 1122)

Außerdem kam ein Interesse an der Farbentheorie hinzu. Anfänglich glaubte er, Thomas Youngs Theorie des Farbensehens experimentell widerlegt zu haben. Dann aber wurde er zu ihrem größten Verfechter und Fortsetzer, sodass man heute von der Young-Helmholtz-Theorie der Farben spricht. Diese Theorie nimmt an, dass es im Auge dreierlei auf die Grundfarben Rot, Grün und Violett ansprechende Arten von Nervenrezeptoren gibt. Alle anderen Farben sind als Mischungen dieser drei Grundfarben anzusehen. Helmholtz fand heraus, dass man eine größere Sättigung der Grundfarben annehmen muss, als sie uns jemals in der Empfindung gegeben ist. Jedes Licht in den Grundfarben, und mag es noch so sehr gesättigt erscheinen, stimuliert nämlich (wenigstens in einem geringen Ausmaß) die beiden anderen Rezeptoren mit.

Helmholtz zeigte 1855, wie das Auge akkommodiert, d. h. sich auf das Sehen verschiedener Entfernungen einstellt.<sup>19</sup> Bisher untersuchte man zum Studium der Akkommodation fast immer direkt das Auge und stellte verschiedene Hypothesen über Gestaltveränderungen oder Verschiebungen des Augapfels auf. Helmholtz ging indirekt vor und maß mit dem von ihm erfundenen Ophthalmometer, wie sich die von der Hornhaut und der Vorder- und Rückseite der Linse erzeugten Spiegelbilder des einfallenden Lichts im Instrument während der Akkommodation

<sup>18</sup> Auch die diesbezügliche Veröffentlichung gehört noch zu Helmholtz' frühen Schriften: »Beschreibung eines Augenspiegels zur Untersuchung der Netzhaut im lebenden Auge« (Helmholtz 1851a). Helmholtz bemerkt rückblickend, dass er zu dieser Entdeckung bei der Vorbereitung einer seiner Königsberger Vorlesungen zur Allgemeinen Pathologie und Physiologie gelangte: »Bei der Vorbereitung zur Vorlesung stiess ich nämlich zunächst auf die Möglichkeit des Augenspiegels [...]. Der Augenspiegel ist wohl die populärste meiner wissenschaftlichen Leistungen geworden, aber ich habe schon den Augenärzten berichtet, wie dabei das Glück eigentlich eine unverhältnissmässig grössere Rolle gespielt hat, als mein Verdienst« (S. 1121 f.). Zum physiologischen Kontext dieser Entdeckung vgl. Lenoir 1993.

<sup>19</sup> Helmholtz 1855d.

des Auges verändern. Diese Messungen genügten, um nachzuweisen, dass es die Linse des Auges ist, die sich bei Akkommodation durch den (von Brücke kurz zuvor aufgefundenen) Ziliarmuskel in ihrer Gestalt verändert: Die Konvexität der elastischen Linse nimmt durch Kontraktion des Muskels zu, je näher das betrachtete Objekt dem Auge ist.

Seine Sinnesphysiologie führte Helmholtz aber nicht nur zu einer ausgearbeiteten Sehtheorie und neuen wissenschaftlich-medizinischen Instrumenten, sondern trug auch zur Formulierung eines eigenen Ansatzes in der Erkenntnistheorie, der sogenannten Zeichentheorie der Wahrnehmung, bei. Diese empirische Wahrnehmungstheorie entfaltete er in den Vorträgen und Vorlesungen »Ueber die Natur der menschlichen Sinnesempfindungen« (1854), »Ueber das Sehen des Menschen« (1855), »Ueber die physiologischen Ursachen der musikalischen Harmonie« (1857), »Die neueren Fortschritte in der Theorie des Sehens« (1868), »Die Thatsachen in der Wahrnehmung« (1878) bis hin zu den Ausführungen »Von den Wahrnehmungen im Allgemeinen«<sup>20</sup> in der postum erschienenen Überarbeitung des *Handbuchs der Physiologischen Optik* (1896).

Empfindungen, die in uns durch äußere Einwirkungen auf unsere Sinnesorgane erzeugt werden, sind keine (ähnlichkeitserhaltenden) Abbildungen, sondern bloße Zeichen oder Symbole, die wir von den äußeren Objekten empfangen und über die wir zu objektiver Erkenntnis der Realität nur gelangen können, wenn wir die Gesetzlichkeit der Verursachung der Empfindungen durch äußere Objekte unterstellen und deren Regelcharakter – unter Einbeziehung der Struktur unserer eigenen physiologischen Wahrnehmungsapparatur – entschlüsseln: »Da Gleiches in unserer Empfindungswelt durch gleiche Zeichen angezeigt wird, so wird der naturgesetzlichen Folge gleicher Wirkungen auf gleiche Ursachen auch eine ebenso regelmäßige Folge im Gebiete unserer Empfindungen entsprechen« (S. 894). Helmholtz verbindet diese Zeichentheorie mit einer psychologischen Theorie der unbewussten Schlüsse über Existenz, Art und Lokalisation äußerer Objekte.<sup>21</sup>

<sup>20</sup> Helmholtz 1854c, 1855a, 1865b, Beitrag d), 1868c und 1896b.

<sup>21</sup> Zu Helmholtz' empirisch-psychologischer Wahrnehmungstheorie im Einzelnen vgl. neben den frühen Beiträgen von Erdmann 1921, Riehl 1921, Schwertschlagel 1883 und Stumpf 1895 die neueren Analysen Hatfield 1990, Heidelberger 1993b, 1994 und 1995a, 1995b sowie Schiemann 1997b, Kap. B II.3.



ZU LEBZEITEN VERÖFFENTLICHTE SCHRIFTEN



## [1] Einleitung zu »Ueber die Erhaltung der Kraft«

- 1847 Vortrag, gehalten in der Sitzung der physikalischen Gesellschaft zu Berlin am 23. Juli.  
Erstveröffentlichung: *Über die Erhaltung der Kraft, eine physikalische Abhandlung*, Berlin: G. Reimer.
- 1853 Englische Übersetzung von J. Tyndall: »On the Conservation of Force; a Physical Memoir«, in: *Scientific Memoirs*, Bd. »Natural Philosophy«, J. Tyndall und W. Francis (Hg.), London: Taylor and Francis, S. 114–162.
- 1869 Französische Übersetzung von L. Pérard: »Mémoire sur la conservation de la force«, in: *Sur la conservation de la force, précédé d'un exposé élémentaire de la transformation des forces naturelles*, Paris: Masson, S. 57–137 (»Introduction«, S. 57–63).
- 1882 Neudruck mit Zusätzen und Vorlage für diesen Abdruck: »Ueber die Erhaltung der Kraft«, in: *Wissenschaftliche Abhandlungen*, Bd. I, Leipzig: J. A. Barth, S. 12–17 und 68–70.

### | Ueber die Erhaltung der Kraft. Eine physikalische Abhandlung.

| 12

#### *Einleitung.*

Vorliegende Abhandlung musste ihrem Hauptinhalte nach hauptsächlich für Physiker bestimmt werden, ich habe es daher vorgezogen, die Grundlagen derselben unabhängig von einer philosophischen Begründung rein in der Form einer physikalischen Voraussetzung hinzustellen, deren Folgerungen zu entwickeln und dieselben in den verschiedenen Zweigen der Physik mit den erfahrungsmässigen Gesetzen der Naturerscheinungen zu vergleichen. Die Herleitung der aufgestellten Sätze kann von zwei Ausgangspunkten angegriffen werden, entweder von dem Satze, dass es nicht möglich sein könne, durch die Wirkungen irgend einer Combination von Naturkörpern auf einander in das Unbegrenzte Arbeitskraft zu gewinnen, oder von der Annahme, dass alle Wirkungen in der Natur zurückzuführen seien auf anziehende und abstossende Kräfte, deren Intensität nur von der Entfernung der auf

einander wirkenden Punkte abhängt. Dass beide Sätze identisch sind, ist im Anfange der Abhandlung selbst gezeigt worden. Indessen haben dieselben noch eine wesentlichere Bedeutung für den letzten und eigentlichen Zweck der physikalischen Naturwissenschaften überhaupt, welchen ich in dieser abgesonderten Einleitung darzulegen versuchen |<sup>13</sup> werde. |

Aufgabe der genannten Wissenschaften 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. Diese Regeln, z. B. das Gesetz der Brechung oder Zurückwerfung des Lichts, das von Mariotte und Gay Lussac für das Volumen der Gasarten, sind offenbar nichts als allgemeine Gattungsbegriffe, durch welche sämtliche dahin gehörige Erscheinungen umfasst werden. Die Aufsuchung derselben ist das Geschäft des experimentellen Theils unserer Wissenschaften. Der theoretische Theil derselben sucht dagegen, die unbekanntenen Ursachen der Vorgänge aus ihren sichtbaren Wirkungen zu finden; er sucht dieselben zu begreifen nach dem Gesetze der Causalität.<sup>1</sup> Wir werden genöthigt und berechtigt zu diesem Geschäft durch den Grundsatz, dass jede Veränderung in der Natur eine zureichende Ursache haben *müsse*. Die nächsten Ursachen, welche wir den Naturerscheinungen unterlegen, können selbst unveränderlich sein oder veränderlich; im letzteren Falle nöthigt uns derselbe Grundsatz nach anderen Ursachen wiederum dieser Veränderung zu suchen, und so fort, bis wir zuletzt zu letzten Ursachen gekommen sind, welche nach einem unveränderlichen Gesetz wirken, welche folglich zu jeder Zeit unter denselben äusseren Verhältnissen dieselbe Wirkung hervorbringen. Das endliche Ziel der theoretischen Naturwissenschaften ist also, die letzten unveränderlichen Ursachen der Vorgänge in der Natur aufzufinden. Ob nun wirklich alle Vorgänge auf solche zurückzuführen seien, 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, ist hier nicht der Ort zu entscheiden; 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

<sup>1</sup> Siehe Zusatz 1. [Im Anschluß an diesen Text abgedruckt, S. 8.]

unwiderlegliche Facta zur Anerkenntniss ihrer Schranken genöthigt sein sollte. |

| 14

Die Wissenschaft betrachtet die Gegenstände der Aussenwelt nach zweierlei Abstractionen: einmal ihrem blossen Dasein nach, abgesehen von ihren Wirkungen auf andere Gegenstände oder unsere Sinnesorgane; als solche bezeichnet sie dieselben als *Materie*. Das Dasein der Materie an sich ist uns also ein ruhiges, wirkungsloses; wir unterscheiden an ihr die räumliche Vertheilung und die Quantität (Masse), welche als ewig unveränderlich gesetzt wird. Qualitative Unterschiede dürfen wir der Materie an sich nicht zuschreiben, denn wenn wir von verschiedenartigen Materien sprechen, so setzen wir ihre Verschiedenheit immer nur in die Verschiedenheit ihrer Wirkungen[,] d. h. in ihre Kräfte. Die Materie an sich kann deshalb auch keine andere Veränderung eingehen, als eine räumliche, d. h. Bewegung. Die Gegenstände der Natur sind aber nicht wirkungslos, ja wir kommen überhaupt zu ihrer Kenntniss nur durch die Wirkungen, welche von ihnen aus auf unsere Sinnesorgane erfolgen, indem wir aus diesen Wirkungen auf ein Wirkendes schliessen. Wenn wir also den Begriff der Materie in der Wirklichkeit anwenden wollen, so dürfen wir dies nur, indem wir durch eine zweite Abstraction demselben wiederum hinzufügen, wovon wir vorher abstrahiren wollten, nämlich das Vermögen Wirkungen auszuüben, d. h. indem wir derselben Kräfte zuertheilen. 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 übri- ge Natur gleichgültig, weil sie nie eine Veränderung in dieser oder in unseren Sinnesorganen bedingen könnte; eine reine Kraft wäre etwas, was dasein sollte und doch wieder nicht dasein, weil wir das Daseiende Materie nennen. Ebenso fehlerhaft ist es, die Materie für etwas Wirkliches, die Kraft für einen blossen Begriff erklären zu wollen, dem nichts Wirkliches entspräche; beides sind vielmehr Abstractionen von dem Wirklichen, in ganz gleicher Art gebildet; wir können ja die Materie eben nur durch ihre Kräfte, nie an sich selbst, wahrnehmen.

Wir haben oben gesehen, dass die Naturerscheinungen auf unveränderliche letzte Ursachen zurückgeführt werden sollen; diese Forderung gestaltet sich nun so, dass als letzte Ursachen der Zeit nach unveränderliche Kräfte gefunden werden sollen. | Materien mit unveränderlichen Kräfte-  
(unvertilgbaren Qualitäten) haben wir in der Wissenschaft  
(chemische) Elemente genannt. Denken wir uns aber das Weltall zer-

| 15

legt in Elemente mit unveränderlichen Qualitäten, so sind die einzigen noch möglichen Aenderungen in einem solchen System räumliche, d. h. Bewegungen, und die äusseren Verhältnisse, durch welche die Wirkung der Kräfte modificirt wird, können nur noch räumliche sein, also die Kräfte nur Bewegungskräfte, abhängig in ihrer Wirkung nur von den räumlichen Verhältnissen.

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

Bewegung ist Aenderung der räumlichen Verhältnisse. Räumliche Verhältnisse sind nur möglich gegen abgegrenzte Raumgrößen, nicht gegen den unterschiedslosen leeren Raum. Bewegung kann deshalb in der Erfahrung nur vorkommen als Aenderung der räumlichen Verhältnisse wenigstens zweier materieller Körper gegen einander; Bewegungskraft, als ihre Ursache, also auch immer nur erschlossen werden für das Verhältniss mindestens zweier Körper gegen einander, sie ist also zu definiren als das Bestreben zweier Massen, ihre gegenseitige Lage zu wechseln. Die Kraft aber, welche zwei ganze Massen gegen einander ausüben, muss aufgelöst werden in die Kräfte aller ihrer Theile gegen einander; die Mechanik geht deshalb zurück auf die Kräfte der materiellen Punkte, d. h. der Punkte des mit Materie gefüllten Raumes.<sup>2</sup> Punkte haben aber keine räumliche Beziehung gegen einander als ihre Entfernung, denn die Richtung ihrer Verbindungslinie kann nur im Verhältniss gegen mindestens noch zwei andere Punkte bestimmt werden. Eine Bewegungskraft, welche sie gegen einander ausüben, kann deshalb auch nur Ursache zur Aenderung ihrer Entfernung sein, d. h. eine anziehende oder abstossende. Dies folgt auch sogleich aus dem Satz vom zureichenden Grunde. Die Kräfte, welche zwei Massen auf einander ausüben, müssen nothwendig ihrer Grösse und Richtung nach  
 |<sup>16</sup> bestimmt sein, | sobald die Lage der Massen vollständig gegeben ist. Durch zwei Punkte ist aber nur eine einzige Richtung vollständig gegeben, nämlich die ihrer Verbindungslinie; folglich müssen die Kräfte, welche sie gegen einander ausüben, nach dieser Linie gerichtet sein, und ihre Intensität kann nur von der Entfernung abhängen.

<sup>2</sup> Siehe Zusatz 2. [Im Anschluß an diesen Text abgedruckt, S. 8.]

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. Die Lösbarkeit dieser Aufgabe ist zugleich die Bedingung der vollständigen Begreiflichkeit der Natur. Die rechnende Mechanik hat bis jetzt diese Beschränkung für den Begriff der Bewegungskraft nicht angenommen, einmal weil sie sich über den Ursprung ihrer Grundsätze nicht klar war, und dann, weil es ihr darauf ankommt, auch den Erfolg zusammengesetzter Bewegungskräfte berechnen zu können in solchen Fällen, wo die Auflösung derselben in einfache noch nicht gelungen ist. Doch gilt ein grosser Theil ihrer allgemeinen Principien der Bewegung zusammengesetzter Systeme von Massen nur für den Fall<sup>3</sup>, dass dieselben durch unveränderliche anziehende oder abstossende Kräfte auf einander wirken; nämlich das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten, das von der Erhaltung der Bewegung des Schwerpunktes, von der Erhaltung der Hauptrotations-ebene und des Moments der Rotation freier Systeme, das von der Erhaltung der lebendigen Kraft. Für irdische Verhältnisse finden von diesen Principien hauptsächlich nur das erste und letzte Anwendung, weil sich die anderen nur auf vollkommen freie Systeme beziehen, das erste ist wieder, wie wir zeigen werden, ein specieller Fall des letzteren, welches deshalb als die allgemeinste und wichtigste Folgerung der gemachten Herleitung erscheint.

Die theoretische Naturwissenschaft wird daher, wenn sie nicht auf halbem Wege des Begreifens stehen bleiben will, ihre Ansichten mit der aufgestellten Forderung über die Natur der einfachen Kräfte und deren Folgerungen in Einklang setzen | müssen. Ihr Geschäft wird vollendet sein, 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. | 17

<sup>3</sup> Besser: »ist zu beweisen nur für den Fall« (1881).

## Zusätze (1881).

1) Zu Seite 13. [S. 4] *Die philosophischen Erörterungen der Einleitung* sind durch Kant's erkenntnistheoretische Ansichten stärker beeinflusst, als ich jetzt noch als richtig anerkennen möchte. Ich habe mir erst später klar gemacht, dass das Princip der Causalität in der That nichts Anderes ist als die Voraussetzung der Gesetzlichkeit aller Naturscheinungen. Das Gesetz als objective Macht anerkannt, nennen wir Kraft. *Ursache* ist seiner ursprünglichen Wortbedeutung nach das hinter dem Wechsel der Erscheinungen unveränderlich Bleibende oder Seiende, nämlich der Stoff und das Gesetz seines Wirkens, die Kraft. Die auf Seite 14 [S. 5] berührte Unmöglichkeit beide isolirt zu denken, ergiebt sich also einfach daraus, dass das Gesetz einer Wirkung Bedingungen voraussetzt, unter denen es zur Wirksamkeit kommt. Eine von der Materie losgelöste Kraft wäre die Objectivirung eines Gesetzes, dem Bedingungen seiner Wirksamkeit fehlen.

2) Zu Seite 15. [S. 6] Die Nothwendigkeit der Auflösung der Kräfte in solche, die sich auf Punkte beziehen, kann aus dem Princip der vollständigen Begreifbarkeit der Natur hergeleitet werden für die Massen, auf welche die Kräfte wirken, insofern vollständige Kenntniss der Bewegung fehlt, wenn nicht die Bewegung jedes einzelnen materiellen Punktes angegeben werden kann. Aber die gleiche Nothwendigkeit scheint mir nicht zu bestehen für die Massen, von denen die Kräfte ausgehen. Ich habe dies schon zum Theil im folgenden Aufsätze besprochen. Die Erörterungen in I und II des Textes sind zum Theil nur zulässig, wenn diese Auflösbarkeit in Punktkräfte als von vorn herein feststehend beibehalten wird. Dass die Bewegungskräfte, wie sie durch Newton defnirt sind, die nach dem Gesetz des Parallelogramms construirten Resultanten aller Einzelkräfte sind, die von sämmtlichen einzelnen vorhan|denen  
 | 69 Massenelementen ausgehen, kann ich nur noch als ein durch Erfahrung gefundenes Naturgesetz anerkennen. Es sagt eine Thatsache aus: Die Beschleunigung, welche ein Massenpunkt erfährt, wenn mehrere Ursachen zusammenwirken, ist die Resultante (geometrische Summe) derjenigen Beschleunigungen, welche die einzelnen Ursachen einzeln herbeigeführt haben würden. Nun kommt freilich der Fall empirisch vor, dass zwei Körper, z. B. zwei Magnete, die gleichzeitig auf einen dritten wirken, eine Kraft ausüben, die nicht einfach die Resultante der Kräfte ist, die jeder allein genommen ausüben würde. Wir kommen in

diesem Falle mit der Annahme aus, dass jeder einzelne Magnet in dem anderen die Anordnung einer unsichtbaren imponderablen Substanz verändert. Aber ich kann das Princip der Begreiflichkeit nicht mehr als zureichend für die Folgerung anerkennen, dass die durch das Zusammenwirken zweier oder mehrerer Bewegungsursachen entstehende Wirkung nothwendig durch (geometrische) Summirung aus denen der einzelnen gefunden werden müsse.

Sowohl dieser thatsächliche Inhalt von Newton's zweitem Axiom, wie das weiter unten ausgesprochene Princip, dass die Kräfte, welche zwei Massen aufeinander ausüben, nothwendig bestimmt sein müssen, wenn die Lage der Massen vollständig gegeben ist, sind verlassen worden in denjenigen electrodynamischen Theorien, welche die Kraft zwischen electricischen Quantis von deren Geschwindigkeit und Beschleunigung abhängig machen. Die in dieser Richtung gemachten Versuche haben bisher noch immer in Widersprüche gegen die innerhalb des Bereichs unserer bisherigen Erfahrung ausnahmslos bewährten mechanischen Principien von der Gleichheit der Action und Reaction und von der Constanz der Energie geführt, worüber später in den electrodynamischen Abhandlungen dieses Bandes mehr die Rede sein wird. Wenn für Electricität in Leitern nur labiles Gleichgewicht existirte, so wäre damit auch die Eindeutigkeit und Bestimmtheit der Lösungen electricischer Probleme verloren gegangen, und wenn eine Kraft abhängig gemacht wird von der absoluten Bewegung, d. h. von einer veränderten Beziehung einer Masse zu etwas, was nie Gegenstand einer möglichen Wahrnehmung werden kann, nämlich zum unterschiedslosen leeren Raum, so erscheint | mir dies als eine Annahme, die die Aussicht auf vollständige Lösung der naturwissenschaftlichen Aufgaben aufgibt, was meiner Meinung nach erst geschehen dürfte, wenn alle anderen theoretischen Möglichkeiten erschöpft wären. |70