

der deutschen Gesellschaft für Anthropologie, Ethnologie und Urgeschichte
9, S. 30-50.

Wundt, Wilhelm (1863): *Vorlesungen über die Menschen- und Thierseele*,
Leipzig: Leopold Voß.

Zängl-Kumpf, Ursula (1990): *Hermann Schaaffhausen (1816-1893). Die Ent-
wicklung einer neuen physischen Anthropologie im 19. Jahrhundert*, Frank-
furt am Main: R. G. Fischer.

Zöckler, Otto »Darwin's Lehre von der Abstammung des Menschen«, in:
Der Beweis des Glaubens 7, S. 433-445.

Helmut Pulte

Darwin und die exakten Wissenschaften Eine vergleichende wissenschaftstheoretische Untersuchung zur Physik mit einem Ausblick auf die Mathematik¹

1. Einleitung: Darwin und die exakten Wissenschaften?

Wenn der *Physiker* Ernst Mach konstatiert, daß die »eigenartigen großen Entdeckungen« Charles Darwins »kein Physiker als solcher hätte machen können« (Mach 1991, S. 197), so handelt es sich auf den ersten Blick um eine triviale und tautologieverdächtige Aussage: Hat es doch die Physik traditionellerweise mit der *unbelebten Natur* und deren Gesetzmäßigkeiten zu tun, während es Darwin gerade um die *belebte Natur*, die Entstehung ihrer Arten und deren Erklärung, ging. Von der Gegenstandsseite her erscheint die Frage nach »Darwin in der Physik« zunächst also allzu berechtigt.

Wenn andererseits *Nichtphysiker* Darwin zum »Kopernicus der organischen Welt« (Emil Du Bois-Reymond), zum »neuen Galilei« (Asa Gray) oder zu jenem »Newton des Grashalms« (Ernst Haeckel) ernennen, den es nach Kant gar nicht hätte geben dürfen, so wird damit auch zum Ausdruck gebracht, daß Darwin Entdeckungen von revolutionärer, weltbildverändernder Bedeutung gelangen, wie sie bis dahin nur die Physik² kannte und wie sie wohl auch nur der

1 Bei diesem Beitrag handelt es sich um eine in den ersten fünf Abschnitten überarbeitete, das heißt aktualisierte und teilweise gekürzte Fassung des Aufsatzes Pulte (1995); hinzugekommen ist ein Ausblick auf die Mathematik (Abschnitt 6). Übersetzungen englischsprachiger Zitate, die keinen veröffentlichten Übersetzungen entnommen sind, stammen vom Autor dieses Beitrags. Der Herausgeberin dieses Bandes, Eve-Marie Engels (Tübingen), sowie Ulrich Charpa (London/Köln) danke ich für Diskussionen und nützliche Hinweise zu diesem Beitrag, Peter M. Harman (Lancaster), Martin Pollakowski (Bochum) und Gregor Schiemann (Wuppertal) für Hinweise zu J. C. Maxwell und Th. Huxley bzw. H. von Helmholtz. Tobias Schöttler (Bochum) gilt mein Dank für seine Recherchen zur neueren Darwin-Literatur.

2 »Physik« verwende ich im folgenden in einer weiten Bedeutung, die die Astro-

Physik zugetraut worden waren. Am prägnantesten kommt diese Einschätzung in Du Bois-Reymonds Vergleich Darwins mit Kopernikus zum Ausdruck. Er zielt vor allem darauf ab, daß beide Forscher maßgeblich zur Überwindung des Anthropozentrismus beitragen: Das heliozentrische System des Kopernikus nahm dem Menschen seine astronomische Sonderstellung (im Mittelpunkt des Weltalls); Darwins Evolutionstheorie nahm ihm nun auch seine Exklusivität innerhalb der belebten Natur (als dem einzigen ›beseelten‹, über dem Tierreich thronenden Lebewesen).³

Darwin als der Kopernikus, der Galilei, der Newton des 19. Jahrhunderts: Diese von ›unverdächtiger‹ (weil nichtphysikalischer) Seite eingeführten Metonyme verweisen gemeinsam aber auch auf einen Aspekt, der in der Aufarbeitung der Darwin-Rezeption wenig Beachtung gefunden hat und der sich mit dem Stichwort *Physikozentrismus* umreißen läßt: Es war die Physik, die mit ihrer ausdifferenzierten Experimentierpraxis und ihrer zunehmenden Mathematisierung im 19. Jahrhundert die methodischen Maßstäbe für alle Naturwissenschaften setzte und die zeitgenössische Wissenschaftstheorie unterschiedlicher Provenienz prägte. Ihre ersten Gesetze, insbesondere die Prinzipien der Mechanik, galten zum Zeitpunkt des Erscheinens von Darwins *On the Origin of Species* (1859) noch als universell gültig, als sicher und als unveränderlich.⁴ Sie wurden als feste Grundlage jeder künftigen Naturforschung verstanden. Zumindest *innerhalb der Physik* dominierte auch ein (unterschiedlich akzentuierter) Reduktionismus, dem zufolge letztlich *alle* Naturvorgänge unmittelbar auf physikalische Prozesse zurückführbar

nomie (hier explizit im Bezug auf Kopernikus) und die mathematische Physik mit einschließt. (Dies ist besonders im folgenden Teil 2 zu beachten, weil in der viktorianischen Epoche mathematische Physiker in der Regel als ›mathematicians‹ geführt wurden.) Eine umfassende historische und systematische Untersuchung der Wirkung, die die ›Darwinsche Revolution‹ auf die sogenannten exakten Wissenschaften hatte, steht auch im ›Darwin-Jahr‹ 2009 noch aus. Sie hätte insbesondere die Grundlagenentwicklung der Geometrie, die im letzten Abschnitt kurz angesprochen wird, einer genaueren Untersuchung zu unterziehen.

3 Du Bois-Reymond² 1912, S. 244 f. Der Vergleich mit Kopernikus ist häufiger anzutreffen (vgl. etwa Freud, *Gesammelte Werke*, 1952-1968, Bd. XII, S. 8, 11; vgl. Bd. XI, S. 294 f.), vermutlich erstmals in Huxley (1981), S. 107.

4 Insbesondere die Mechanik orientierte sich am axiomatisch-deduktiven Wissenschaftsideal der euklidischen Geometrie, das allerdings ab der Jahrhundertmitte zunehmend in Frage gestellt wurde (Pulte 2005).

sein sollten oder deren Erforschung zumindest dem Methodenideal der Physik zu folgen habe.⁵ In der Form ihrer Theoriebildung orientierte sich die Physik bis weit ins 19. Jahrhundert hinein am axiomatisch-deduktiven Ideal der Mathematik, insbesondere der euklidischen Geometrie (vgl. Pulte 2005).

Für eine solche ›statische‹ Physik *mußte* Darwins Evolutionstheorie eine spezifische Herausforderung bedeuten. Diese Theorie bezog nämlich *von Anfang an* den Menschen und dessen kognitive Fähigkeiten mit ein (Engels 1989, S. 66), machte also (bildlich gesprochen) *auch* die ›zentrale Wahrnehmungsapparatur‹ der Physik zu ihrem Gegenstand. Darwins Lehre konnte sich daher auf die Dauer nicht indifferent zur Physik verhalten; sie konnte insbesondere nicht ohne Auswirkung auf den Physikozentrismus bleiben.

Damit gestaltet sich das Verhältnis von Physik und biologischer Evolutionstheorie komplizierter, als es zunächst den Anschein haben könnte. Ziel dieses Beitrages ist es zunächst, wichtige *wissenschaftstheoretische* und *-praktische* (physikalische und biologische) Aspekte dieses Verhältnisses aufzuzeigen. *Zwei leitende Fragen* stehen dabei im Mittelpunkt: zum einen, wie Darwins Evolutionstheorie von der zeitgenössischen Physik rezipiert wurde und welche spezifischen, disziplinorientierten Momente und Veränderungen dabei eine Rolle spielten;⁶ zum anderen, welchen Einfluß Darwins Theorie auf das Wissenschaftsverständnis der Physik selber genommen hat. Im Vordergrund steht ›naheliegenderweise‹ die viktorianische Physik, die mit der deutschsprachigen Physik die zweite Jahrhunderthälfte beherrschte. Letztere wird hier durch zwei ihrer einflußreichsten Vertreter, Ernst Mach und Hermann von Helmholtz, repräsentiert. Einige Bemerkungen zum Verhältnis von Darwinscher Theorie und Mathematik schließen den Aufsatz ab.

5 Siehe etwa die klassische Formulierung von Helmholtz aus dem Jahre 1847, »dass alle Wirkungen in der Natur zurückzuführen seien auf anziehende und abstossende Kräfte, deren Intensität nur von der Entfernung der aufeinander wirkenden Punkte abhängt« (Helmholtz 1882, S. 12).

6 Hierbei ist auch für die Rezeption in der Physik davon auszugehen, daß die Darwinsche Theorie eine ›Katalysator-Funktion‹ (Bowler 1990, S. 14, 128) hatte, das heißt, daß sie nichtdarwinsche Entwicklungstheorien mit zweckgerichtetein und fortschrittsorientiertem Verlauf Vorschub leistete. Es wird daher wichtig sein, einen ›Darwinismus im engeren Sinne‹ im Auge zu behalten, der sich von solchen Theorien durch die Annahme eines nicht gerichteten, auf zufälliger Variation basierenden Prozesses mit offenem Ausgang unterscheidet.

2. Darwin, die viktorianische Physik und deren Wissenschaftstheorie

Darwin war sich vollkommen darüber im klaren, daß seine Lehre mit den Maßstäben einer Wissenschaftsauffassung gemessen würde, die sich an der Physik orientierte. Er selber war von diesem Verständnis beeinflusst und formulierte schon in seinen frühen *Notebooks* das Ziel, analog zur Bedeutung von Newtons Gravitationsgesetz für die Himmelsmechanik allgemeine und unveränderliche Gesetze für die Abstammungslehre aufzudecken. Der junge Darwin wollte tatsächlich der ›Newton der Biologie‹ werden (Schweber 1979, 1989).

Die viktorianische Wissenschaftstheorie zur Zeit der Entstehung von *Origin of Species* war stark geprägt vom *Preliminary Discourse on Natural Philosophy* (1830) des Astronomen John Herschel. Das Werk war in Großbritannien für einige Jahrzehnte äußerst einflußreich; auch Darwin hat es intensiv studiert und hoch geschätzt (Darwin 1958, S. 67 f.). Neben Herschel ist vor allem der Universalgelehrte William Whewell zu nennen, der unter anderem eine Reihe von Werken zur Mathematik, Mechanik und Astronomie verfaßte, bevor er durch seine beiden Hauptwerke, die *History of the Inductive Sciences* (1837) und die *Philosophy of the Inductive Sciences* (1967 [1840]) berühmt wurde.⁷ Herschel und Whewell verkörpern gewissermaßen den ›wissenschaftstheoretischen Physiko-zentrismus‹ der Zeit in Personalunion. Beide sahen in der Newtonschen Himmelsmechanik Krönung und Leitideal naturwissenschaftlicher Forschung. Für das Wissenschaftsverständnis der viktorianischen Physik und für deren Darwin-Rezeption ist es nützlich, nicht auf gravierende Differenzpunkte einzugehen, sondern lediglich einige *Gemeinsamkeiten* in Herschels und Whewells Wissenschaftstheorie herauszustellen. Dies sind vor allem⁸

(a) die Betonung der *Induktion* im Anschluß an und in Absetzung von Bacon. Als ein (schrittweise) verallgemeinerndes, methodisch reflektiertes Verfahren handelt es sich bei beiden um die wichtigste Methode zur Gewinnung von Hypothesen;

(b) die Notwendigkeit der *Deduktion* neuer empirischer Aussagen. Erst solche Vorhersagen können die Richtigkeit der (induktiv gewonnenen) Hypothesen bestätigen;

(c) die Möglichkeit, durch Induktion und Deduktion zur Erkenntnis erster, allgemeiner und sicherer Naturgesetze zu gelangen. Dabei handelt es sich (bei Herschel immer, bei Whewell in den ›fortgeschrittenen‹ Wissenschaften) um *quantitative* Gesetze;

(d) die Sanktionierung des in der Physik (im Anschluß an Newton) praktizierten Verfahrens, solche Erklärungsgründe, die in den allgemeinsten Naturgesetzen auftreten, als »wahre Ursachen« des Naturgeschehens anzusehen. Diese Gesetze sind Ausdruck einer naturimmanenten Kausalität (beispielhaft ist hier wiederum das Gravitationsgesetz, in dem als »vera causa« die Gravitationskraft auftritt).

Die aufgeführten Momente spiegeln im wesentlichen die Wissenschaftsauffassung der Physik wider, die sich kurz als *hierarchisch-gradualistisch* (hypothetisch-deduktive Struktur mit Stufenfolgen), *certistisch* (Erkennbarkeit unfehlbarer Gesetze), *prognostizistisch* (Bestätigung durch Vorhersage) und *essentialistisch* (»Vera-causa«-Doktrin) kennzeichnen läßt.

Darwin selber hatte zunächst verschiedene Versuche unternommen, seine Evolutionstheorie in einer Form darzustellen, die dieser Auffassung entspricht;⁹ auch hatte er in der Erstauflage des *Origin* sowohl Herschel als auch Whewell seine Referenz erwiesen.¹⁰ Umso überraschender im negativen Sinn war daher für ihn die Aufnahme seiner Lehre von dieser Seite: Sowohl Herschel als auch Whewell lehnten Darwins *Origin* (zunächst sogar vehement) ab.¹¹

verdeckt werden. Siehe hierzu (im Hinblick auf Darwin) etwa Hull (1973), (1974); Ruse (1975), (1979).

9 »Darwin wanted to make his theory as Newtonian as possible [...]« (Ruse 1979, S. 176).

10 Herschel wird von Darwin in der Einleitung als »one of our greatest philosophers« gepriesen (Darwin 1964, S. 1; zum Hintergrund Schweber 1989, S. 32); Whewell wird mit einem Motto aus der *Bridgewater Treatise* auf dem Titelblatt geehrt – übrigens noch vor Bacon.

11 Herschel sah in Darwins Lehre »the law of higgledy-piggledy« – ein wirres Durcheinander (F. Darwin 1887, Bd. I, S. 240). Whewell soll als »Master« des Trinity Col-

7 Der dritte einflußreiche Wissenschaftstheoretiker zur Zeit Darwins war J. S. Mill. Dessen *System of Logic* (1843) hatte allerdings auf die Physik wesentlich geringeren Einfluß als die Werke Herschels und Whewells. Zur Bedeutung für die allgemeinere Darwin-Rezeption vgl. Ellegård (1958), S. 174 ff.

8 Zu den folgenden Punkten vgl. insbesondere Herschel (1830): (a) S. 144 ff.; (b) S. 164 ff.; (c) S. 123 f., 175 ff.; (d) S. 144 ff. bzw. Whewell (1967), Bd. II: (a) S. 46 ff., 74 ff.; (b) S. 62 ff., 77 ff., 90 ff.; (c) S. 91 ff. (und Bd. I, S. 493 f.); (d) S. 96 ff., 281 ff. (und Bd. I, S. 700 ff., 164 ff.). Mit dieser für die Physik zweckmäßigen Zusammenschau sollen ausdrücklich *nicht* die gravierenden Unterschiede beider Systeme

Die Physiker im engeren Sinne reagierten nicht positiver: William Hopkins gehörte zu den frühesten und härtesten Darwin-Kritikern – ebenso wie sein Schüler William Thomson.¹² Weiter findet man unter den erklärten Gegnern Darwins die Physiker David Brewster, George Stokes, Peter G. Tait, Balfour Stewart und auch den Physiker-Ingenieur Fleeming Jenkin.¹³ Diese Liste ließe sich noch fortsetzen.¹⁴ Umgekehrt scheint John Tyndall unter den bedeutenderen Vertretern der viktorianischen Physik der einzige gewesen zu sein, der sich *für* Darwins Evolutionstheorie eingesetzt hat.¹⁵

leges in Cambridge sogar die Aufnahme des *Origin* in die Bibliothek verhindert haben (Ruse 1975, S.180). Diese von Huxley kolportierte Geschichte ist nur ein besonders krasses Beispiel für Whewells strikte und andauernde Ablehnung (vgl. Anm. 17, 26).

12 Vgl. Hopkins (1973). »Hopkins' review [...] is thought the best which has appeared against us«, bemerkt Darwin zu dieser Rezension (F. Darwin 1887, Bd. II, S. 327). Zu William Thomson vgl. insbes. Teil 3.

13 Vgl. Jenkin (1973). In dieser Rezension sah Darwin die nützlichste Rezension des *Origin* überhaupt (F. Darwin 1887, Bd. III, S. 107). Siehe weiter Stokes (1893) (hierzu auch Wilson 1989), Tait (1869, 1876) sowie Stewart/Tait (1875) (und zum letztgenannten Werk erläuternd Heimann 1972). Zur Darwin-Kritik des Newton-Biographen David Brewster vgl. Ellegård (1958), S. 56, 157.

14 Zur Gruppe der »harten« physikalischen Darwin-Kritiker kann man neben Hopkins, Thomson, Tait und Stokes auch Samuel Haughton rechnen (vgl. Haughton 1973), der in Dublin eine Professur für Geologie innehatte, aber vorwiegend über mathematische Physik arbeitete (Hull 1973, S. 227). Diese Gruppe war äußerst einflussreich: Hopkins wirkte als Lehrer in Cambridge; bei ihm studierten u. a. Maxwell und W. Thomson. Stokes hatte dort den traditionsreichen »Lucasian chair« inne und gab drei Jahrzehnte lang die wichtigen *Philosophical Transactions* heraus (Wilson 1974, S. 12), in denen die Darwinianer bezeichnenderweise nicht zu Wort kamen. Tait und vor allem Thomson galten, nicht zuletzt auf Grund ihres berühmten Lehrwerkes (Thomson/Tait 1867), der »Bibel« der britischen theoretischen Physik, als unumstrittene Autoritäten ihres Faches.

J. C. Maxwell gehörte zu einer Gruppe moderaterer Kritiker Darwins. Er schaltete sich nicht direkt in die Diskussion um den *Origin* ein, kritisierte aber Darwins Theorie der Pangenesis (Maxwell 1890, Bd. II, S. 461 ff.).

Michael Faraday, der unter den Großen der viktorianischen Physik hier noch zu nennen ist, scheint sich – typisch für die Zurückgezogenheit seines letzten Lebensjahrzehnts – zu Darwins Lehre nicht geäußert zu haben. Seiner religiösen Grundhaltung nach (Gooding 1982) wird er sie aber kaum gebilligt haben.

15 Vgl. Tyndall (1874), S. 182 ff. Tyndall wirkte eher als *Wissenschaftspopularisator* denn als Physiker. Er nimmt in der viktorianischen Physik auch insofern eine Sonderstellung ein, als er in Deutschland (Marburg und Berlin) ausgebildet wurde. Dieser Punkt ist interessant im Hinblick auf einen Vergleich der britischen

Diese weitgehend negative Rezeption bedarf der Erklärung. Dabei kann es hier nur darum gehen, einige typische, das heißt eng mit dem disziplinär geprägten Wissenschaftsverständnis der Physik zusammenhängende Einwände gegen Darwin zu erörtern. Sie betreffen zunächst (und erwartungsgemäß) *methodologische Fragen*:

Ein wiederholt von den Physikern vorgebrachtes Argument besagte, daß Darwins Theorie nicht der induktiven Methode folge. Vor dem Hintergrund der zeitgenössischen Wissenschaftstheorie war dies ein fast vernichtender Vorwurf, aber auch (und vermutlich deshalb) ein Allgemeinplatz in der *allgemeinen* Darwin-Kritik (Ellegård 1958, S. 185 ff.). Den »physikalischen« Kritikern ging es jedoch in einem präziseren Sinne darum, daß Darwins Theorie kein guter, das heißt *schrittweiser* Induktionsprozeß vorausgehe (etwa nach dem verschiedentlich zitierten Vorbild: Planetenbeobachtungen, Keplersche Gesetze, Gravitationsgesetz). Darwin wurde ein induktiver Sprung von der breiten Beobachtungsbasis zu allgemeinen Prinzipien vorgeworfen. Seine allgemeinen Prinzipien Variation und natürliche Selektion waren demnach als *bloße Spekulationen* anzusehen.¹⁶

Nun ist zwar nach Herschel und besonders nach Whewell spekulative Hypothesenbildung grundsätzlich möglich, legt aber die ganze Beweislast für die Richtigkeit der Hypothesen auf den zweiten vorhin erwähnten Schritt, die Deduktion neuer empirischer Aussagen. Solche Bestätigungen aber, so die Kritik, könne Darwins Evolutionslehre nicht erbringen. Whewell bemerkt: »[...] die meisten seiner Hypothesen werden durch die Tatsachen nicht bewiesen. Wir können nicht eher ein Beispiel für eine neue Art, die

und deutschen Rezeptionsgeschichte (vgl. Teil 5): Während in Deutschland der Materialismus-Streit zur Jahrhundertmitte eine positive Darwin-Rezeption vorbereiten half, gewann der »scientific materialism« eines Tyndall in Großbritannien erst relativ spät an Einfluß. Tyndall auf seiten der Physik und Clifford (vgl. Abschnitt 6) auf seiten der Mathematik wirkten hier in den 1870er Jahren in der Tat noch als *Vorkämpfer* des wissenschaftlichen Materialismus *und* der Lehre Darwins.

16 Sehr ausführlich behandelt diesen Punkt Hopkins (1973), S. 231 ff., 264 ff. Hopkins' Kritik folgt der Warnung Whewells vor »unsicherer« Induktion (Ellegård 1958, S. 191). Vgl. auch Whewells eigene Darwin-Kritik (Todhunter 1876, Bd. II, S. 433 ff.) und (allerdings mit größerem Spielraum für »deduktive« Begründung) W. Thomson (1894), insbes. S. 197 f.

in der von seiner Hypothese angenommenen Weise erzeugt wurde, annehmen, als es Cuvier konnte.«¹⁷

Darwin hat dieses ›prognostische Defizit‹ auch unumwunden zugegeben – aber mit dem wichtigen Zusatz, daß solche deduktiven Bestätigungen im Falle seiner Theorie (schon auf Grund der benötigten Zeiträume) grundsätzlich nicht möglich seien.¹⁸ Allgemein hat er auf die Kritik der Physiker zunehmend mit der Forderung nach *methodologischer Autonomie* reagiert: seine Lehre sei nicht mit fremden, das heißt von der Physik herkommenden Maßstäben zu messen.¹⁹

Dem Vorwurf mangelhafter Induktion und vorschneller Spekulation begegnete er mit dem Argument, daß ohne leitende (notwendigerweise spekulative) theoretische Vorstellungen gar keine Induktion möglich sei: »Ich bin davon überzeugt, daß es ohne die Schaffung von Theorien keine Beobachtung geben würde« (F. Darwin 1887, Bd. II, S. 108). Die ›Theoriebeladenheit‹ jeder Beobachtung wird hier als Argument gegen einen Induktivismus besonders Herschelscher Prägung vorgebracht (Charpa 1987, S. 129 f.), der glaubt, einen *unmittelbaren* empirischen Zugriff auf die Natur zu besitzen.

Weiter sieht Darwin die *Bestätigungsfähigkeit und die Erklärungsfähigkeit* seiner Evolutionstheorie nicht im direkten, deduktiven Nachweis neuer Arten, sondern in der Strukturierung und Vernetzung großer Phänomenbereiche. Dem hierarchisch-gradualistischen Theorienmodell der Physiker kann man ein gewissermaßen ›holistisches‹ Theorienverständnis bei Darwin gegenüberstellen: »Manche meiner Kritiker sagten: ›Aha, er ist ein guter Beobachter,

17 Todhunter (1876), Bd. II, S. 433 f. »The great defect of this theory is the want of all positive proof [...]« (Hopkins 1973, S. 266). Bei jedem der ›harten‹ Kritiker (Anm. 14) wird dieses Argument repetiert. Es findet sich implizit übrigens auch bei Mill, der keineswegs Darwins Theorie uneingeschränkt unterstützte (vgl. Ellegård 1958, S. 175 ff.), sondern sie als eine methodisch legitime, aber *unbewiesene* Hypothese verstand. Vgl. Hull (1973), S. 27 f.

18 Vgl. insbes. Darwin (1992), S. 95 ff., und F. Darwin (1903), Bd. I, S. 184.

19 Vgl. Bowler (1990), S. 163 ff., im Hinblick auf die Kontroverse um das Erdalter sowie Anm. 25. Daß die biologischen Wissenschaften *allgemein* nach Autonomie strebten, zeigt sich in den etwa um 1874 aufkommenden (und 1887 realisierten) Plänen, die *Philosophical Transactions* (vgl. hierzu Anm. 14) in ›A: Mathematical and Physical Sciences‹ sowie ›B: Biological Sciences‹ zu teilen. Vgl. Hall (1984), S. 116.

aber ihm fehlt die denkerische Kraft.‹ Ich denke nicht, daß dies wahr sein kann, weil *Origin of Species* ein langes Argument ist, vom Anfang bis zum Ende.«²⁰

Mit diesen Argumenten erweist sich Darwin gegenüber seinen ›physikalischen‹ Kritikern als der modernere (weil *undogmatische*) Methodologe. Daß er damit vor dem ›Gerichtshof‹ der induktivistischen Wissenschaftstheorie kaum bestehen konnte, mag das Urteil des Physikers Hopkins belegen: »Es ist unmöglich, den Naturforschern Nachlässigkeit des Denkens zuzugestehen, während wir bei den Physikern auf rigorosen Beweisen bestehen. Derjenige, der Cäsar anruft, muß auch nach Cäsars Gesetz beurteilt werden« (Hopkins 1973, S. 231).

Die bisher skizzierte Kritik an Darwin könnte wohl auch gegenüber jeder anderen entwicklungsgeschichtlichen Theorie vorgebracht worden sein. Sie spiegelt das noch heute diskutierte wissenschaftstheoretische Problem wider, historische Theorien in eine hypothetisch- (oder sogar axiomatisch-)deduktive Form zu bringen, wie dies die Physik forderte.²¹

Es sollen nun Einwände von seiten der Physik erörtert werden, die den *Kern* der Darwinschen Lehre betreffen, das heißt die Erklärung der *Entstehung der Arten durch Variation und natürliche Selektion*. Ich möchte hier zunächst einen Punkt herausstellen, der den kausalen Charakter der allgemeinsten Naturgesetze bei Whewell und Herschel (vgl. d) betrifft.

Bereits im Kontext der Entdeckung bezeichnet Darwin die natürliche Selektion als ›force‹ (Ruse 1975, S. 172) und später wiederholt als ›power‹ (Darwin 1964, S. 61, 410). Er deutet hier mit Hilfe des Kraftbegriffs lediglich an, was er in seinen *Notebooks* durchaus explizit gemacht hat: Was Newtons Gravitationskraft für die Himmelsmechanik bedeutet, leistet die natürliche Selektion für die organische Welt. Darwins Anspruch ist auf dem Hintergrund der

20 Darwin (1958), S. 140. An anderer Stelle bemerkt er zu seiner Lehre: »[...] the doctrine must sink or swim according as it groups and explains phenomena. It is really curious how few judge it in this way, which is clearly the right way« (F. Darwin 1887, Bd. II, S. 155, vgl. 210; 1903, Bd. I, S. 184).

21 Es ist daher auch kein Zufall, daß noch in den 1880er Jahren Herbert Spencer die strikte Ablehnung seiner ›evolutionären‹ Philosophie durch eine Gruppe von Physikern und Mathematikern um Peter G. Tait (vgl. Anm. 14) beklagen mußte; vgl. Spencer (1966), S. 88 und Abschnitt 6.

Herschel-Whewellschen Methodologie kein geringerer als der, das allgemeinste (weil kausal formulierbare) Gesetz der Entstehung der Arten aufgedeckt zu haben. Die natürliche Selektion betrachtet er als »vera causa« (F. Darwin 1887, Bd. II, S. 289 f.).

Bezeichnend für die enge Orientierung der ganzen Diskussion an dieser Methodologie ist nun, daß Darwins *impliziter* Anspruch (einschließlich der Analogie zur Newtonschen Himmelsmechanik) von der Kritik durchaus wahrgenommen und zurückgewiesen wurde.²²

Darwin selber hat zu dieser negativen Reaktion beigetragen, indem er zunächst offenbar nicht sah, daß eine »vera causa« wie die Gravitation in der zeitgenössischen Physik als eine reale Entität verstanden wurde und ihm von daher unterstellt werden konnte, er würde für die natürliche Selektion den gleichen Status beanspruchen. Dies war jedoch keineswegs seine Absicht. Darwin machte klar, daß seine Kennzeichnung der natürlichen Selektion als Kraft metaphorischer Art sei, *aber auch*, daß Newtons Anziehungskraft keine tiefere Bedeutung haben könne (Darwin 1992, S. 99). *Beide* »Kräfte« sind unbeobachtbar und *beider* Verwendung ist lediglich dadurch legitimiert, daß sie eine Vielzahl von Phänomenen durch einfache Beschreibung verständlich machen. Gegen den Essentialismus der Physiker richtet Darwin deren bevorzugtes Mittel (die empiristische Kritik) und besteht auf der *deskriptiven* Funktion theoretischer Ausdrücke.²³

Der zweite zentrale Punkt in der spezifischen Darwin-Kritik betrifft die *Variation* der Arten. Darwin hatte das Auftreten von Variationen als »zufällig« in dem Sinne gekennzeichnet, daß er ihre Entstehung nicht angeben konnte, obwohl er an ihre naturgesetzliche Bestimmtheit glaubte (Darwin 1992, S. 153 f., 186). Daß die

Variation als grundlegendes Prinzip der Evolution in diesem Sinne zufällig blieb, war für die Biologie der Zeit *unvermeidlich*, für den »general reader« Darwins bereits *problematisch* (Ellegård 1958), aber für die Physik der Zeit *unerträglich*. Fast alle »physikalischen« Kritiker Darwins stellten diesen Punkt besonders heraus. Sie konnten in einer Evolutionstheorie, die auf einem Zufallsprinzip basierte, keine wissenschaftliche Erklärung sehen. Der Begriff »Evolutionismus« mußte einem viktorianischen Physiker als *Contradictio in adiecto* erscheinen: Ein *Mechanismus* hätte den in jedem Einzelfall determinierenden Ablauf des Geschehens aufzuweisen. Hiervon konnte aber bei Darwin keine Rede sein.²⁴

Generell hat Darwin im nachhinein den sachlich-konstruktiven Charakter der gegen ihn gerichteten Einwände betont (Darwin 1958, S. 125 f.). Die Angriffe von seiten der Physiker sah er weit weniger positiv.²⁵ Die Frage liegt nahe, welche weiteren, über Wissen-

24 Hierauf zielt wohl schon der »Higgledy-piggledy-Vorwurf« Herschels ab (Anm. 11), wie er später deutlicher macht (Herschel 1861, S. 64). Vgl. hierzu ferner Hopkins (1973), S. 257 f., 267 f.; W. Thomson (1894), S. 203 f., 89 f.; Stokes (1893), S. 43 ff.; Tait (1869) sowie (mit anderer Argumentation) Jenkin (1973), S. 306 ff., und die (inhaltlich schwache) Rezension von Houghton (1973), S. 224 f. Die Kritik »zufälliger« Variation hängt eng zusammen mit den physikotheologischen Einwänden gegen Darwin (s. u.), wie auch mit der Frage der *Zeitdauer* der Evolution (vgl. Abschnitt 3).

Das »Zufallsargument« führt unmittelbar zum »Wahrscheinlichkeitsargument«, wonach Darwin nur Möglichkeits- oder Wahrscheinlichkeitsaussagen für Entwicklungen macht, wo die »exact sciences« Sicherheit verlangen (vgl. etwa Hopkins 1973, S. 257 f., 271 f.). Dieses Argument wurde jedoch durch die Entwicklung der mathematischen Statistik und die statistische Physik, die 1860 (also fast gleichzeitig mit Darwins *Origin*) durch Maxwells erste Untersuchung zur kinetischen Gastheorie eingeleitet wurde, aufgehoben. Charles S. Peirce scheint als erster gesehen zu haben, daß die Aufnahme von Wahrscheinlichkeitsaussagen in die Physik durch Maxwell und Clausius parallel zur Entwicklung der Biologie verläuft. Vgl. Peirce (1986), S. 244; hierzu auch Hull (1973), S. 33 f. und Abschnitt 6.

25 »On his standard of proof, *natural science* would never progress [...]«, bemerkte er zur Rezension von Hopkins (F. Darwin 1887, Bd. II, S. 315). Die Besprechung von Houghton erschien ihm (zu Recht) als »a curiosity of unfairness and arrogance« (F. Darwin 1903, Bd. I, S. 153). Herschels Kritik (Anm. 24) sah er als (wenngleich guten) »Spott« (Bd. I, S. 330), und in einer Besprechung Taits zur Kontroverse um das Erdzeitalter (Abschnitt 3) entdeckte er »some good specimens of mathematical arrogance« (Bd. II, S. 314). Nach Beginn dieser Kontroverse warnte Darwin ganz allgemein davor, den Aussagen von Physikern zu vertrauen (Bd. II, S. 5, 313 f.).

22 So bemerkt Hopkins im Schlußwort seiner Rezension des *Origin*: »Let him pursue his researches, recollecting that Biological science requires at present its keepers rather than its Newtons – the discovery of the more obvious laws according to which its phenomena may be arranged, rather than attempts at that higher generalization which may account for such laws by the operation of physical causes« (Hopkins 1973, S. 272).

23 Vgl. F. Darwin (1887), Bd. II, S. 286, vgl. 290. Ernst Mach deutet später diesen Sachverhalt in einer für ihn charakteristischen Weise um, indem er u. a. Darwin zugute hält »die Newtonsche Regel« anzuwenden, »nach Möglichkeit nur eine tatsächlich beobachtete Ursache (vera causa) zur Erklärung zu verwenden« (Mach 1980, S. 177, Anm.).

schaft und Wissenschaftstheorie hinausgehenden Gründe die harte Physiker-Kritik motiviert haben könnte, womit unweigerlich auch *theologische* Fragen ins Spiel kommen.

Eine umfassende Analyse dieses Aspekts überschreitet den Rahmen dieses Beitrages bei weitem. Es ist jedoch wichtig, die spezifische Bedeutung der *Physikotheologie* für die viktorianische Physik (im Kontrast besonders zur deutschen Tradition) zu sehen, um deren Darwin-Rezeption voll verstehen zu können.

Die Aufdeckung allgemeinsten und unwandelbarer Naturgesetze galt vor allem auch deshalb als vornehmstes Ziel der Naturwissenschaft, weil auf diesem Wege gleichsam ›induktiv‹ auch ein intelligenter Schöpfungsplan ›eingesehen‹ und die Existenz eines Schöpfergottes ›erwiesen‹ werden konnte. Unter anderem Newton hatte dieses ›design argument‹ vertreten, und durch Bentley, Derham, Paley, Whewell u. a. wurde es bis zur Mitte des 19. Jahrhundert tradiert. Überspitzt formuliert, war dieses Argument ebenso kanonischer Bestandteil der viktorianischen Physik wie Newtons Gravitationstheorie: Besonders Whewell, aber auch Herschel, Thomson, Stokes, Stewart und Tait sahen in ihm einen wichtigen Einwand gegen Darwins Vorstellung einer ungerichteten Evolution.²⁶

In Newtons Physikotheologie ging es jedoch nicht allein um die Aufdeckung des göttlichen *Planes*; sie sanktionierte auch die Möglichkeit göttlicher *Intervention* in das Naturgeschehen. Diese Vorstellung war jedoch (*spätestens* seit den Erfolgen der Himmelsmechanik eines Laplace, der bekanntlich der Annahme Gottes ›nicht bedurfte‹) in der Physik nicht mehr zu vertreten. Bei den viktorianischen Physikern hatte dies zunächst aber *nicht* zur Folge, auch in der belebten Natur jede göttliche Einwirkung auszuschließen. Tendenziell läßt sich vielmehr folgendes feststellen: Während die Berufung auf eine göttliche Intervention im Bereich der Physik mehr und mehr als unwissenschaftlich galt, wurde der Bereich des Organischen für die Physiker zum *Reservat*, in dem eine solche Ein-

wirkung weiterhin als möglich und notwendig angesehen wurde.²⁷

Es wäre jedoch verkürzt, in theologischen Überzeugungen das einzige oder hauptsächliche Motiv ›physikalischer‹ Darwin-Kritik zu sehen und wissenschaftstheoretische Einwände als bloße *Instrumente* im Dienste dieser Überzeugung abzutun. Vielmehr stützten sich leitende wissenschaftstheoretische Vorstellungen und Physikotheologie gegenseitig.²⁸ Auch wäre es falsch anzunehmen, daß die ›Katalysator-Wirkung‹ der Darwinschen Lehre bei den Physikern völlig außer Kraft gesetzt worden wäre.²⁹

Es bleibt aber festzuhalten, daß die ›physikalische‹ Darwin-Rezeption eindeutig negativer war als die des ›general reader‹. Da auch die allgemeine Darwin-Rezeption wesentlich von religiösen Auffassungen bestimmt wurde (Ellegård 1958), wird man diese Abweichung nur vor dem Hintergrund unterschiedlicher Wissenschaftsauffassungen begreifen können. Gegenüber dem eingangs dargelegten ›charakteristischen Quadrupel‹ für die Physik könnte man Darwins Auffassung zusammenfassend so kennzeichnen: Sie hat einen *holistischen* Zug (bildlich gesprochen: ist eher ›netzartig‹ als ›pyramidenförmig‹), ist *probabilistisch* (zielt auf Wahrscheinlichkeit der Aussagen statt Sicherheit), *plausibilistisch* (fordert Ver-

27 Es wäre demnach präziser, von einer ›Bio-Theologie‹ der Physiker statt von einer ›Physikotheologie‹ zu sprechen – ich behalte jedoch den letzteren Begriff (als etablierten und historisch allgemeineren) bei. Als typisch kann hier die Haltung Stokes' (vgl. Ellegård 1958, S. 83) angesehen werden. Zur unterschiedlichen Rezeption der Darwinschen und der astronomischen (Kant-Laplaceschen) Entwicklungstheorie vgl. Pulte (1995), S. 120.

28 Die ›zufällige‹ Variation etwa genügte nicht den wissenschaftstheoretischen Maßstäben der Physik (Anm. 24), das heißt erschien nicht als Ausdruck von Gesetzmäßigkeit, sondern von *fehlender* Gesetzmäßigkeit. Sie konnte *deshalb* auch nicht in das ›design argument‹ integriert werden: *Auch* der Gott der viktorianischen Physiker ›würfelte nicht‹.

29 Vgl. Anm. 6. Herschel, Stokes und Thomson liefern hierfür Beispiele: Herschel etwa gab in seiner *Physical Geography* zu verstehen, daß Darwins Theorie, wenn auch mit gewissen Einschränkungen für die Entstehung des Menschen, ›gerettet‹ werden könne, wenn Darwin sich nur darauf einließe, Variation und Selektion als Ausdruck des Wirkens einer Intelligenz zu begreifen, die ständig den Prozeß der Evolution ›überwacht‹ (Herschel 1861, S. 12; hierzu auch Schweber 1989, S. 64). Stokes und Thomson gaben ihre frühen kreationistischen Standpunkte auf und konzedierten immerhin eine biologische Entwicklung der Arten, die allerdings durch ein vitalistisches Prinzip *gesteuert* würde (Anm. 27) und daher ebenfalls nicht Darwins Evolutionsbegriff entsprach.

26 In dem Sinne, daß ein auf ›zufälliger‹ Variation und natürlicher Selektion basierender Evolutionsprozeß nicht nur keinen göttlichen Plan erkennen lasse, sondern einen solchen Plan geradezu ausschließe. Vgl. etwa Thomson (1894), S. 204. Für weitere Belege vgl. Wilson (1974, 1989; zu Thomson und Stokes), Heimann (1972; zu Stewart und Tait) sowie Schweber (1989; zu Herschel); zu Whewells (verfehler) Kritik an Darwin hinsichtlich der *Entstehung* von Leben vgl. Young (1985), S. 144 f.

ständigkeit der Phänomene statt Vorhersage neuer Phänomene) und *deskriptionistisch* (liefert Beschreibung statt ›genetische‹ Kausalerklärung). Die Physik selber hatte ihren Wissenschaftsbegriff zu revidieren, bevor sie Darwins Lehre (in einer noch näher zu bestimmenden Weise) adaptieren konnte.

3. Darwin, W. Thomson, Helmholtz und das Alter der Erde

Die ›physikalische‹ Darwin-Kritik beschränkte sich nicht auf wissenschaftstheoretische und physikotheologische Einwände, sondern bezog auch fachwissenschaftliche Berührungspunkte zwischen Physik und Evolutionstheorie ein; unter ihnen spielte die Frage des *Erdalters* die prominenteste Rolle.³⁰ An diesem Problem soll die wissenschafts*praktische* Seite des Verhältnisses von Physik und Evolutionstheorie beleuchtet werden. William Thomson vertritt dabei exponiert die viktorianische, Hermann von Helmholtz die deutsche Physik.

Das *Erdzeitalter* hat eine erstaunliche Entwicklung genommen: Noch im 18. Jahrhundert schätzte man es auf wenige tausend Jahre. Geologie und Paläontologie dehnten diese Zeit bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts immens aus (Toulmin/Goodfield 1970). Darwins Lehrer Charles Lyell, Hauptvertreter des ›Uniformitarismus‹, ging in seinen *Principles of Geology* (1830-1833) von praktisch unbegrenzten erdgeschichtlichen Zeiträumen aus, ohne sich allerdings auf Zahlen festzulegen.

Für Darwins Idee der Evolution durch kleine und richtungslose Schritte war diese Entwicklung der Geologie eine *Conditio sine qua non*. Darwin nimmt daher in jeder Auflage des *Origin* dankbar Bezug auf Lyells *Principles* und betont »die unfäßbare Länge der verflossenen Erdperioden«. Anhand sehr vager geologischer Abschätzungen kommt er zu der Annahme, daß »weit mehr als 300

³⁰ Bei den physikalischen Erdaltersschätzungen und (im Zusammenhang damit) der Frage nach dem Alter der Sonne handelt es sich um den wissenschaftshistorisch am besten erforschten Aspekt des Themas ›Darwin und die Physik‹. Wissenschaftshistorische Details können daher im folgenden weitestgehend ausgeblendet werden. Hierzu sei verwiesen auf Burchfield (?1990), Brush (1979), Eiseley (1958) sowie auf James (1982) und Sharlin (1972).

Millionen Jahre« seit der Erstarrung der Erde vergangen sein müssen (Darwin 1964, S. 287).

Von physikalischer Seite hatte schon J. B. Fourier die Wärmeleitung der *Erde* untersucht und im Anschluß daran die Frage des Erdalters behandelt. Das Alter des thermodynamischen *Systems* Sonne/Erde wurde aber erst nach der Formulierung des zweiten Hauptsatzes zu einem interessanten physikalischen Problem. Dabei kam die Physik zwangsläufig in Konflikt zum geologischen Uniformitarismus und insbesondere zur These vom praktisch unbegrenzten Erdalter: Die allmähliche Abkühlung der Erde, der begrenzte Vorrat an Sonnenenergie und die vom zweiten Hauptsatz konstatierte Energiedissipation weisen sowohl auf eine nur begrenzte Versorgung der Erde mit Wärme in der *Zukunft* als auch auf wesentlich höhere Erdtemperaturen in der *Vergangenheit* (und, damit verbunden, auf katastrophenartige geophysikalische Veränderungen der Erdoberfläche) hin. Die Physik *mußte* also nicht nur zu einer Beschränkung des Zeitraums *künftigen* Lebens auf der Erde gelangen (der berühmte ›Wärmetod‹), sondern auch zu einer Beschränkung des *zurückliegenden* Evolutionszeitraumes. Vom heutigen Standpunkt ist dabei klar, daß die Unkenntnis der *Radioaktivität* (als Energiequelle der Sonne *und* des Erdinneren) die Physiker des 19. Jahrhunderts zu Altersschätzungen führen mußte, die in beide Zeitrichtungen wesentlich *zu gering* ausfallen würden. Doch nicht diese (erst *post festum* konstaterbare) ›Fehlerhaftigkeit‹ der Ergebnisse ist hier von Interesse, sondern die Frage, *wie* Thomson und Helmholtz diese zu Darwins Theorie in Beziehung setzten.

Beide beschäftigten sich unabhängig voneinander ab 1852 bzw. 1854 mit dem Ursprung der Energie der Sonne, der Veränderung ihres Energievorrates mit der Zeit und mit möglichen Konsequenzen für die Erde. Beide vertraten auch (in dem hier relevanten Zeitraum, das heißt ab 1859) übereinstimmend die Hypothese, daß die Sonnenwärme im wesentlichen durch eine Gravitationskontraktion der Sonnenmasse zu erklären sei.³¹ Schließlich kamen beide auch zu ähnlichen Altersschätzungen.

Vor diesem vergleichbaren *theoretischen* Hintergrund sehr bemerk-

³¹ Helmholtz vertrat bereits 1854 die Kontraktionshypothese (Helmholtz 1896, Bd. I, S. 80 ff., 415 ff.; Bd. II, S. 81 ff.), Thomson befürwortete zunächst die Meteoriten-Hypothese. Nachdem sich diese als unhaltbar erwiesen hatte, schloß er sich der Helmholtzschen Erklärung an.

kenswert ist nun der ganz unterschiedliche *praktische* Umgang mit physikalischem Wissen im Hinblick auf die Evolutionstheorie:

Thomson erschieden Darwins Lehre bekanntlich als wissenschaftlich unbegründet und theologisch verdächtig; er war überzeugt von der »völligen Überflüssigkeit seiner Philosophie« (Thompson 1910, Bd. II, S. 637). Es ist daher kaum als ein Zufall anzusehen, daß er seine ersten konkreten Altersschätzungen auf der Grundlage der Kontraktionshypothese *nach* Erscheinen des *Origin* anstellte und dann auch alsbald gegen Darwin richtete. Thomson ermittelte ein wahrscheinliches Sonnenalter von etwa 100 Millionen Jahren und legte nahe, daß die Erde auf Grund der hohen Temperaturen in der Frühzeit des Sonnensystems allenfalls seit einigen 10 Millionen Jahren belebt sein könne: »Was also haben wir von solchen geologischen Schätzungen wie 300 000 000 Jahren zu halten?«, fragt er kritisch im Hinblick auf das von Darwin für die Evolution »beanspruchte« Erdalter.³²

Nun beruhten Thomsons Schätzungen auf verschiedenen empirisch nicht abzusichernden Hilfsypothesen und Extrapolationen und waren großen Schwankungen unterworfen.³³ Dennoch trat er ab 1861 über einen Zeitraum von fast vierzig Jahren immer wieder mit Vorträgen und gezielt auch mit populärwissenschaftlichen Abhandlungen zum Alter der Sonne und der Erde an die Öffentlichkeit. Zunehmend verzichtete er darauf, den durchaus hypothetischen Charakter seiner Schätzungen explizit zu machen, und betonte ihre sichere Grundlage in den bewährten Gesetzen der Physik. Sowohl die durchaus nicht »induktiv« begründete Vorgehensweise als auch die populäre Darstellung stehen in deutlichem Kontrast zu Thomsons üblicher Wissenschaftspraxis (Sharlin 1972, S. 274 f.). Beides ist nur dadurch zu verstehen, daß es ihm um *mehr* als physikalische Fachfragen ging: Sein Ziel war auch und zuerst eine harte Kritik des Lyellschen Uniformitarismus und der Darwinschen

32 W. Thomson (1891a), S. 368, vgl. 375. Die Vermutung liegt nahe, daß Thomson die Kontraktionshypothese von Helmholtz *nach* dem Erscheinen des *Origin* (1859) von Helmholtz übernahm, um physikalische Argumente gegen Darwins Erdaltersschätzungen vorbringen zu können (James 1982, S. 179). Fest steht, daß er *erstmalig* 1861 diese Hypothese vertrat und gegen Darwins eigene Schätzung vorbrachte (vgl. Anm. 35).

33 Zu Thomsons variierenden Altersangaben vgl. Burchfield (1990). Für weitere Details dieser Diskussion, insbesondere in Hinblick auf den Wissenschaftsbegriff der viktorianischen Physik, vgl. Pulte (1995), S. 124 f.

Evolutionstheorie. Der Biologie gegenüber wollte er nachweisen, daß das »tatsächliche«, das heißt *physikalisch* ermittelte Erdzeitalter Darwins Theorie einer »offenen« Evolution falsifiziere:

Die Beschränkung der geologischen Zeiträume, die die physikalische Wissenschaft auferlegt, kann natürlich die Hypothese von der Transmutation der Arten nicht widerlegen; aber sie scheint doch ausreichend zu sein, um die Lehre zu widerlegen, daß sich die Transmutation der Arten durch »Abstammung mit Veränderung durch natürliche Selektion« zugetragen hat.³⁴

Thomson akzeptierte zwar grundsätzlich die Entstehung der Arten durch Entwicklung. Er glaubte aber, physikalisch nachgewiesen zu haben, daß Darwins richtungslose und daher langsame Evolution durch ein richtunggebendes, entwicklungsbeschleunigendes Prinzip ersetzt werden müsse – ein Prinzip, das zudem seiner Physikotheologie entsprach. Weiter ging es ihm darum zu verhindern, daß die Anhänger Darwins den Evolutionsprozeß auch auf die *Entstehung* des Lebens ausdehnten.³⁵

Thomsons anhaltende Kritik fand in den Wissenschaften und der interessierten Öffentlichkeit große Beachtung – nicht nur, weil ihr Urheber über ein halbes Jahrhundert als eine unumstrittene

34 W. Thomson (1894), S. 89 f.; Fleming Jenkin knüpft auch hier an Thomson an (Jenkin 1973, S. 327, 331).

35 Eine solche natürliche Erklärung des Lebensanfangs hätte den »benötigten« Evolutionszeitraum weiter ausgedehnt. Sie war für Thomson aus theologischen Gründen inakzeptabel. Schon in seiner ersten Darwin-Kritik in dem Vortrag »On the Age of the Sun's Heat« (1861, publ. 1862) wird deutlich, daß hier ein wichtiges Motiv für die Weiterführung seiner physikalischen Untersuchungen zum Erd- und Sonnenalter liegt (W. Thomson 1891a, S. 357, vgl. 422). Obwohl Darwin selber im *Origin* nur davon spricht, »that probably all the organic beings which have ever lived on this earth have descended from some one primordial form, into which life was first breathed« (Darwin 1964, S. 484), sieht Thomson (wie auch Whewell, vgl. Anm. 26) die Gefahr, daß das »Einhauchen« ersten Lebens von Darwin und seinen Anhängern selber durch einen evolutiven Prozeß aus un-belebter Materie erklärt werden würde. Thomson erwägt dagegen (wie übrigens auch Helmholtz) die Möglichkeit, daß irdisches Leben durch Meteore von anderen Himmelskörpern eingeführt worden sein könnte, und verteidigt diese Idee als »not unscientific« (1894, S. 202 f.; vgl. Helmholtz 1896, Bd. II, S. 89, 418 f.). Die »evolutionistische« Alternative ist hingegen mit seinem theistisch gefärbten Vitalismus unvereinbar: »[...] I am ready to adopt, as an article of scientific faith, true through all space and through all time, that life proceeds from life, and from nothing but life« (W. Thomson 1894, S. 199).

physikalische Autorität galt, sondern auch weil er von Physikern wie Stokes, Tait und Jenkin nachhaltig unterstützt wurde (Burchfield ²1990).

Eine Kontroverse der Physiker mit Geologen und Biologen war unvermeidlich. Da die Physiker die Voraussetzungen der Thomson'schen Erdaltersschätzungen nicht *belegen*, ihre Opponenten die von Thomson ermittelten Zahlen aber auch nicht *widerlegen* konnten, wurde die Auseinandersetzung zu einer Frage der *Wissenschaftlichkeit* der beteiligten Disziplinen. Als solche liefert sie in der Tat ein Lehrstück für die eingangs als »Physikozentrismus« gekennzeichnete Haltung:

Thomson, Tait und auch Stokes machten klar, daß ihre Wissenschaft gegenüber den »naturgeschichtlichen« Disziplinen die historisch fortgeschrittenere sei, daß sie über die bessere wissenschaftstheoretische Fundierung verfüge und daher ihre *Ergebnisse* zum Erdalter von Geologie und Biologie als *Voraussetzungen* anzuerkennen seien.³⁶

Thomson's Untersuchungen zum Erd- und Sonnenalter zementierten die Ablehnung der Darwinschen Theorie bei den meisten Physikern. Sie hatten aber auch in der Biologie ihre Wirkung. Dar-

36 »It is quite certain that a great mistake has been made – that British popular geology at the present time is in direct opposition to the principles of Natural philosophy« (W. Thomson 1894, S. 44, vgl. 112f.). Die Biologie verharrt für ihn auf der »naturgeschichtlichen Stufe« und hat ihr Ideal in der Physik: »The essence of science, as is well illustrated by astronomy and cosmical physics, consists in inferring antecedent conditions, and anticipating future evolutions, from phenomena which have actually come under observation. In biology the difficulties of successfully acting up to this ideal are prodigious. The earnest naturalists of the present day are, however, not appalled or paralysed by them, and are struggling boldly and laboriously to pass out of the mere »Natural History stage« of their study, and bring zoology within the range of Natural Philosophy« (ebd., S. 197, vgl. 10 f.). Für Stokes ist unbestreitbar, daß das physikalische Wissen schon quantitativ das biologische übertrifft und auch qualitativ, das heißt seiner Evidenz nach auf einer höheren Stufe steht: Die Darwinsche Lehre ist den »severe demands for evidence that are required in the physical sciences« nicht gewachsen (Stokes 1883; vgl. hierzu näher Wilson 1987, S. 91). Tait schließlich verteidigt die Überlegenheit der Thomson'schen Altersschätzungen gegenüber denen der Geologie mit dem Exaktheitsanspruch der *mathematischen* Physik: »Mathematics is as essential an element of progress in every real science as language itself« (Tait 1869, S. 217). Hierzu und zu Huxleys geistreicher Kritik dieses Arguments vgl. Burchfield (²1990), S. 84 ff.

win selber sah in der Altersfrage einen der schwersten Einwände gegen seine Theorie (Darwin ³1992, S. 385 f., 540). Bei anderen Biologen trugen sie dazu bei, daß Darwins Evolutionsbegriff problematisch blieb oder erneut problematisch wurde (Bowler 1990, S. 164). Die Altersfrage war daher ein Motiv für die Suche nach »entwicklungssteuernden« Mechanismen, das heißt für die Aushöhlung des Kerns der Darwinschen Lehre nach modernem Verständnis.

Daß diese »retardierende« Wirkung des Physikozentrismus keine zwangsläufige war, belegt das (Gegen-)Beispiel Helmholtz:

In der Altersfrage, aber auch in zahlreichen anderen Fragen lassen sich Parallelen in den Forschungen Thomsons und Helmholtz' aufzeigen. Ihre Sicht auf die *Biologie* unterscheidet sich jedoch in mehreren Punkten: *Erstens* impliziert Helmholtz' Physikozentrismus einen klar artikulierten Reduktionismus: Der Bereich des Lebendigen wird bei ihm durchgängig von physikalischen Gesetzen regiert; ein *Vitalismus* ist für ihn inakzeptabel.³⁷ Wenn es für ihn in diesem Sinne auch das »Endziel der Naturwissenschaften ist, [...] sich in Mechanik aufzulösen« (Helmholtz 1896, Bd. I, S. 379), so handelt es sich hierbei doch nur um eine »ideale Forderung« für die *Zukunft*, die zunächst nur wenige praktische Konsequenzen zeitigt. Der gelehrte Mediziner Helmholtz ist insbesondere (*zweitens*) weit davon entfernt, gegenüber der Biologie einen methodologischen Vormachtsanspruch der Physik zu vertreten.³⁸ *Drittens* lehnt Helmholtz *teleologische* Erklärungen in der belebten Natur ebenso ab wie in der unbelebten Natur.³⁹

37 Vgl. Anm. 35 zu Thomsons Vitalismus und Anm. 5 zu Helmholtz' Reduktionismus. Helmholtz wichtigstes Argument gegen den Vitalismus ist, daß die Einführung einer »Lebenskraft« das (von ihm mitbegründete) Energieerhaltungsprinzip verletzen würde (Helmholtz 1896, Bd. I, S. 386 ff.; Bd. II).

38 Die Beziehung der Naturwissenschaften zueinander sieht Helmholtz nicht »hierarchisch« wie Thomson (vgl. Anm. 36). Er charakterisiert sie vielmehr als fruchtbare wechselseitige Austauschprozesse, die durch Spezialisierung und Arbeitsteilung notwendig geworden sind und die durch jedweden Dogmatismus (metaphysischer oder auch methodologischer Art) behindert würden (Helmholtz 1896, Bd. I, S. 157 ff.; Bd. II, S. 165 ff.). In seinen methodologischen Ausführungen spricht sich Helmholtz zwar für »die strenge Disciplin der induktiven Methode« aus und verteidigt den Induktivismus der britischen Physiker gegen die Polemik Zöllners (1896, Bd. II, S. 413 ff., insbes. 421; vgl. auch 172 ff.); für weitere Informationen hierzu vgl. Pulte (1995), S. 128 f.

39 Beispielsweise etabliert er das physikotheologisch »belastete« Prinzip der kleinsten Wirkung als allgemeinstes Naturgesetz – jedoch als ein lediglich *teleonomisches*

Die augenscheinliche Zweckmäßigkeit im Bereich des Lebendigen, etwa im Bau der Organe, ist nicht als *Beweisgrund* im Sinne der Physikotheologie anzusehen, sondern als ein *Erklärungsproblem* für die Naturwissenschaften.

Auf diesem Hintergrund wird verständlich, daß Helmholtz zu einer ganz anderen Bewertung der Evolutionstheorie kommt als Thomson. Er sieht in Darwins Lehre einen wichtigen Beitrag zur Durchführung seines eigenen, mechanistischen Programms. Das hauptsächliche *Verdienst* der Evolutionstheorie liegt für Helmholtz darin, daß sie die *natürliche* (das heißt für ihn: weder physikotheologische noch vitalistische) Erklärung des Zweckmäßigen voranbringt: »Darwin's Theorie enthält einen wesentlich neuen schöpferischen Gedanken. Sie zeigt, wie Zweckmäßigkeit der Bildung in den Organismen auch ohne alle Einmischung von Intelligenz durch das blinde Walten eines Naturgesetzes entstehen kann.«⁴⁰ Diese Theorie ist für ihn zwar noch keine vollständig, aber eine *immer besser* bestätigte naturwissenschaftliche Theorie mit großer Erklärungskraft.⁴¹

Wie bringt nun Helmholtz diese Theorie, deren Bedeutung für die Biologie er ebenso groß einschätzt wie die des Energieerhaltungsprinzips für die Physik (Helmholtz 1896, Bd. II, S. 338), mit der physikalischen Erdaltersschätzung in Einklang, die sich nach Thomson und Jenkin geradezu zwangsläufig aus den beiden Hauptsätzen der Thermodynamik ergibt?

Helmholtz teilte im wesentlichen die Altersschätzungen Thomsons und war zweifellos mit dem von Thomson konstatierten »di-

Beschreibungsmittel. Zur Frühgeschichte dieses Prinzips vgl. Pulte (1989); zu Helmholtz' Ausdehnung und physikalischer Interpretation vgl. Helmholtz (1895), S. 203 ff. und 119 ff.

⁴⁰ Helmholtz (1896), Bd. I, S. 388. Dies wirft natürlich die Frage auf, wie Helmholtz die *Zufälligkeit* der Darwinschen Variation (vgl. Anm. 24) in seinen Mechanismus integriert. Innerhalb seines Mechanismus kann es sich hier nur um eine »vorläufige« Zufälligkeit in dem von Darwin angedeuteten Sinne handeln, die in der Zukunft durch eine mechanische Gesetzmäßigkeit eliminiert werden muß.

⁴¹ Dabei bemerkt Helmholtz bereits 1869, daß die Erklärungsleistung dieser Theorie nicht nur in ihrer Ordnungsfunktion liegt, sondern daß sie auch eine *prognostische* Funktion beinhaltet. Diese besteht freilich nicht in der von den viktorianischen Physikern geforderten Vorhersage spezieller neuer Arten (vgl. Anm. 17), sondern allgemeiner darin, daß in den von Darwin postulierten Entwicklungsreihen immer mehr Lücken geschlossen werden (Helmholtz 1896, Bd. I, S. 389).

rekten Widerspruch« zu Geologie und Evolutionstheorie vertraut.⁴² Er selber machte diesen (vermeintlichen) Widerspruch aber gar nicht explizit.

Vielmehr stellt er die Lücken der biologischen *und der physikalischen* Kenntnisse über Anfang und Ende der Erde heraus und betont die *Offenheit* der Problematik für weitere Untersuchungen (ebd., S. 88 f.). Die Idee der *Anpassung* an vorhandene geologische und physikalische Umgebungen benutzt er, um den von der Physik »gewährten« Zeitraum möglichen irdischen Lebens nach beiden Richtungen auszudehnen.⁴³ Was also bei Thomson als unüberbrückbarer Widerspruch erscheint, wird bei Helmholtz harmonisiert und für die künftige Klärung offengehalten.

Thomson und Helmholtz geben ein Beispiel dafür, in welchem Maße wissenschaftstheoretische Leitvorstellungen forschungspraktisch wirksam sein können und Forschungsstrategien bestimmen: Eine nach innerwissenschaftlichen Maßstäben keineswegs sichere These wie die des physikalischen Erdalters kann beharrlich verfolgt und unter Aufbringung der ganzen Autorität des Fachs als »hartes« Argument gegen eine Theorie vorgebracht werden, die diesen Leitvorstellungen widerspricht. Die gleiche These kann aber auch hypothetisiert, zu einer »weichen« Vermutung heruntergespielt werden, um eine als fruchtbar angesehene neue Theorie zu stützen, wenn diese mit den eigenen Leitvorstellungen konform geht. Sowohl Thomsons als auch Helmholtz' Haltung gegenüber der Darwinschen Theorie wird man im Rahmen ihrer jeweiligen Wissenschaftstheorie als weitgehend rational begründet ansehen können, und erst *post festum* läßt sich Helmholtz' Position als die *angemessenere* kennzeichnen.

Die *einflussreichere* Position war jedenfalls die der viktorianischen

⁴² Nach Helmholtz' eigener Rechnung würde die Gravitationskontraktion für 22 Millionen Jahre in der Vergangenheit und weitere 17 Millionen Jahre in der Zukunft ausgereicht haben bzw. ausreichen (Helmholtz 1896, Bd. I, S. 82 f.). Er unterhielt ausgezeichnete Kontakte zu den britischen Physikern, u. a. auch zu Thomson. Mehrfach hielt er sich zu Vorträgen und Tagungen auf der Insel auf – so auch 1861, als die Kontroverse um das Erdalter ausbrach (Koenigsberger 1903, insbes. Bd. I, S. 372 ff.). Die guten Beziehungen u. a. zu Thomson und Tait erklären wohl auch, warum Helmholtz sich nicht aktiv in die Debatte eingeschaltet hat.

⁴³ Dabei hebt er stark das *fehlende Wissen* der Physik hervor, vgl. insbes. Helmholtz (1896), Bd. II, S. 89.

Physiker. Allgemein zeigt hier die Theorie des Erdalters, daß eine etablierte und dominierende Wissenschaft wie die Physik inkompatibel erscheinende Entwicklungen in einer anderen Disziplin (wie der Biologie) über längere Zeit behindern kann, ohne (wiederum *post festum* geurteilt) im Recht zu sein. Diese dominierende Variante des Physikozytrismus wirkte sich eindeutig negativ für Darwin aus. Tatsächlich war es der Evolutionstheorie im 19. Jahrhundert nicht möglich, *ih*r Erdalter von einer (durch die Geologie gegebene) *Voraussetzung* in eine (gegen die Physik aufrechterhaltene) *Erklärung* zu verwandeln. Es war die *Physik* selber, die durch revolutionäre Umwälzungen in ihren eigenen Grundlagen, darunter die Entdeckung der natürlichen Radioaktivität, zu einer enormen Ausdehnung des Erdalters kam. *Sie* beseitigte den Widerspruch zur Darwinschen Theorie, den sie *dieser Theorie* zur Last gelegt hatte.

4. Ernst Machs »kopernikanische Wende« des Physikozytrismus

Tyndall und Helmholtz gehörten *nicht* zur breiten »physikalischen« Ablehnungsfront gegen Darwin. Beide sahen die Möglichkeit, die Evolutionstheorie in ihre jeweiligen mechanistischen Programme zu integrieren. Sie zogen jedoch eine Schlußfolgerung *nicht*, die sich aus der konsequenten Anwendung des Evolutionsgedankens auf den Menschen als *erkennendes* Subjekt (zugleich also auch Objekt) ergibt: daß nämlich die menschlichen Erkenntnisstrukturen und somit auch die Gesetze der Physik selber als Produkte der Anpassung an einen gewissen Realitätsausschnitt aufzufassen sind. Diese Gesetze wären demnach als nur beschränkt gültig (für ebendiesen Ausschnitt) und als dem zeitlichen Wandel unterworfen anzusehen. Demgegenüber hält der neuere Mechanismus Tyndalls und Helmholtz', trotz aller Unterschiede gegenüber dem »traditionellen Mechanismus« (Rey 1908), an einem essentialistischen Gesetzesverständnis fest, nach dem es universelle und unveränderliche Naturgesetze in der äußeren Realität *gibt*, die dem Menschen »als eine objective Macht« gegenüberstehen.⁴⁴

⁴⁴ Helmholtz (1896), Bd. I, S. 376. Diese Auffassung ist vom Wandel seiner Wissenschaftsauffassung nicht betroffen (vgl. Helmholtz ²1922, S. 14). Nur bei der Erörterung des Status der Axiome der Geometrie geht Helmholtz kurz auf Er-

Für Ernst Mach dagegen »scheint« es sich hier nur um eine »fremde Macht« zu handeln (Mach 1923, S. 252). Ihm ist ein solcher Mechanismus ein nur historisch begreifliches »Vorurteil« (Mach ¹1982, S. 472), von dem er sich selber früh freimachte. Wenige Jahre nach Erscheinen des *Origin of Species* war er dabei der erste Vertreter der »exakten Wissenschaften« überhaupt, der, ausgehend von Darwins Lehre, die Idee der *Entwicklung* für die Erkenntnistheorie und die Wissenschaftstheorie der Physik fruchtbar zu machen versuchte.⁴⁵ Dies bedeutet unweigerlich auch eine Abkehr vom Physikozytrismus – gleichsam eine »Kopernikanische Wende« im Verhältnis von Physik und Biologie.

Tatsächlich sollte man bei Mach von einer durch Darwin vermittelten Entwicklungsidee und nicht vom Evolutionsbegriff im eigentlich Darwinschen Sinne sprechen. Durch diese Idee wird ein »naturwüchsiger« Zusammenhang aller Bereiche seines wissenschaftlichen Denkens hergestellt, der kurz nach seiner biologischen, erkenntnis- und wissenschaftstheoretischen Seite hin getrennt skizziert werden soll:

Im biologischen Kontext bezieht sich Mach fast durchgängig auf Darwin und erwähnt Lamarck nur sporadisch als Vorläufer, obwohl er Lamarcks Idee der Vererbung erworbener Eigenschaften große Bedeutung beimißt.⁴⁶ Die Evolutionstheorie wird häufig zur Stützung des Entwicklungsgedankens herangezogen, aber ihre bio-

kenntnisstruktur und Anpassung ein (Helmholtz 1896, Bd. II, S. 15); zu Tyndall vgl. Anm. 15.

⁴⁵ Noch 1863 vertritt Mach einen Mechanismus, insbesondere ein essentialistisches Gesetzesverständnis im Sinne von Helmholtz (Mach 1863, S. 3 ff.). Die Evolutionstheorie war offenbar ein wichtiges Moment für die Auflösung dieser Position. Rückblickend schreibt Mach: »Als Gymnasiast lernte ich schon 1854 die Lehre Lamarcks [...] kennen, war also wohl vorbereitet, die 1859 publizierten Gedanken Darwins aufzunehmen. Diese wurden schon in meinen Grazer Vorlesungen 1864-1867 wirksam und äußern sich durch Auffassung des Wettstreits der wissenschaftlichen Gedanken als Lebenskampf, als Überleben des Passendsten« (Mach 1910, S. 600). Machs »zwangloser« Übergang von Lamarck zu Darwin weist (erstmalig) darauf hin, daß er eine grundsätzliche Differenz zwischen beiden Ausätzen gar nicht vornimmt.

⁴⁶ Vgl. etwa Mach (¹1923), S. 246; (²1919), S. 380 f. und zur Vererbung erworbener Eigenschaften (¹1923), S. 615; (¹1991), S. 64 f. Gegenüber Weismanns rigoroser biologischer Kritik dieses Gedankens von Lamarck beharrt Mach zumindest auf der Möglichkeit, daß »der Einfluß des individuellen Lebens auf die Nachkommen doch nicht auszuschließen« sei (Mach ¹1991, S. 65; vgl. ¹1923, S. 615).

logischen Aussagen werden nirgendwo im Detail erläutert. Insbesondere der Zufallscharakter der Variation und die Ungerichtetheit der Evolution werden von Mach offenbar nicht grundsätzlich reflektiert, jedenfalls aber nicht akzeptiert.⁴⁷

Es gibt also eine ›Machsche Unschärferelation‹ hinsichtlich des biologischen Gehaltes der Darwinschen Lehre,⁴⁸ und diese erweist sich geradezu als konstitutiv dafür, daß Mach diese Lehre auf die *Erkenntnistheorie*⁴⁹ anwenden kann: »[...] die Erkenntnis ist eine Äußerung der organischen Natur.« (Mach ³1919, S. 249). Dieses Diktum könnte man als *Hauptsatz* der Machschen Erkenntnislehre bezeichnen. Tatsächlich will Mach alle Formen der Erkenntnis, von der einfachsten Gedächtnisleistung eines Tieres bis hin zur genialen wissenschaftlichen Idee und kulturellen Schöpfung, als Anpassungsleistungen des Individuums *und* der Art im Überlebenskampf verstanden wissen: »Gedanken sind keine *gesonderten* Lebewesen. Doch sind Gedanken Äusserungen des organischen Lebens. Und, wenn Darwin einen richtigen Blick getroffen hat, muss der Zug der Umbildung und Entwicklung an denselben wahrzunehmen sein« (Mach ³1919, S. 382). Weite Teile von Machs Erkenntnislehre sind als Explikationen dieses Gedankens aufzufassen: »In kürzester Art ausgedrückt, erscheint dann als Aufgabe der wissenschaftlichen Erkenntnis: Die Anpassung der Gedanken an die Tatsachen und die Anpassung der Gedanken aneinander.«⁵⁰

47 Vgl. Mach (¹1923), S. 247, 287; für weitere Einzelheiten vgl. Pulte (1995), S. 133 f.

48 Diese Unbestimmtheit kommt auch in seiner schwankenden Beurteilung der Darwinschen Theorie zum Ausdruck. In seinen Werken findet sich sowohl eine euphorische Gleichstellung mit der Mechanik Galileis (Mach ³1919, S. 380 f.; ¹1923, S. 247 f.) als auch die Feststellung, »daß sich die Entwicklungslehre in jeder Form als eine modifizierbare, zu verschärfende *naturwissenschaftliche Arbeitshypothese* betrachte [...]« (Mach ³1919, S. 65 f.).

49 Mach spricht lediglich von einer »Erkenntnislehre«, um sich bewußt von den Systemen der Schulphilosophie abzugrenzen, und kennzeichnet diese als eine »biologisch-ökonomische« (Mach 1910, S. 600), um klarzumachen, daß Biologie und Nationalökonomie schon in der ›Ontogenese‹ seiner Anschauungen leitend waren. Diese Lehre stützt sich ganz auf die Einzelempfindungen des Subjekts und verwirft alle Aussagen als Metaphysik, die auf eine Realität hinter diesen Empfindungen abzielen; vgl. Capek (1968).

50 Mach (1910), S. 600. Sein bekanntes Prinzip der Denkökonomie etwa ist auf diesem Hintergrund als ein gleichsam phänotypisches Merkmal aufzufassen, das seine ›biologische‹ Erklärung darin findet, daß Einfachheit und Zweckmäßigkeit der Erkenntnis einen Selektionsvorteil gewähren; vgl. Mach ³1919, S. 590; vgl. 227 f.

Mach selber hat das Problem artikuliert, »die ganze technische und wissenschaftliche Kultur als [...] Umweg« zum Ziel der Selbsterhaltung zu begreifen (Mach ³1980, S. 60). Ein Reflex auf diese Problematik ist sein Gebrauch des Evolutionsbegriffs im kognitiv-kulturellen Bereich: Die im biologischen Kontext auftretende ›Unschärfe‹ wird hier einwandfrei *zuungunsten* der Darwinschen Entwicklungsvorstellung entschieden. Mach glaubt daran, daß die vom Individuum angesammelte Erkenntnis biologisch ›engrammiert‹ und durch Vererbung an die Nachfahren weitergegeben werden kann. Sein Entwicklungsgedanke ist stark lamarckistisch geprägt, wenn es darum geht, kognitive Veränderungen im weitesten Sinne zu erfassen.⁵¹ Der Prozeß der kognitiven Entwicklung im Individuum *und* der Art ist daher für ihn auch ein eindeutig fortschrittsorientierter.⁵² Machs Vorstellungen zur *Wissenschaftsdynamik* allgemein folgen, entgegen seiner eigenen Einschätzung, eher dem biologischen Modell Lamarcks als Darwins.

Dies festzustellen ist wichtig, insbesondere im Hinblick auf seine Theorie der Wissenschaftsgeschichte,⁵³ während für seine Wissenschaftstheorie im engeren Sinne der entscheidende Punkt die durch Darwin vermittelte ›biologische‹ Orientierung ist. Hier kommt Mach trotz seiner empiristischen Grundhaltung zu einer Auffassung, die mit der des älteren Induktivismus, dem zufolge »das Entdecken ein recht behagliches Handwerk« wäre (Mach ³1919, S. 445), nur noch wenig gemein hat. Andererseits stimmt Mach in wesentlichen Punkten mit Darwins Wissenschaftsverständnis⁵⁴ überein:

51 Vgl. hierzu insbes. Mach (¹1919), S. 615 ff. Tatsächlich glaubt Mach sogar daran, daß »wesentliche organische Umbildungen« erklären können, warum neue wissenschaftliche Theorien zunächst weitgehend abgelehnt und »nach einem Jahrhundert« weitgehend anerkannt werden (¹1923, S. 258).

52 Daß Darwins »zweispaltige Einstellung zum Fortschritt« (Engels 1989, S. 89) von Mach nicht geteilt wird, läßt sich vielfach belegen; vgl. etwa Mach (¹1923), S. 76 und S. 257 ff.

53 Das Beispiel Mach belegt besonders gut, daß Theorien der Wissenschaftsgeschichte, die die nachweisbaren historischen Prozesse im Auge behalten, sich nicht auf Darwins Evolutionstheorie berufen können – und *vice versa* (vgl. Bayertz 1987). Insbesondere zur zufälligen Variation der Biologie kann im Bereich der Ideen- und Theoriengesehne keine auch nur annähernd befriedigende Analogie hergestellt werden. Es hat deshalb eine gewisse symbolische Bedeutung, wenn Mach gegen Ende seines Lebens die frühe Entwicklung ›von Lamarck zu Darwin‹ invertiert (vgl. Blackmore/Hentschel 1985, S. 142; vgl. 146 f.).

54 Der wichtigste, erkenntnistheoretisch vermittelte *Unterschied* zu Darwin liegt

Fokussiert im Hinblick auf die früheren Charakterisierungen (Teil 2 dieses Aufsatzes), läßt sich feststellen, daß Machs Auffassung (1) Darwins eher *holistisches* Theorienverständnis mit umgreift,⁵⁵ daß sie (2) zweifelsfrei ebenfalls *probabilistisch* (und nicht *certistisch*), (3) *plausibilistisch* und prognostizistisch⁵⁶ sowie (4) auch eindeutig *deskriptionistisch* (und nicht *essentialistisch*) ist.

Keiner der wissenschaftstheoretischen Einwände, welche die viktorianischen Physiker gegen Darwin vorbrachten, hat daher nach dem Wissenschaftsverständnis eines Mach Bestand. Ebenso ist bei ihm einem (wenngleich »affirmativen«) Physiko-zentrismus Helmholtzscher Prägung der Boden entzogen. Die Stellung der Physik zur Biologie wird bei Mach nicht gerade umgekehrt, weil die Entwicklungsbiologie der Physik nur zeigen kann, daß ihre grundlegenden Voraussetzungen (wie die Struktur des Raumes und der Zeit, das Kausalitätsprinzip) historisch gewachsen und somit veränderbar sind, aber nicht, wie diese Veränderung aussieht. Physik und Biologie werden gewissermaßen »ins Gleichgewicht« gebracht. Seiner Forderung: »Die Wissenschaft schafft nicht eine Tatsache aus der anderen, sie ordnet aber die bekannten« (Mach ⁵1923, S. 242) genügt die Darwinsche Evolutionstheorie ebenso wie etwa die theoretische Mechanik oder die Elektrodynamik. Diese Konsequenz wäre für einen Whewell oder William Thomson wissenschaftstheoretisch inakzeptabel, und auch Helmholtz vermeidet sie. Mach aber meint auch Darwin, wenn er ebendiese Schlußfolgerung zieht, zu der er ohne Darwin kaum hätte gelangen können: »Die imposantesten Sätze der Physik, lösen wir sie in ihre Elemente auf, unterscheiden sich in nichts von den beschreibenden Sätzen des Naturhistorikers« (ebd., S. 230).

darin, daß Darwin naturwissenschaftliche Theorien als Ganzes realistisch interpretiert, während es sich hier bei Mach um »eine Art Instrumentensammlung zur gedanklichen Ergänzung irgendwelcher teilweise vorliegender Tatsachen oder zur möglichststen Einschränkung unserer Erwartung in künftig sich darbietenden Fällen« handelt (Blackmore/Hentschel 1985, S. 455).

55 Vgl. hierzu Anm. 20 sowie Mach (⁵1980), S. 165 und S. 202 f.; weitere Informationen hierzu in Pulte (1995), S. 136 f.

56 Vgl. Mach (⁵1923), S. 283 f. Sein Begriff der Beschreibung schließt die im Induktivismus so wichtige Bestätigungsinstanz der *Prognose* ein, aber eben auch *Verstehbarkeit* im Sinne Darwins.

Machs Darwin-Rezeption hat, wie seine wissenschaftstheoretischen Leitvorstellungen allgemein, beträchtlichen Einfluß auf die Physik des ausgehenden 19. und des 20. Jahrhunderts genommen. Er trug vermutlich mehr als jeder andere Physiker dazu bei, daß »wissenschaftsdarwinistische« Vorstellungen in die naturwissenschaftliche und technische Ausbildung gelangten und so eine starke Verbreitung fanden.⁵⁷ Ludwig Boltzmann, sein (informeller) Nachfolger auf dem Wiener Lehrstuhl für »Geschichte und Theorie der inductiven Wissenschaften« und Gegner in der Atomismus-Debatte, wurde wohl durch ihn zum Verfechter der Evolutionstheorie. Boltzmann prophezeite, das 19. Jahrhundert werde einst als das »Jahrhundert der mechanischen Naturauffassung, das Jahrhundert Darwins« gefeiert werden.⁵⁸

Helmholtz, Mach und Boltzmann gehörten zu den wissenschaftstheoretischen Vordenkern der deutschsprachigen Physik des 19. Jahrhunderts. Ihre Beispiele positiver Darwin-Rezeption stehen in starkem Kontrast zur Aufnahme in der viktorianischen Physik. Eine breitere Untersuchung der deutschen Rezeption, als sie hier dargestellt werden kann, dürfte diesen Befund bestätigen. Will man hierfür nicht, frei nach Duhem,⁵⁹ wissenschaftliche »Volkscharaktere« pauschal verantwortlich machen, wird man in der vielschichtigen Darwin-Rezeption auf *verschiedenen* Ebenen Faktoren zu suchen haben, die eine positivere Aufnahme in der deutschsprachigen Physik ermöglicht haben. Zusammenfassend und zugleich extrapolierend sollen hierzu einige Überlegungen angestellt werden.

Zunächst scheint die Biologie in Deutschland institutionell stärker etabliert und ihr Verhältnis zur Physik ein engeres, durch institutionelle und curriculare Schranken weniger belastetes gewesen zu

57 Zur Problematik der Bezeichnung »Wissenschaftsdarwinismus« vgl. die Anm. 51 bis 53. Machs eigene Schriften, insbesondere seine *Mechanik*, erlebten zahlreiche Auflagen und waren in der Physik äußerst einflußreich. Das vermutlich markanteste Beispiel für die *mittelbare* Wirkung seiner Ideen liefert der Physiker und Ingenieur August Föppl, der mit Mach in Briefwechsel stand und Machs biologische Erkenntnislehre übernahm; Näheres hierzu in Pulte (1995), S. 138.

58 Boltzmann (1905), S. 28; vgl. (1990), insbes. S. 78.

59 Zur problematischen Unterscheidung Duhems zwischen dem »tiefen aber engenfranzösischen und dem »umfassenden, aber schwachen« englischen Geist vgl. Duhem (1978), S. 79 ff. Darwin war für ihn ein typisch englischer Denker (S. 83).

sein. Dies erleichterte die Forschung auf einem Grenzgebiet wie der Sinnesphysiologie (Helmholtz, Mach, Fechner, Zöllner u. a.; vgl. Helmholtz 1896, Bd. I, S. 396 f.) und trug zum Abbau des Physiko-zentrismus bei. Mach gibt hierfür das beste Beispiel, aber auch ein ›Reduktionist‹ wie Helmholtz sah die Möglichkeit, Mechanismus und Evolutionstheorie zu vereinbaren.

Unter den Einflüssen der deutschen *Schulphilosophie* war es zweifellos der Materialismus-Streit zur Jahrhundertmitte, der eine positive Darwin-Rezeption vorzubereiten half (Gregory 1977, S. 164 ff.).⁶⁰ Der ›scientific materialism‹ eines Tyndall in Großbritannien dagegen kam später und hatte für den Darwinismus keine Wegbereiter-, sondern eher eine Wegbegleiter-Funktion: Von den Physikern wurde *auch er* zunächst kaum positiv rezipiert.

Weiter spielte das physikotheologische ›design argument‹ eine wichtige Rolle in der Darwin-Kritik der viktorianischen Physiker. In der deutschsprachigen Physik des 19. Jahrhunderts hingegen hatte die Physikotheologie kein Gewicht mehr – ein Faktum, das selber nur philosophiegeschichtlich zu verstehen ist: Es war Kant, der davor warnte, »für die Naturwissenschaft und in ihrem Kontext den Begriff von Gott« hineinzubringen, »um sich die Zweckmäßigkeit in der Natur erklärlich zu machen, und hernach die Zweckmäßigkeit wiederum braucht, um zu beweisen, daß ein Gott sei [...]« (Kant 1974, S. 331: A301, B305). Helmholtz etwa, der in Kant den einzigen verlässlichen ›Ankerpunkt‹ einer neu zu begründenden *wissenschaftlichen* Philosophie sah, folgt dessen Kritik der Physikotheologie, wenn er Darwins größte Leistung in einer *natürlichen* Erklärung der Zweckmäßigkeit des Lebendigen erblickt.

Schließlich wirkte der recht *starre* Induktivismus als leitende Wissenschaftstheorie der viktorianischen Physik negativ auf die Darwin-Rezeption. Die deutschsprachige Physik verfügte zwar nicht über eine derart dominierende Wissenschaftstheorie. Generell läßt sich aber sagen, daß hier einer Theoriebildung, die im Herschel-Whewellschen Sinne *nicht* als ›induktiv gesichert‹ erschien, ein größerer Spielraum gewährt wurde. Es ist charakteristisch, daß der Darwin-Anhänger Boltzmann seine kinetische Gastheorie gegen Ende des Jahrhunderts ähnlichen Einwänden von seiten des

⁶⁰ Vgl. Gregory (1977), S. 164 ff.; vgl. hierzu auch die verschiedenen Beiträge in Bayertz/Gerhard/Jaeschke (2007), Bde. 1 und 2; weitere Hinweise in Pulte (1995), S. 140.

Darwin-Gegners Tait ausgesetzt sah, wie sie Thomson, Tait und andere zuvor gegenüber der Darwinschen Theorie geäußert hatten.⁶¹

6. Ein Ausblick auf die Mathematik

Die von Darwin in der Erdaltersdiskussion beklagte »mathematische Arroganz« (F. Darwin, 1903, Bd. II, S. 314) mancher Physiker zeigt an, daß diese die Autorität der Mathematik *als Wissenschaftsinstanz* durchaus für ihre Zwecke zu nutzen wußten. Herbert Spencer sah sich ebenfalls einer Allianz von Physik *und* Mathematik gegenüber: Für ihn waren Wissenschaftler, die sich »mit Mathematik und mathematischer Physik beschäftigten [und] in deren Köpfen die Lösung der Evolution keine Antwort bedeutete«, auf Grund ihrer einseitig logisch-analytischen Ausbildung mit gewissen »Mängeln des Denkens« belastet, die ihnen den Zugang zu seiner (evolutionären) Philosophie versperrten (Spencer 1966, S. 88).

Sicherlich stellt sich das Verhältnis von Mathematik und Evolutionstheorie bei näherer Betrachtung weniger einseitig-kontrovers dar, als es angesichts solcher Wahrnehmungen scheinen mag: Anders als die Physik liefert mathematische Grundlagenforschung ja keine unmittelbar *empirisch* relevanten Aussagen, die mit solchen der Biologie in Widerspruch geraten und zu ›Katalysatoren‹ wissenschaftstheoretischer Kontroversen werden können. Und doch bleibt

⁶¹ Zu Tait's Boltzmann-Kritik vgl. Bellone (1980), S. 29 ff. Auch diese Kritik wurde von William Thomson gesteuert (S. 31). Sie zielt im Kern darauf ab, daß Boltzmanns Gastheorie ein Übergewicht auf mathematische Deduktion lege und empirisch nicht hinreichend begründet sei. Bellone bemerkt treffend zu Thomson: »We will also find that he fights hard to eliminate all those theories that betray Newtonianism by assuming as premiss conjectures about what is unobservable. The kinetic theory of matter and Darwin's evolutionary theory are in his opinion two cases in point« (S. 51). Als ein ›Gegenstück‹ zu Tait's Boltzmann-Kritik kann man die polemische Thomson/Tait-Schelte des deutschen Astronomen Zöllner ansehen (vgl. Zöllner 1872, S. VIII). Boltzmann selber sah eine Annäherung von physikalischer und biologischer Theoriebildung und brachte sie mit Hilfe der Unterscheidung von ›Beschreibung‹ und ›Erklärung‹ (vgl. den Schluß von Abschnitt 2) zum Ausdruck: »[...] die früher so genannten beschreibenden Naturwissenschaften triumphierten, als ihnen die Hypothese Darwins erlaubte, die Lebensformen und Erscheinungen nicht bloß zu beschreiben, sondern ebenfalls zu erklären. Sonderbarerweise machte fast gleichzeitig die Physik die entgegengesetzte Schwenkung« (Boltzmann 1905, S. 4 f.).

auch die Mathematik von der ›Darwinschen Revolution‹ nicht unberührt, und zwar in mehrfacher Hinsicht. *Erstens* trägt die Evolutionstheorie – neben der Physik und der Sozialwissenschaft – in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts maßgeblich zur Entwicklung der *mathematischen Statistik* bei. Ausgehend von den biometrischen Ansätzen Francis Galtons, einem Cousin Charles Darwins, wurden unter dem direkten Einfluß von Darwins *Origin* stochastische Methoden zur Analyse von Evolutionsprozessen entwickelt, die dann ab dem frühen 20. Jahrhundert zum Kernbestand einer *mathematischen Biologie* gehörten, in der u. a. die Ausbildung einer »mathematischen Theorie des Kampfs ums Dasein« weiter verfolgt wird.⁶² Die Etablierung einer solchen *mathematischen* »Wissenschaft der Unge-
 wißheit« (Porter 1986, S. 149) im späteren 19. Jahrhundert leistete einen sehr wichtigen Beitrag zur *Modernisierung* des klassischen Wissenschaftsbegriffs, unter dessen Dominanz die Rezeption der Darwinschen Evolutionstheorie in der Frühphase ihrer Rezeption so stark beeinträchtigt wurde: Die mathematische Statistik ›autorisierte‹ gleichsam, im Verbund mit der statistischen Physik, das Eindringen des Zufallsbegriffs in die Evolutionstheorie und ›adelt‹ diese Theorie zugleich, indem sie sie einer mathematischen Behandlung zugänglich machte. Charles S. Peirce und Karl Pearson waren die exponiertesten Vertreter dieses neuen *mathematischen Indeterminismus*, und beide waren ausgesprochene Anhänger und Verteidiger der Darwinschen Lehre.⁶³

Zweitens rückt die Mathematik – stärker noch als die Physik (vgl. Teil 4) – früh in den Fokus einer Evolutionstheorie der menschlichen *Erkenntnis*, die in Charles Darwin selber ihren Begründer hat (Engels 1989, S. 63-129). Die Mathematik nimmt hier neben der Logik deshalb eine besondere Stellung ein, weil sie mit ihren fast

62 Vgl. hierzu Israel (1994), insbes. S. 1277, mit Bezug auf eine Arbeit Vito Volterras, in der dieser Theorieanspruch explizit vertreten wird. Zur Entwicklung der Statistik und der Rolle der Darwinschen Theorie im fraglichen Zeitraum allgemein vgl. Gigerenzer (1989), S. 152-162 und Porter (1986), S. 270-314.

63 Zu Peirce vgl. Anm. 24, vor allem aber Gigerenzer (1989), S. 65-68 und S. 152 f. Karl Pearsons *Grammar of Science* von 1892 enthält nicht nur ein einflußreiches Plädoyer für die Mathematisierung der Biologie mit Methoden der Statistik – mit dem Ziel, die Biologie von metaphysischen ›Restbeständen‹ zu befreien –, sondern auch Ausführungen zur Anwendung der Darwinschen Theorie auf den Bereich des Sozialen und selbst auf die »Inorganic world« (Pearson 1937, insbes. S. 299-311 und S. 332 f.).

durchgehend als apriorisch und statisch angesehenen Grundbegriffen und (sofern es um die Kantische Tradition geht) Anschauungsformen sowie der meist fraglos akzeptierten Notwendigkeit ihrer Aussagen gleichsam ein ›natürliches Ziel‹ evolutionärer Erkenntnis-kritik abgab. Einer der wichtigsten Vertreter dieser Kritik war der Mathematiker William K. Clifford, der mit Bezug auf Darwin und Spencer die Kantische Philosophie der Mathematik zurückwies, namentlich die – nach seinem Verständnis bei Kant aufweisbare – Auffassung, daß die synthetischen Urteile *a priori* (also nach Kant auch die meisten Urteile der Mathematik) zugleich *universelle Erfahrungsurteile* seien: »Die Lehre von der Evolution selber verbietet es mir, irgendeine transzendente Quelle des Wissens anzuerkennen; ich werde also in bezug auf jede scheinbar allgemeine Aussage zu dem Schluß genötigt, daß sie entweder nicht wirklich allgemein ist oder daß ich nicht weiß, daß sie wahr ist« (Clifford 1873, S. 335 f.). Die evolutionstheoretisch motivierte Diskussion zum erkenntnistheoretischen Status logischer und mathematischer Urteile wurde in Großbritannien von den Gegnern Darwins zum Teil mit ähnlichen Tautologie- und Zirkularitätsvorwürfen geführt, die auch die Debatte der evolutionären Erkenntnistheorie im späteren 20. Jahrhundert begleiteten (vgl. etwa J. C. Wilson 1889, bes. S. 16-19). Im viktorianischen England hatte die Auseinandersetzung durchaus auch eine *theologische* Dimension, weil Agnostiker wie Clifford den Anspruch von theistischer Seite, in Gestalt der Mathematik über transzendentes und absolutes Wissen zu verfügen, unterminierten (vgl. Lightman 1987, S. 161-164; Richards 1988, S. 103-114).

In Deutschland zählte zu den scharfsinnigsten Verteidigern einer ›evolutionären‹ Auffassung mathematischen und logischen Wissens Georg Simmel (Simmel 1895; vgl. Engels 1989, S. 286-289). Die wissenschafts- und erkenntnistheoretischen Probleme dieser allgemeinen Diskussion können hier nicht näher ausgeführt werden. In der am Ende des 19. Jahrhunderts offen ausbrechenden ›dritten Grundlagenkrise‹ der Mathematik sind evolutionär-erkenntnistheoretische Argumente zwar nicht relevant geworden, weil sie außerhalb jenes Rahmens wissenschaftlicher Rationalität lagen, den die dominierenden Richtungen Logizismus und Formalismus anerkannten. Langfristig aber hat die auf Darwin zurückgehende Evolutionäre Erkenntnistheorie sehr wohl das Wissenschaftsverständnis der Mathematik mit geprägt, wie sich in der neueren

Philosophie der Mathematik deutlich nachweisen läßt (vgl. etwa Kitcher 1984, S. 95 ff.).

Drittens sollte hervorgehoben werden, daß die angedeutete all-gemeinere Einwirkung der Darwinschen Theorie auf die Mathematik von Beginn an – so etwa auch bei Clifford – stark von der Grundlagenentwicklung innerhalb der *Geometrie* geprägt war. Die öffentliche Diskussion um die philosophischen Implikationen der Entdeckung nichteuklidischer Geometrien beginnt erst um 1870, fällt also in die Zeit intensiver Auseinandersetzung mit der Deszendenztheorie und auch deren (weitgehender) Durchsetzung. Der Hauptstreitpunkt der »evolutionstheoretischen« Geometriediskussion besteht darin, ob Raumanschauung ein *apriorisches* Vermögen (im Sinne Kants) oder eine spezifische *Anpassungsleistung* (im Sinne Darwins) darstellt (vgl. etwa Halsted 1896). Diese Frage beschäftigt den »modernisierten« Empirismus im viktorianischen Großbritannien ebenso wie den deutschen Neukantianismus oder die französische »Critique de la Science«. Gründliche und umfassende Forschungen hierzu stehen noch aus, doch läßt sich tendenziell wohl folgendes sagen: Die durch die Mathematik selber hervorgebrachte »Pluralisierung« von logisch gleichberechtigten Geometrien wird – wenn auch auf höchst verschiedene Weisen – mit Hilfe des Evolutionsgedankens zugunsten eines gewissen erkenntnistheoretischen (oder auch nur psychologischen) Vorrangs der euklidischen Geometrie im *klassischen* Sinne, die von einem dreidimensionalen Raum ausgeht, entschieden. Henri Poincaré beispielsweise schränkt seinen theoretischen Konventionalismus »biologisch« ein, wenn er die Dimensionszahl für den »realen« Raum in darwinistischer Manier bestimmt: »ein Wesen, das dem Raum zwei oder vier Dimensionen beigelegt hätte, würde sich in einer Welt gleich der unseren im Nachteil beim Kampf ums Dasein befinden« (Poincaré 1914, S. 86). Daß innerhalb des Neukantianismus ein Exponent des »empiristischen Flügels« wie Helmholtz die Bedeutung der *Anpassung* unseres physiologischen Wahrnehmungsapparates für die Geometriediskussion unterstreicht (Helmholtz 1896, Bd. II, bes. S. 6–11), mag kaum verwundern. Daß aber auch ein durchaus »orthodoxer« Vertreter dieser Richtung wie Otto Liebmann eine (nichtkantische) Subjektivierung des euklidischen Raumes vornimmt, indem er zwischen intuitiver und begrifflicher Notwendigkeit differenziert und der intuitiven Notwendigkeit – die ihm allein einen spezifischen

Vorrang des euklidischen Raumes für den *Homo sapiens* begründet – an biologische Entwicklung und Ausstattung anknüpft (vgl. Liebmann 1900, insbes. S. 72–86 und S. 172–186), mag hier, stellvertretend für eine ganze Rezeptionslinie, die Wirkungsmacht der Entwicklungstheorie selbst im Hinblick auf eine »aprioristische« Schulphilosophie der Mathematik andeuten.

Insgesamt hoffe ich gezeigt zu haben, daß sich Darwins Evolutionstheorie zunächst gegen den harten Widerstand der viktorianischen Physik, die von der Mathematik flankiert wurde oder sogar in »Personalunionen« die Kontroverse begleitete, durchzusetzen hatte. Andererseits belegen Beispiele wie Mach und Boltzmann für die Physik, Clifford und Poincaré für die Mathematik, wie sehr die Evolutionstheorie *at the long run* das Selbstverständnis der sogenannten »exakten Wissenschaften« insgesamt beeinflusste und zu einer *Dynamisierung* ihrer Wissenschaftsauffassung beitrug. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um diesen Prozeß im Detail verstehen und seinen Anteil an der Ausprägung eines *modernen* Wissenschaftsbegriffs beurteilen zu können, aber Ernst Machs Feststellung (³1919, S. 360) trifft zweifellos auch auf diese Wissenschaften zu: »Darwin's Gedanke ist [...] zu bedeutend und weittragend, um nicht auf alle Wissensgebiete Einfluss zu nehmen.«

Literatur

- Bayertz, Kurt (1987): »Wissenschaftsentwicklung als Evolution? Evolutionäre Konzeptionen wissenschaftlichen Wandels bei Ernst Mach, Karl Popper und Stephen Toulmin«, in: *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie* 18, S. 61–91.
- Bayertz, Kurt/Gerhard, Myriam/Jaeschke, Walter (Hg.) (2007): *Weltanschauung, Philosophie und Naturwissenschaft im 19. Jahrhundert*, 3 Bde., Hamburg: F. Meiner.
- Bellone, Enrico (1980): *A World on Paper. Studies on the Second Scientific Revolution*, Cambridge (Mass.): The MIT Press.
- Blackmore, John/Hentschel, Klaus (Hg.) (1985): *Ernst Mach als Außenseiter. Machs Briefwechsel über Philosophie und Relativitätstheorie mit Persönlichkeiten seiner Zeit*, Wien: W. Braumüller.

- Boltzmann, Ludwig (1905): *Populäre Schriften*, Leipzig: J. A. Barth.
- (1990): *Principien der Naturphilosophie*, Berlin/Heidelberg/New York: Springer.
- Bowler, Peter J. (1990): *Charles Darwin. The Man and his Influence*, Oxford: Basil Blackwell.
- Brush, Stephen G. (1979): »Nineteenth-Century Debates about the Inside of the Earth: Solid, Liquid or Gas?«, in: *Annals of Science* 36, S. 225-254.
- (1987): »The Nebular Hypothesis and the Evolutionary World View«, in: *History of Science* 25, S. 245-277.
- Burchfield, Joe D. (1990): *Lord Kelvin and the Age of the Earth*, Chicago/London: The University of Chicago Press (1. Aufl. 1975).
- Capek, Milic (1968): »Ernst Mach's Biological Theory of Knowledge«, in: *Synthese* 18, S. 171-191.
- Charpa, Ulrich (1987): »John F.W. Herschels Methodologie der Erfahrungswissenschaft«, in: *Philosophia Naturalis* 24, S. 121-148.
- Clifford, William K. (1873): »The Philosophy of the Pure Sciences«, in: ders.: *Lectures and Essays*, hg. von Leslie Stephen und Frederick Pollock, Bd. 1, London: Macmillan & Co., S. 301-409.
- Cornell, John F. (1986): »Newton of the Grassblade? Darwin and the Problem of Organic Teleology«, in: *Isis* 77, S. 405-421.
- Darwin, Charles (1868): *The Variation of Animals and Plants under Domestication*, 2 Bde., London: John Murray.
- (1958): *The Autobiography of Charles Darwin, 1809-1882*, hg. von Nora Barlow, London: Collins.
- (1964): *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life* (1859), Faksimile der Erstausgabe mit einer Einleitung von Ernst Mayr, Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- (1992): *Über die Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl, oder die Erhaltung der begünstigten Rassen im Kampf um's Dasein*, 9., unveränderte Auflage. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Nachdruck: Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Darwin, Francis (1887) (Hg.): *The Life and Letters of Charles Darwin*, 3 Bde., London: John Murray.
- (1903) (Hg.): *More Letters of Charles Darwin*, 2 Bde., London: John Murray.
- Dierse, Ulrich (1986): »Der Newton der Geschichte«, in: *Archiv für Begriffsgeschichte* 30, S. 158-182.
- Du Bois-Reymond, Emil (1912): *Reden in zwei Bänden*, Bd. 2, 2. vervollst. Aufl., Leipzig: Von Veit & Comp. (1. Aufl. 1887).
- (1979): »Gedächtnisrede auf Hermann von Helmholtz« (1896), in: Heinrich Scheel (Hg.): *Physiker über Physiker*, Bd. 2, Berlin: Akademie-Verlag, S. 68-99.
- Duhem, Pierre (1978): *Ziel und Struktur der physikalischen Theorien*, Hamburg: Meiner (Nachdruck der Auflage Leipzig 1908).
- Eiseley, Loren (1958): *Darwin's Century*, New York: Doubleday.
- Ellegård, Alvar (1958): *Darwin and the General Reader*, Göteborg: Almqvist & Wiksell.
- Engels, Eve-Marie (1989): *Erkenntnis als Anpassung? Eine Studie zur evolutionären Erkenntnistheorie*, Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- (2007): *Charles Darwin*, München: C. H. Beck.
- Freud, Sigmund (1952-1968): *Gesammelte Werke*, 18 Bde., hg. von Anna Freud u. a., Frankfurt am Main: Imago/S. Fischer.
- Gigerenzer, Gerd (1989): *The Empire of Chance. How Probability changed Science and Everyday Life*, Cambridge: University Press.
- Gooding, David (1982): »Empiricism in Practice: Teleology, Economy, and Observation in Faraday's Physics«, in: *Isis* 73, S. 46-67.
- Gregory, Frederick (1977): *Scientific Materialism in Nineteenth Century Germany*, Dordrecht: Reidel.
- Halsted, George B. (1896): »Darwinism and Non-Euclidean Geometry«, in: *Izvestija Fiziko-matematicheskogo obschestva* 6, 2. Folge, S. 22-25.
- Hall, Marie Boas (1984): *All Scientist Now: The Royal Society in the Nineteenth Century*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Haughton, Samuel (1973): »Biogenesis« (1860), in: David Hull (Hg.): *Darwin and His Critics*, Cambridge, Mass.: Harvard University Press, S. 217-227.
- Heidelberger, Michael (1993): *Die innere Seite der Natur. Gustav Theodor Fechners wissenschaftlich-philosophische Weltanschauung*, Frankfurt am Main: Vittorio Klostermann.
- Heimann, Peter M. (1972): »The Unseen Universe: Physics and Philosophy of Nature in Victorian England«, in: *British Journal for the History of Science* 6, S. 73-79.
- Helmholtz, Hermann von (1882): *Wissenschaftliche Abhandlungen*, Bd. 1, Leipzig: J. A. Barth.
- (1895): *Wissenschaftliche Abhandlungen*, Bd. 3, Leipzig: J. A. Barth
- (1896): *Vorträge und Reden*, 2 Bde., Braunschweig: Vieweg (1. Aufl. 1865).
- (1922): *Einleitung zu den Vorlesungen über theoretische Physik*, hg. von Arthur König und Carl Runge, Leipzig: J. A. Barth (1. Aufl. 1903).
- Herschel, John F. (1830): *A Preliminary Discourse on the Study of Natural Philosophy*, London: Longman, Rees, Orme, Brown & Green.
- (1861): *Physical Geography*, London: Longmans.
- Hopkins, William (1973): »Physical Theories of the Phenomena of Life« (1860), in: David Hull (Hg.): *Darwin and His Critics*, Cambridge, Mass.: Harvard University Press, S. 229-272.
- Hull, David L. (1973): *Darwin and His Critics. The Reception of Darwin's*

- Theory of Evolution by the Scientific Community*, Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- (1974): »Charles Darwin and Nineteenth-Century Philosophies of Science«, in: Ronald N. Giere und Richard S. Westfall (Hg.): *Foundations of Scientific Method: The Nineteenth Century*, Bloomington/London: Indiana University Press, S. 114-132.
 - Huxley, Thomas H. (1981): »Der Abstand zwischen Mensch und Tierwelt« (1863) in: Günter Altner (Hg.): *Der Darwinismus. Die Geschichte einer Theorie*, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, S. 361-373.
 - Israel, Giorgio (1994): »Mathematical Biology«, in: *Companion Encyclopedia of the History and Philosophy of the Mathematical Sciences*, hg. von I. Grattan-Guinness, Bd. 2, London: Routledge, S. 1275-1280.
 - James, Frank A. (1982): »Thermodynamics and Sources of Solar Heat, 1846-1862«, in: *British Journal for the History of Science* 14, S. 155-181.
 - Jenkin, Fleeming (1973): »The Origin of Species« (1867), in: David Hull (Hg.): *Darwin and His Critics*, Cambridge, Mass.: Harvard University Press, S. 302-350.
 - Kant, Immanuel (1974): *Kritik der Urteilskraft*, Frankfurt am Main: Suhrkamp.
 - Kitcher, Philip (1984): *The Nature of Mathematical Knowledge*, New York/Oxford: Oxford University Press.
 - König, Gert (1968): »Der Wissenschaftsbegriff bei Helmholtz und Mach«, in: Alwin Diemer (Hg.): *Beiträge zur Entwicklung der Wissenschaftstheorie im 19. Jahrhundert*, Meisenheim am Glan: Anton Hain, S. 90-114.
 - Königsberger, Leo (1902/1903): *Hermann von Helmholtz*, 3 Bde., Braunschweig: Vieweg.
 - Lawrence, Philip (1977): »Heaven and Earth – The Relation of the Nebular Hypothesis to Geology«, in: Wolfgang Yourgrau und Allen D. Breck (Hg.): *Cosmology, History and Theology*, New York/London: Plenum Press, S. 159-177.
 - Lenoir, Timothy (1989): *The Strategy of Life. Teleology and Mechanics in Nineteenth Century German Biology*, Chicago/London: The University of Chicago Press (1. Aufl. 1982).
 - Liebmann, Otto (1900): *Zur Analysis des Wirklichen. Eine Erörterung der Grundprobleme der Philosophie*, Straßburg: Karl J. Trübner.
 - Lightman, Bernard (1987): *The Origins of Agnosticism. Victorian Unbelief and the Limits of Knowledge*, Baltimore/London: The Johns Hopkins University Press.
 - Lyell, Charles (1830-1833): *Principles of Geology, being an Attempt to Explain the Former Changes of the Earth's Surface, by reference to Causes now in Operation*, 3 Bde., London: John Murray.
 - Mach, Ernst (1923): *Populärwissenschaftliche Vorlesungen*, Wien/Köln/Graz: Böhlau (1. Aufl. 1896).
 - (1863): *Compendium der Physik für Mediciner*, Wien: W. Braunmüller.
 - (1910): »Die Leitgedanken meiner naturwissenschaftlichen Erkenntnislehre und ihre Aufnahme durch die Zeitgenossen«, in: *Physikalische Zeitschrift* 11, S. 599-606.
 - (1919): *Die Principien der Wärmelehre. Historisch-kritisch entwickelt*, Leipzig: J. A. Barth (1. Aufl. 1896).
 - (1980): *Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung*, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft (1. Aufl. 1905).
 - (1982): *Die Mechanik. Historisch-kritisch dargestellt*, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft (1. Aufl. 1883).
 - (1991): *Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis des Physischen zum Psychischen*, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft (1. Aufl. 1886).
 - Maxwell, James C. (1890): *The Scientific Papers*, hg. von William D. Niven, 2 Bde., Cambridge: Cambridge University Press.
 - McLaughlin, Peter/Rheinberger, Hans-Jörg (1982): »Darwin und das Experiment«, in: Kurt Bayertz, Bernhard Heidtmann und Hans-Jörg Rheinberger (Red.): *Darwin und die Evolutionstheorie*, Bd. 5, *Dialektik*, Köln: Pahl-Rugenstein, S. 27-43.
 - Mill, John Stuart (1843): *A System of Logic, Ratiocinative and Inductive: Being a Connected View of the Principles of Evidence and the Methods of Scientific Investigation*, London: John W. Parker.
 - Numbers, Ronald L. (1977): *Creation by Natural Law. Laplace's Nebular Hypothesis in American Thought*, Seattle/London: University of Washington Press.
 - Pearson, Karl (1937): *The Grammar of Science*, London: J. M. Dent & Sons Ltd. [Reprint der 1. Aufl. 1892 mit Texten der 2. Aufl. 1900].
 - Peirce, Charles S. (1986): »The Fixation of Belief« (1877), in: Christian J. W. Kloesel (Hg.): *Writings of Charles Peirce*, Bd. 3, Bloomington: Indiana University Press, S. 242-257.
 - Poincaré, Henri (1914): *Letzte Gedanken*, Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft.
 - Porter, Theodore M. (1986): *The Rise of Statistical Thinking 1820-1900*, Princeton: University Press.
 - Pulte, Helmut (1989): *Das Prinzip der kleinsten Wirkung und die Kraftkonzeptionen der rationalen Mechanik*, Wiesbaden: F. Steiner.
 - (1995): »Darwin in der Physik und bei den Physikern des 19. Jahrhunderts. Eine vergleichende wissenschaftstheoretische und -historische Untersuchung«, in: Eve-Marie Engels (Hg.): *Die Rezeption von Evolutionstheorien im 19. Jahrhundert*, Frankfurt am Main: Suhrkamp, S. 105-146.

- (2005): *Axiomatik und Empirie. Eine wissenschaftstheoriegeschichtliche Untersuchung zur mathematischen Naturphilosophie von Newton bis Neumann*, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Rey, Abel (1908): *Die Theorie der Physik bei den modernen Physikern*, Leipzig: W. Klinkhardt.
- Richards, Joan L. (1988): *Mathematical Visions. The Pursuit of Geometry in Victorian England*, Boston/San Diego/New York: Academic Press.
- Ruse, Michael (1975): »Darwin's Debt to Philosophy: an Examination of the Influence of the Philosophical Ideas of John F.W. Herschel and William Whewell on the Development of Charles Darwin's Theory of Evolution«, in: *Studies in History and Philosophy of Science*, Bd. 6, S. 159-181.
- (1979): *The Darwinian Revolution*, Chicago/London: The University of Chicago Press.
- Schweber, Silvan S. (1979): »The Young Darwin«, in: *Journal for the History of Biology*. Bd. 12, S. 175-192.
- (1989): »John Herschel and Charles Darwin: A Study in Parallel Lives«, in: *Journal for the History of Biology* 22, S. 1-71.
- Sharlin, Harold I. (1972): »On Being Scientific: A Critique of Evolutionary Geology and Biology in the Nineteenth Century«, in: *Annals of Science* 29, S. 271-285.
- Simmel, Georg (1895): »Ueber eine Beziehung der Selectionslehre zur Erkenntnistheorie«, in: *Archiv für systematische Philosophie* I, S. 34-45.
- Spencer, Herbert (1966): *The Works of Herbert Spencer*, Bd. 18: *Various Fragments*, Osnabrück: O. Zeller. (1. Aufl. 1907).
- Stewart, Balfour/Tait, Peter G. (21875): *The Unseen Universe, or Physical Speculations on a Future State*, London: Macmillan (1. Aufl. 1875).
- Stokes, George G. (1883): »On the Absence of Real Opposition between Science and Revelation«, in: *Journal of the Transactions of the Victoria Institute* 17, S. 200.
- (1893): *Natural Theology. The Gifford Lectures*, Bd. 2, London: Adam and Charles Black.
- Tait, Peter G. (1869): »Geological Time« (anonym), in: *North British Review* 50, S. 215-233.
- (1876): *Lectures on Some Recent Advances in Physical Science*, London: Macmillan & Co.
- Thompson, Silvanus P. (1910): *The Life of William Thomson, Baron Kelvin of Largs*, 2 Bde., London: Macmillan & Co.
- Thomson, William (1891a): *Popular Lectures and Addresses*, Bd. I, London: Macmillan & Co.
- (1894): *Popular Lectures and Addresses*, Bd. II, London: Macmillan & Co.
- (1891b): *Popular Lectures and Addresses*, Bd. III, London: Macmillan & Co.
- (1882-1911): *Mathematical and Physical Papers*, 6 Bde., Cambridge: Cambridge University Press.
- Thomson, William/Tait, Peter G. (1867): *Treatise on Natural Philosophy*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Todhunter, Isaac (1876): *William Whewell, D. D. An Account of his Writings with Selections from his Literary and Scientific Correspondance*, 2 Bde., London: Macmillan & Co.
- Toulmin, Stephen G./Goodfield, June (1970): *Die Entdeckung der Zeit*, München: W. Goldmann (*The Discovery of Time*, London 1965).
- Tyndall, John (1874): *Fragmente aus den Wissenschaften*, mit Vorwort und Zusätzen von Hermann von Helmholtz, Braunschweig: Vieweg (*Fragments of Science for Unscientific People*, London 1871).
- Whewell, William (1833): *Astronomy and General Physics. Considered with Reference to Natural Theology*, London: W. Pickering.
- (1837): *History of the Inductive Sciences*, 3 Bde., London: John W. Parker/Cambridge: J. and J. J. Deighton.
- (1840): *The Philosophy of the Inductive Sciences*, 2 Bde., London: John W. Parker/Cambridge: J. and J. J. Deighton.
- (21967): *The Philosophy of the Inductive Sciences*, 2 Bde., London: Frank Cass & Co. (1. Aufl. 1840).
- Wilson, David B. (1974): »Kelvin's Scientific Realism. The Theological Context«, in: *Philosophical Journal* 11, S. 41-60.
- (1987): *Kelvin and Stokes. A Comparative Study in Victorian Physics*, Bristol: Adam Hilger.
- (1989): »A Physicists Alternative to Materialism. The Religious Thought of George Gabriel Stokes«, in: Patrick Brantlinger (Hg.): *Energy and Entropy. Science and Culture in Victorian Britain*, Bloomington/Indianapolis: Indiana University Press.
- Wilson, J. Cook (1889): *On an Evolutionist Theory of Axioms*, Oxford: Blackwell.
- Young, Robert M. (1985): *Darwin's Metaphor: Nature's Place in Victorian Culture*, Cambridge/London/New York: Cambridge University Press.
- Zöllner, Johann K. F. (1872): *Über die Natur der Cometen. Beiträge zur Geschichte und Theorie der Erkenntnis*, Leipzig: W. Engelmann.