

Daniel Gethmann

Innere Scheinbilder. Von der Ästhetik der Elektrizität zur Bild-Konzeption der Erkenntnis

2004

<https://doi.org/10.25969/mediarep/1530>

Veröffentlichungsversion / published version

Sammelbandbeitrag / collection article

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Gethmann, Daniel: Innere Scheinbilder. Von der Ästhetik der Elektrizität zur Bild-Konzeption der Erkenntnis. In: Rolf F. Nohr (Hg.): *Evidenz – »... das sieht man doch!*. Hamburg: LIT 2004 (Medienwelten. Braunschweiger Schriften zur Medienkultur), S. 125–161. DOI: <https://doi.org/10.25969/mediarep/1530>.

Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer Creative Commons - Namensnennung - Nicht kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Lizenz zur Verfügung gestellt. Nähere Auskünfte zu dieser Lizenz finden Sie hier:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0>

Terms of use:

This document is made available under a creative commons - Attribution - Non Commercial - Share Alike 3.0 License. For more information see:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0>

INNERE SCHEINBILDER. VON DER ÄSTHETIK DER ELEKTRIZITÄT ZUR BILD-KONZEPTION DER ERKENNTNIS

Die Bildung neuer Konzepte, um die Wirklichkeit zu beschreiben, hängt in der Neuzeit stark von ihrer Erfassung in visuellen Technologien und damit von Bildern ab. Diese prägen in zunehmendem Maße Erscheinungsformen dessen, was wir als »wissenschaftlichen Fortschritt« bezeichnen, und tragen so zum Entstehen einer visuellen Kultur in den Naturwissenschaften bei, deren Bedeutung weit über ein bloßes ästhetisches Miteinander von Kunst und Naturwissenschaft hinausgeht.◀¹ Im Gegenteil erlangt ein künstlerisches Bild vorübergehend den Status eines die naturwissenschaftliche Epistemologie leitenden theoretischen Gegenstands, da es vermittelt das Konzept der Ähnlichkeit eine notwendige aber unmögliche Vorstellung der Übertragung des Elektromagnetismus vermittelt, bis schließlich zu Beginn des 20. Jahrhunderts die Quantentheorie das Ende des Naturbildes und mit ihm das des mechanistischen Weltbildes besiegelt. Dieser fundamentale Wandel im physikalischen Weltbild hängt mit einem weiteren, bis dahin rein ästhetischen Problem zusammen: mit der Stellung des Betrachters, »da wir stets nur über die Vorgänge sprechen können, die sich abspielen, wenn durch die Wechselwirkung des Elementarteilchens mit irgendwelchen anderen physikalischen Systemen, z. B. den Messapparaten, das Verfahren des Teilchens erschlossen werden soll« (Heisenberg 1955, 12). Denn »man kann gar nicht mehr vom Verhalten des Teilchens losgelöst vom Beobachtungsvorgang sprechen. Dies hat schließlich zur Folge, dass die Naturgesetze, die wir in der Quantentheorie mathematisch formulieren, nicht mehr von den Elementarteilchen an sich handeln, sondern von unserer Kenntnis der Elementarteilchen« (ebd.). Diese Einbeziehung des Betrachters in die Formulierung der Naturgesetze hat zur Folge, dass sich ebenfalls der Gegenstand des Bildes dramatisch verändert, das wir uns von der Natur machen. »Wenn von einem Naturbild der exakten Naturwissenschaft in unserer Zeit gesprochen werden kann, so handelt es sich also eigentlich nicht mehr um ein Bild der Natur, sondern um ein Bild unserer Beziehungen zur Natur.« (ebd., 21). Die zerstörerischen Auswirkungen dieses ästhetischen Grundgesetz-

zes der Bildproduktion auf die bislang praktizierte Form naturwissenschaftlicher Erkenntnisbildung verschweigt Heisenberg keineswegs: »Das naturwissenschaftliche Weltbild hört damit auf, ein eigentlich naturwissenschaftliches zu sein« (ebd., 21). Andererseits bedeutet dieses Ende des naturwissenschaftlichen Weltbildes jedoch auch, dass Verfahren der Abbildung von Beziehungen zu unserer äußerlichen Welt, früher der Natur, aus der Ästhetik und bildenden Kunst nobilitiert werden, die ja immer schon ihre subjektiven Beziehungen zur Natur abgebildet hat. Ein solcher grundlegender Wandel in der wissenschaftlichen Denkweise, der häufig als Übergang von einem mechanistischen zu einem dynamischen Weltbild beschrieben wurde, bezieht sich insofern im Kern auf Änderungen der naturwissenschaftlichen Bilderstrategie, deren Auswirkungen wiederum unsere Ansehung und unser Verständnis der Welt und ihrer Gesetze neu konzipieren.

Dieses Ende der Physik als Naturlehre im klassischen Sinne, als Erklärung der Phänomene, die sich dem unmittelbaren sinnlichen Eindruck darbieten, hat allerdings noch eine zweite Ursache. Um 1800 ist die menschliche Wahrnehmung in eine tiefe Legitimationskrise geraten, aus der sie sich nicht wieder befreien konnte, das Wahrgenommene und das, was ist, drifteten immer stärker auseinander. Die Welt, die wir mit unseren Sinnesorganen erfassen, war schon damals nicht länger die der naturwissenschaftlichen Forschung. Diese beschäftigt sich vielmehr mit Vorgängen, die nicht mehr primär auf die menschliche Wahrnehmung sondern vielmehr – und diese Entwicklung zeichnet der vorliegende Text nach – auf die Gedanken, Theorien, Modelle und Vorstellungen des Menschen sowie zunehmend auf technologische Messdaten zurückgehen.

Die Geschichte des Bildes unserer Beziehungen zur Natur wird hier im Folgenden wegen ihrer wesentlichen Erweiterungen des Bedeutungsrahmens eines Bildes um seine erkenntnistheoretische Dimension als ein genuin mediengeschichtliches Thema mit einer Schnittstelle zur Kunst aufgefasst, das ab dem Moment eine eigene Dynamik entfaltet, in dem eine Möglichkeit zur Selbstabbildung der Naturkräfte entdeckt wird. Daher reicht seine Geschichte von der Euphorie einer genaueren Erkenntnis der Natur mittels der ersten von der Elektrizität gewissermaßen selbst aufgezeichneten Bilder bis zu dem tiefgreifenden epistemologischen Wandel, mit dem sich ein Erkenntnisschritt nur mehr in der Logik unserer »inneren Scheinbilder« vollzieht. Um diesen Wandel zu analysieren, muss vom Experiment ausgegangen werden.

Lichtenberg

Georg Christoph Lichtenberg benötigte im Jahre 1777 als Professor der Physik und Mathematik in Göttingen einen Apparat zur Demonstration der Elektrizitätswirkung. Er entschloss sich, »einen Elektrophor von beträchtlicher Größe anzufertigen« (Lichtenberg 1778a, 18), um die Kosten für eine große Elektrisiermaschine zu sparen und dennoch seine Experimente durchführen zu können. Dieser »elettroforo perpetuo«, ein dem Namen nach beständiger Elektrizitätsträger, war eine scheinbar unerschöpfliche Ladungsmaschine für recht hohe Spannungen, die Alessandro Volta zwischen 1773 und dem Frühjahr 1775 erfunden hatte (vgl. Pancaldi 2003, 73-109).⁴² Damit besaßen die Naturphilosophen für ihre physikalischen Vorführungen neben der Leidener Flasche einen weiteren, dringend erwarteten Kondensator, um die durch Reibung erzeugte Elektrizität zu speichern. Heutzutage gilt der Elektrophor als die erste Influenzmaschine.

Lichtenberg beschaffte sich 51 Pfund Harz,⁴³ um seinen runden Elektrophor von knapp zwei Metern Durchmesser herzustellen, für dessen Anfertigung Volta noch zwei Teile Harz (Schellack und Kolophonium), drei Teile Terpentin und einen Teil Wachs mehrere Stunden erhitzte, in einen Zinnteller goss und dort erkalten ließ (vgl. Volta 1775, 103-163).

Auf eine Holzplatte gestellt, konnte das Gerät mittels Reibung oder einem Konduktor elektrisch geladen werden. Wurde noch ein Zinndeckel auf den »Harzkuchen« im Zinnteller aufgesetzt, so ließen sich bei dessen Abheben eindrucksvolle Funkenentladungen erzeugen. Als es Lichtenberg gelang, mit seiner Hand Funken von bis zu 40 cm Länge aus seinem Instrument zu ziehen, »so erschütterten sie heftig den ganzen Körper;

gingen die Funken vom Deckel zum Kuchen, was des öfteren unvermutet geschah, so durchbohrten sie manchmal den Kuchen mit auffälligem Knall« (Lichtenberg 1778a, 19). Während der Herstellung dieses Elektrophors hatte sich nun Harzstaub überall in seinem Laboratorium verteilt, der »beim Abhobeln und Glätten des Kuchens oder der Basis aufgestiegen war« (Lichtenberg 1778b, 27). Lichtenberg begann seine Versuche mit dem »elettroforo perpetuo« und dabei legte sich, nachdem er den Deckel,

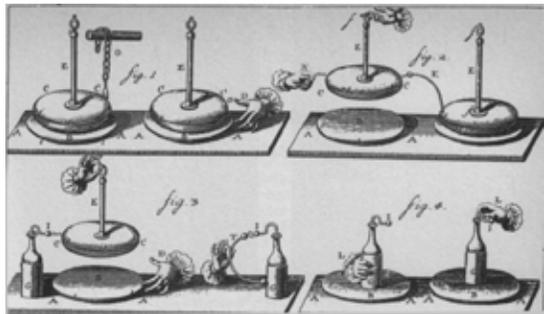


Abb. 1: Elektrophor als »ewiger Träger der Elektrizität«

der von der Decke herabhing, einmal etwas längere Zeit abgehoben hatte, dieser Harzstaub auch auf die elektrisch aufgeladene Harzplatte. Verstaubte Räume ermöglichen bezaubernde Entdeckungen, denn jener Staub bildete auf der Platte erkennbare Muster. Anfang April des Jahres 1777 entdeckte Lichtenberg so die Staubfiguren und ein einfaches Verfahren, um diese unterschiedlichen kreis- oder sternförmigen Formationen auch zu konservieren. Elektrizität wurde dabei zum ersten Mal sichtbar gemacht und die durch dieses Verfahren entstehenden Bilder fixiert, die nach ihrem Entdecker den Namen Lichtenberg-Figuren erhielten. Diese Erscheinungen führten nach der Einschätzung Lichtenbergs vor, »dass auf elektrisch geladenen Körpern, besonders Nichtleitern, Veränderungen vorgehen, über die die Physiker bisher nur geäußert hatten, dass sie vorhanden sein sollen« (Lichtenberg 1778a, 21)◀4 – ihnen kam also der Status eines wissenschaftlichen Beweises zu.

Damit trat ein tiefgreifender Wandel in der Bedeutung eines Bildes ein, weil es zum ersten Mal möglich wurde, Elektrizität sichtbar zu machen, also eine Projektion der leuchtenden Entladung auf der Harzoberfläche lange vor der Erfindung der Fotografie auch zu fixieren.◀5 Die Lichtenberg-Figuren als visuelle Repräsentationen bislang nur theoretisch angenommener Oberflächenerscheinungen der Elektrizität, die den Keim einer Vorstellung von elektrischen Feldern in sich trugen, erweiterten bei ihrer ersten öffentlichen Demonstration im Jahre 1778 die Bedeutung von bildlichen Darstellungen überhaupt, denn sie vereinten eine neue Form der wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung, um »die Natur der elektrischen Materie« (ebd.) zu untersuchen, mit ihrem Verifikationsmodell.

»Denn es macht keine geringe Schwierigkeiten bei diesen Untersuchungen, dass die elektrische Materie sich entweder, wie die magnetische, unserm Blick gänzlich entzieht, oder da, wo sie sichtbar ist, mit einer solchen Geschwindigkeit und, was mir nicht unwahrscheinlich ist, in Verbindung mit einer Menge unsichtbarer Stoffe, fortgeht, dass man sehr oft außer der Stelle, wo der Funke überschlägt, und der Gestalt desselben – was doch nur ein unbedeutender Teil der ganzen Erscheinung ist – nichts deutlich bemerken kann« (Lichtenberg 1778b, 26).

Damit weist Lichtenberg auf die Erfordernis einer sinnlich wahrnehmbaren Ebene innerhalb der Naturlehre hin, die insbesondere während der Erforschung der »elektrischen Materie« das Forschungsinteresse und die Erkenntnisweisen strukturierte und die aus diesem Grunde geradezu eine Notwendigkeit zur visuellen Repräsentation der Naturerscheinungen schuf. Sofern sich diese Selbstabbildungen bei der Untersuchung der elektrischen und magnetischen Phänomene nicht erzeugen ließen, auch das deutet Lichtenberg hell-sichtig an, geriet das gesamte Forschungsprogramm ins Wanken. Denn er er-

kennt, dass die einzig sichtbaren Phänomene, die Funken, doch nur einen unbedeutenden Teil der ganzen Erscheinung bildeten. Lichtenberg stellte auf seinem Elektrophor darüber hinaus auch ästhetische Phänomene im Bereich der Selbstabbildung von Natur fest, da sich der feine Harzstaub

»an bestimmten Stellen zu Sternchen anordnete. Sie waren zwar anfangs matt und schwer zu sehen; als ich aber absichtlich mehr Staub aufstreuete, wurden sie sehr deutlich und schön und glichen oft einer erhabenen Arbeit. Es zeigten sich bisweilen fast unzählige Sterne, Milchstraßen und größere Sonnen. [...] Herrliche kleine

Ästchen entstanden, denen ähnlich, die der Frost an den Scheiben hervorbringt; kleine Wolken in den mannigfaltigsten Formen und Graden der Schattierung und endlich mancherlei Figuren von besonderer Gestalt waren zu sehen« (Lichtenberg 1778a, 21).

Da bekanntlich zur vorhandenen Aufnahmetechnik der Camera Obscura und des ebenfalls bereits existierenden Projektionsapparats der Laterna Magica kein optisches Speicheräquivalent existierte, musste Lichtenberg schwarzes Papier mit Klebstoff bestreichen, um ein Positiv der elektrischen Figur hervorzubringen. Dabei zeigten sich zwei unterschiedliche Gruppen von Figuren und damit der »positiven« und »negativen« Elektrizität, die Lichtenberg zum ersten Mal mit den Zeichen + und – versah und als Hinweis auf zwei unterschiedliche Fluida interpretierte.

»Aber ein höchst angenehmes Schauspiel bot sich mir dar, als ich sah, dass sich diese Figuren kaum zerstören ließen. Hatte ich den Staub vorsichtig mit einer Feder oder einer Hasenpfote abgewischt, so konnte ich dennoch nicht verhindern, dass die kurz vorher zerstörten Figuren gewissermaßen von neuem und noch herrlicher wieder erstanden. Ich bestrich daher ein Stück schwarzes Papier mit einer klebrigen Masse, legte es auf die Figuren und drückte leise darauf« (Lichtenberg 1778a, 21f.).

Unter ästhetischen Gesichtspunkten betrachtet, handelt es sich insofern bei den Lichtenberg-Figuren nicht nur um ein Kunstwerk im Bereich des Natur-schönen, das als erstes seiner Art nicht mehr nur mittels Schrift die »sichtba-

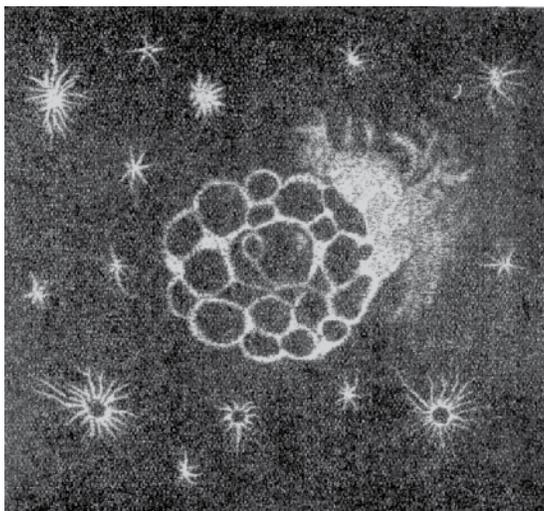


Abb.2: Lichtenberg-Figur

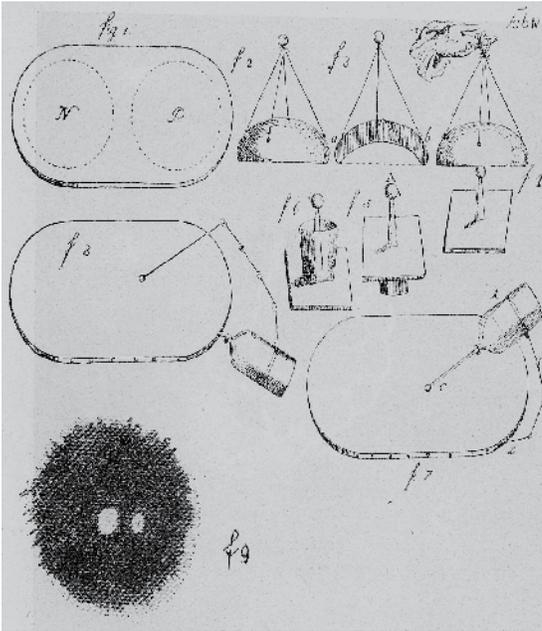


Abb. 3: Herstellung der Lichtenberg-Figuren

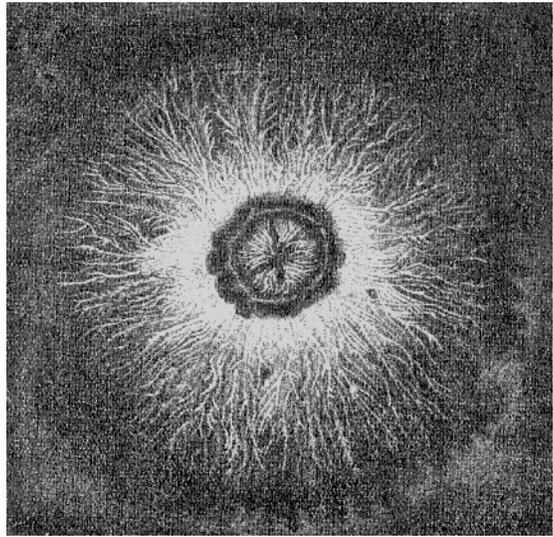
ren Lettern der Natur« lesbar machte, also eine Methode angab, um Natur direkt in künstlerische Darstellung einzuschreiben, sondern zudem noch um das erste Kunstwerk, das sich seiner Zerstörung solange erfolgreich widersetzte, bis es Kunst im Sinne einer Materialisierung der Erscheinung geworden war. Dessen Verkörperung in schwarzem Papier, Leim und Harzstaub machte eine Vorstellung von Elektrizität und damit von den Kräften der Natur überhaupt erst möglich.

Aus genau diesem Grund sah Lichtenberg eine weitere wissenschaftliche Verwendungsmöglichkeit in der demonstrativen Kraft seiner Figuren für eine Analyse der Elektrizität, denn es gab bis zu seiner Entdeckung »kein Instrument und kein Verfahren,

das unter Physikern üblich ist, um die Art der auf Körpern befindliche Elektrizität unmittelbar und mit Sicherheit anzugeben. Dass aber diese Figuren eine solche Methode an die Hand geben, glaube ich, in Betracht ziehen zu dürfen« (Lichtenberg 1778a, 38). Eine Erklärung der Phänomene fiel Lichtenberg ebenso schwer wie nachfolgenden Physikergenerationen; eine Begründung für die komplizierten Vorgänge, die zur Bildung der Lichtenberg-Figuren führen, benötigte den Elektronenbegriff des 20. Jahrhunderts und ist im allgemeineren Kontext der so genannten Büschelentladungen auch gegenwärtig noch ein Forschungsthema (vgl. Bergmann 1987, 607f.). Für Lichtenberg war es daher zunächst angeraten, sich mit der phänomenologischen Erscheinungsweise der Figuren auseinander zu setzen, und dazu gab er fünf Versuche an, um Figuren unterschiedlicher Gestalt herzustellen, von denen hier vier mit Abbildungen (Abb.4-7) wiedergegeben sind.

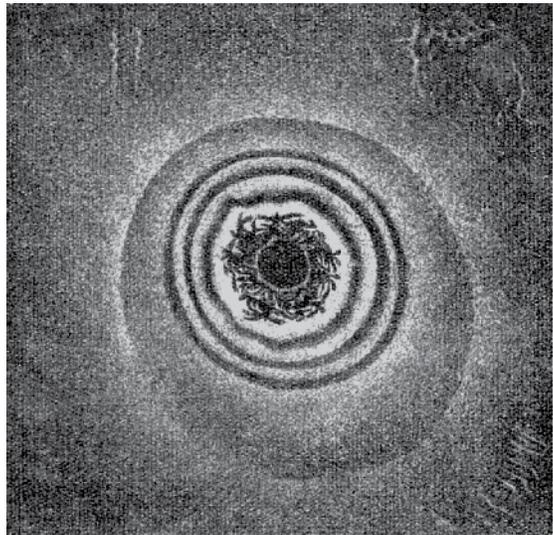
Erster Versuch

Man stelle die Röhre mit dem polierten Knopf auf die Scheibe von Gummilack oder Harz (IV. Taf.4.Fig.), und lasse einen Funken +E auf den Knopf schlagen; dann nehme man die Röhre mit der bloßen Hand weg, und bepudere die Stelle mit Hexenmehl oder zerstoßenem Harz: so wird eine solche strahlende Sonne zum Vorschein kommen, als auf der II.Taf. abgebildet ist. Nimmt man aber die Röhre mittelst eines idioelektrischen Körpers weg, so fehlt der schwarze Kreis, aus dem die Strahlen hervorschießen (Lichtenberg 1778b, 31).



Zweiter Versuch

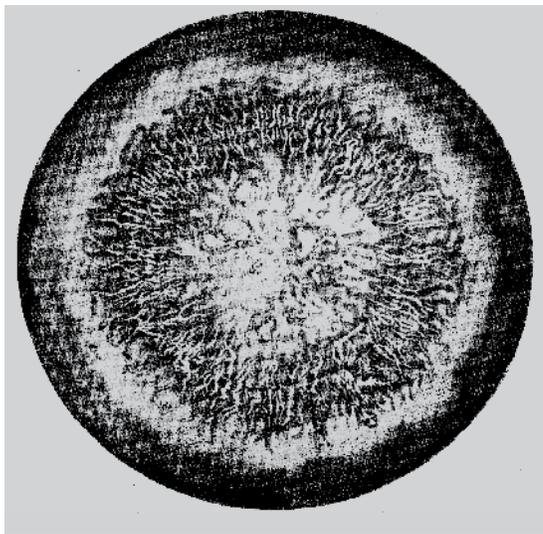
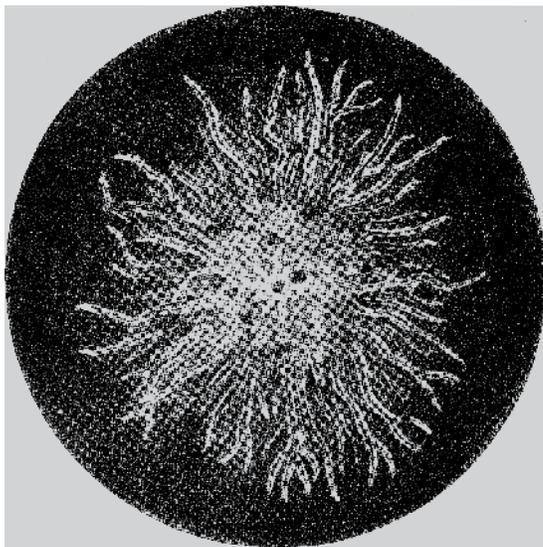
Wird die Röhre negativ elektrisiert, und dann mit bloßer Hand abgehoben: so entsteht die Figur, die auf der III. Taf. vorgestellt ist. Braucht man einen idioelektrischen Körper zum Anheben, so fehlen an der Figur die schwarzen Ästchen fast ganz. (ebd.)



Vierter Versuch

Man stelle eine Leidener Flasche auf die Harz-Scheibe, und elektrisiere ihren Kopf positiv; dann wird auch die Figur auf der Scheibe in die Klasse der positiven gehören; hingegen wird sie negativ sein, wenn man die Flasche negativ elektrisiert.

Ein aufmerksamer Beobachter wird hier mancherlei Verschiedenheiten beobachten. Ich habe die artigsten Ringe, und die schönsten elliptischen und kreisförmigen Flecken gesehen, in denen ich, wenn ich sie näher ans Auge brachte, öfters wieder die zartesten Ellipsen und konzentrischen Kreise wahrnahm. Die schönsten Figuren dieser Art, deren bewundernswerte Bildung und Regelmäßigkeit ich mit Worten nicht beschreiben



kann, erhielt ich, wenn ich ein gemeines Bierglas voll Wasser auf die Scheibe von Gummlack setzte und vermittelst der oft gedachten Röhre das Wasser positiv oder negativ elektrisierte (Fig.6.) (ebd., 32).

Fünfter Versuch

Hierher lässt sich auch eine neue Art von Steganographie rechnen, auf die ich zufälliger Weise geriet, und die einem jeden, der Sinn für den Genuß hat, den die Betrachtung der Natur gewährt, viel Vergnügen machen wird. Man lade eine Leidener Flasche, die von außen mit einer Kette versehen ist, (IV.Taf.7.Fig.), stark positiv; dann halte man mit der einen Hand die Kette an einen Nagel der Einfassung des Elektrophors D, fasse mit der andern die Flasche an ihrer äußern Belegung an, und mache mit ihrem Knopf allerhand Züge auf der Oberfläche des Elektrophors: so werden diese, wenn man sie nachher bepudert, selbst noch nach mehrern Tagen sehr nett zum Vorschein kommen, und den Kränzen aus Schachthalm (equisetum) nicht unähnlich sein. Isoliert man aber den Elektrophor, und hält den Knopf der Flasche an die Einfassung, und schreibt mit der Kette, (Fig.8.): so sehen die Züge wie Perlenschnüre aus (ebd.).

Abb. 4 - 7: Lichtenberg-Figuren

Der fünfte Versuch in Steganografie (Geheimschrift) legt die Anfänge dessen offen, was heute als elektrostatische Kopierverfahren die Basis für unsere Vervielfältigungskultur bildet, deren technischer Ursprung demnach in der Verschlüsselung von Information und eben nicht im Zeitalter ihrer technischen Reproduzierbarkeit zu finden ist. Dies gilt eher für die Abbildungen selbst, bei denen es sich um Kupferstiche der Lichtenberg-Figuren handelt.

Ein erstes Verfahren zum visuellen Nachweis einer Veränderung der Lufterlektrizität mittels Lichtenberg-Figuren gab Francis Ronalds um 1840 an, dessen ›Electrograph‹ sich – von einem Uhrwerk angetrieben und an einen Blitzableiter angeschlossen – spiralförmig über eine Harzoberfläche bewegte, auf die

dann Harzstaub aufgestreut wurde, um die Veränderungen der Lufterlektrizität sichtbar zu machen. Dieses Gerät verdeutlicht den Übergang zur Entwicklung visueller Verfahren der Selbsteinschreibung von Naturvorgängen, deren Aufzeichnungsmodus sowohl die Intensität als auch die Zeitlichkeit des Geschehens umfasste.

»[T]he spiral line will exhibit configurations varying in shape and in breadth according to the intensity and nature of the electricity which the resinous surface has received from the trailing bead. The times at which these phenomena took place will be shown by the dial-plate« (Encyclopaedia Britannica 1842, 661 f.).

Der ›Electrograph‹ besaß nämlich bereits eine Wahlmöglichkeit zwischen einer Aufzeichnung im Stunden- oder im Minutentakt, deren Ergebnisse dann am äußeren Ziffernblatt zeitlich zugeordnet werden konnten.

Nach Erfindung der Fotografie ließen sich die Lichtenberg-Figuren leichter herstellen, indem man die Entladung im Dunkeln auf einer fotografischen Platte entstehen ließ und diese dann entwickelte. Daraus entwickelte sich eine Apparatur zur Aufzeichnung und Beobachtung dieser Phänomene, der ›Klydonograph‹, der ›Klydonogramme‹ auf Rollfilm aufzeichnete. Sollte man keinen Film zur Hand haben, lässt sich heutzutage ein Elektrophor auch aus Kunststoff herstellen, auf dem man mit einer Glasplatte auch herrliche »elektrische Hauchfiguren« herstellen kann, die so zustande kommen, dass sich der Atem an den von der Entladung getroffenen Stellen als zusammenhängende Schicht niederschlägt, an den anderen Stellen hingegen feine Tröpfchen bildet und der-

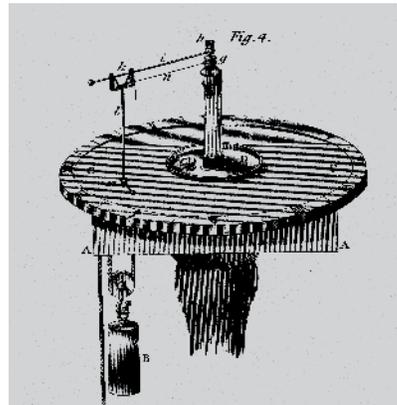


Abb. 8: Ronalds: Electrograph

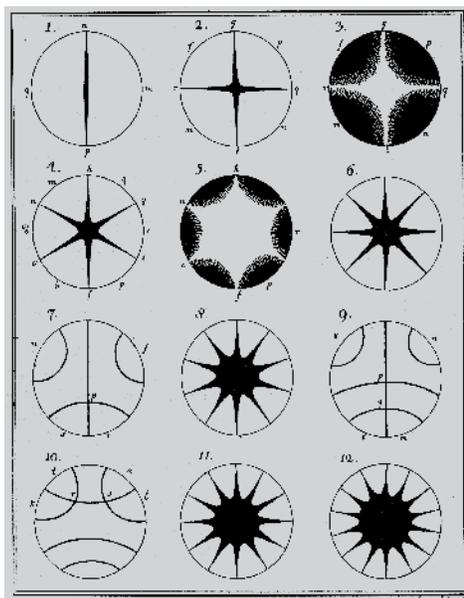


Abb. 9: Chladni: Klangfiguren

art Hauchfiguren sichtbar macht. Sogar Farbdarstellungen der Lichtenberg-Figuren wurden vom Professor der Naturgeschichte in Grenoble, Villarsy, im Jahre 1788 konzipiert, indem er nämlich ein Pulver aus gelber Schwefelblume und roter Mennige mischte, bei dem dann die Sternfiguren gelb und der Hintergrund rot gefärbt waren, da die jeweiligen Stoffe unterschiedlich elektrisch geladen wurden (vgl. Riess 1846, 5).

Die Lichtenberg-Figuren fügen dem seit Alters her überkommenen Status des Bildes als Illustration oder Repräsentation von angenommenen oder gesicherten Auffassungen in der Naturlehre eine neue Funktion hinzu: Zum ersten Mal kann mit dieser neuen Bildertechnik nach den Worten Lichtenbergs etwas gesehen werden, von dem man bisher nur angenommen hatte, dass es existierte;

damit konvergieren bei der Bilderproduktion zwei bislang getrennte Funktionen des Bildes. Denn das Bild geht einerseits als Instrument zur Aufzeichnung der Beobachtung in die Experimentalanordnung ein und liefert andererseits mit unabweisbarer Evidenz den Beweis dafür, dass elektrische Phänomene auch außerhalb der Körper stattfinden. An Bildern lässt sich künftig das angenommene Phänomen sowohl erkennen und analysieren als auch nachweisen. Die Elektrizität repräsentiert sich selbst. Das bedeutet, dass die experimentelle Datengewinnung in der Naturforschung von nun an Bilder und bildgebende Verfahren generieren wird, deren objektiver Status der schlichteren Beobachtung und anschließenden Übertragung in ein visuelles Repräsentationsschema weit überlegen scheint. So basierten auch die berühmten, 1787 erstmals veröffentlichten Klangfiguren von Ernst Florens Friedrich Chladni auf seinen Experimenten mit Lichtenberg-Figuren, die ihn auf den Gedanken brachten, »dass vielleicht die mannigfaltigen schwingenden Bewegungen einer Scheibe sich ebenfalls durch eine Verschiedenheit der Erscheinungen verrathen würden, wenn ich Sand oder etwas Ähnliches aufstreuete« (Chladni 1802, XVII). Diese Selbstaufzeichnung und Einschreibung von Natur- und speziell Lebensvor-

gängen in grafische Systeme nahm während des 19. Jahrhunderts enorm an Bedeutung zu.

Das Verstörende an den Lichtenberg-Figuren ist nun, dass sie wider die grafische Methode, die sie gewissermaßen begründen, gerade keine Zeichen sind, die nur sich selbst ähneln. Die reine Einschreibung der Elektrizität in Staub oder geeignetes Pulver ähnelt vielmehr ›fast unzähligen Sternen, Milchstraßen und größeren Sonnen‹, obwohl sie ja doch Zeichen erbringen müsste, die der Elektrizität und damit nur sich selbst ähnlich sind. Aus diesem Grund ließ sich auch in den Sternen und Kreisen der Lichtenberg-Figuren ein Hinweis auf negative und positive Ladung erkennen. Durch die Selbstrepräsentation der Elektrizität als ›Sterne und größere Sonnen‹ erhielt jedoch zudem die Grundüberzeugung der romantischen Physik zu Beginn des 19. Jahrhunderts weitere Evidenz, dass hinter jedem Phänomen polare Kräfte in einem Wechselspiel interagierten und eine beobachtbare Form schufen. Sie verstanden die Erscheinungen in der Natur als ein Ergebnis dialektischer Entwicklungen, die eine Einheit der Naturkräfte und damit eine Verwandelbarkeit von Licht, magnetischer, chemischer und elektrischer Kraft ineinander hervorriefen. Daher war es für sie in keiner Weise überraschend, dass die Bilder einen Blick in das Universum der Elektrizität ermöglichten.

Die ›fast unzähligen Sterne‹ der Elektrizität besagen zweitens auf der ästhetischen Ebene, dass hier die illusionistischen Techniken der Kunst in den Ressourcen der empirischen Wissenschaften erscheinen und dabei ein unmögliches Original vorführen. Ein Original nämlich, das in der Beobachtung Lichtenbergs Sternen wie ein Trugbild ähnelt. Das Konzept des Originals hat zuvor in der europäischen Kunstgeschichte die Bilder beherrscht und in eine Hierarchie der zu- oder abnehmenden Ähnlichkeit gestürzt, die der Repräsentation unterworfen war. Sobald die Repräsentation der Elektrizität jedoch unmögliche Ähnlichkeit mit Sternen oder Kreisen produziert, stürzt auch das System der Repräsentation in sich zusammen, dessen Spiel der Ähnlichkeit nach Foucault darauf basiert, alle Bilder zu einem zu machen.

Eine dritte technische Dimension beschreibt der Kulturwissenschaftler Bernhard Siegert: Das Ende der Repräsentation bedeutet die Einführung einer für die technischen Kommunikationsmedien wesentlichen Differenz zwischen Zeichen und Signal. Es »tritt eine spezifische Ordnung des Signals an die Stelle einer Ordnung der Repräsentation« (Siegert 2003, 256). Das Signal als physikalisches Ereignis eines Zeichens kümmert dessen Repräsentationsfunktion nicht mehr. Die Lichtenberg-Figuren markieren nun präzise den Übergang von einer Ordnung zur anderen, denn deren Aufzeichnung eines elektrischen Stroms gibt

sich noch als Zeichenpraxis aus, bei der das Signal die Repräsentation ablöst, während es sich selbst als visuelle Repräsentation einer eigenen Welt tarnt. Von Lichtenbergs Bildnachweis der positiven und negativen Ladung der Elektrizität geht schließlich auch in der Wissenschaftsgeschichte die bedeutsame Entscheidung aus, in der visuellen Darstellung über eine bloße Illustration der Vorstellungen und Ideen hinauszugehen und den Bildern eigene Beweiskraft zuzubilligen. Dieser Wandel in der Bedeutung der Bilder führt so weit, dass die Beweiskraft einer Hypothese schließlich nur mehr visuell gedacht und vorgestellt werden wird, sie führt zum Ende der Physik als Naturlehre im klassischen Sinne. Denn die untersuchten Phänomene verlassen den Bereich der sinnlich wahrnehmbaren Welterfahrung, sie lassen sich nur mehr mittels Hypothesen erklären, die ihrerseits weder mess- noch nachprüfbar sind, sondern ausschließlich denkbar. Der Hebel zur Zerstörung der Newtonschen Welt findet sich insofern in einer zunehmenden Relevanz der Visualisierungen von Elektrizität, die das naturwissenschaftliche Verfahren der Modellbildung von Naturkräften ästhetischen Gesetzen unterwerfen. Ausgehend von einer Selbstabbildung der Elektrizität in den Lichtenberg-Figuren generieren Visualisierungsverfahren und mit ihnen erzeugte Bilder physikalische Theorien, wobei die Bildinhalte die Evidenz der von ihnen abgeleiteten Annahmen liefern, bis ihnen schließlich am Endpunkt dieser Entwicklung zukommt, Visualisierungen einer ausschließlich denkbaren Theorie zu ermöglichen. Sobald also eine Visualisierungstechnik gefunden ist, die über eine bloße Repräsentation des Wahrnehmbaren hinausreicht, erstreckt sich ihr symbolischer Rahmen tendenziell auf jede Art naturwissenschaftlicher Erkenntnis. Diese Wechselbeziehung zwischen visuellen Praktiken und theoretischen Annahmen ermöglicht die Konstruktion eines unerhörten Gedankenspiels als einer Theorie, die mit dem bisherigen mechanistischen Weltbild bricht und gleichzeitig eine konzeptionelle Änderung der Epistemologie einleitet. Dies geschieht unter drei Aspekten: der visuellen Evidenz, der mathematischen Ähnlichkeit als physikalischer Analogie und der Entwicklung von Simulationsmodellen als inneren Scheinbildern.

Faraday

Die diesen fundamentalen Wandel erzeugende Forschungsrichtung stellt die Frage, wie eine Kraft oder eine Energie durch den Raum vermittelt oder übertragen wird, wenn keine Verbindung zwischen Ausgangspunkt und Endpunkt vorhanden ist, sie stellt die Frage, wie das Licht der Sonne zur Erde gelangt, wie die Gravitation und der Magnetismus durch den Raum vermittelt werden,

sie stellt also die Frage nach dem Äther als universalem Kommunikationsmedium.

Um den fundamentalen Wandel in den Bildpolitiken der heute so genannten visuellen Kultur auf dem Feld der Wissenschaft zu verdeutlichen, ist die Geschichte der Elektrizitätslehre unverzichtbar. Auf Michael Faradays Versuche zur Influenz von Stromkreisen und ihre magnetische Wirkung ab dem Jahre 1831 geht das Konzept elektromagnetischer Felder, also die Grundlage der Expansion unseres Mediensystems, zurück. Faraday entwarf nach seinen ersten Versuchen sein Konzept der ›lines of force‹, der magnetischen Kraftlinien, von denen jeder Raum erfüllt sei und deren Verlauf mit dem der magnetischen Felder übereinstimme. Hierbei erscheint das Konzept des Feldes untrennbar von seiner Visualisierung in Form von Kraftlinien (vgl. Faraday 1852a, 407-443). Heinrich Hertz schrieb über Faraday:

»Die elektrischen und magnetischen Kräfte wurden ihm das Vorhandene, das Wirkliche, das Greifbare; die Elektrizität, der Magnetismus wurden ihm Dinge, über deren Vorhandensein man streiten kann. Die Kraftlinien [...] standen vor seinem geistigen Auge im Raume als Zustände desselben, als Spannungen, als Wirbel, als Strömungen, als was auch immer – [...] aber da standen sie, beeinflussten einander, schoben und drängten die Körper hin und her, und breiteten sich aus, von Punkt zu Punkt einander die Erregung mitteilend« (Hertz 1889, 342 f.).

Die ›Erregung‹ geht in dieser Theorie der Kraftlinien innerhalb eines Magnetfeldes von deren visueller Repräsentation aus, die entsteht, wenn man Eisenspäne auf ein Blatt Papier streut und einen Magneten in ihre Nähe bringt. Die Eisenspäne formen diskrete Kurven, die von den Magnetpolen ausgehen und im Raum expandieren. Wenn die Stärke des Magneten erhöht wird, bilden sich innerhalb dieser Kraftlinien neue, so dass das gesamte Feld im Raum expandiert. Die Kraftlinien versorgten Faraday nicht nur mit einer simplen Abbildung der Linien innerhalb eines Magnetfeldes, sondern mit einer bildlichen Vorstellung der tatsächlich dort wirkenden Kraftübertragung, die seine folgenden Experimente leitete und eine wesentliche Rolle in der gedanklichen Konzeption seiner Feldtheorie spielte. Bedeutsam scheint mir hierbei zu sein, dass Faraday die Sichtbarmachung von Magnetfeldern nicht erfunden hat – bereits Lichtenberg gibt im Vorgriff auf die Feldtheorie an, dass seine Figuren methodisch ermöglichen, »die Natur der elektrischen Materie auf eine ähnliche Art zu untersuchen, wie es bei dem Magneten in Ansehung der magnetischen Materie durch aufgestreuten Feilstaub geschieht« (Lichtenberg 1778b, 27) –, sondern dass Faraday die »Ansehung« und damit die Vorstellung von Magnetfeldern zum Ausgangspunkt wie zum Beweis seiner Theorie machte, denn sie versorgten ihn mit einer Vorstellung, wie eine Distanzhandlung zwischen zwei Körpern ver-

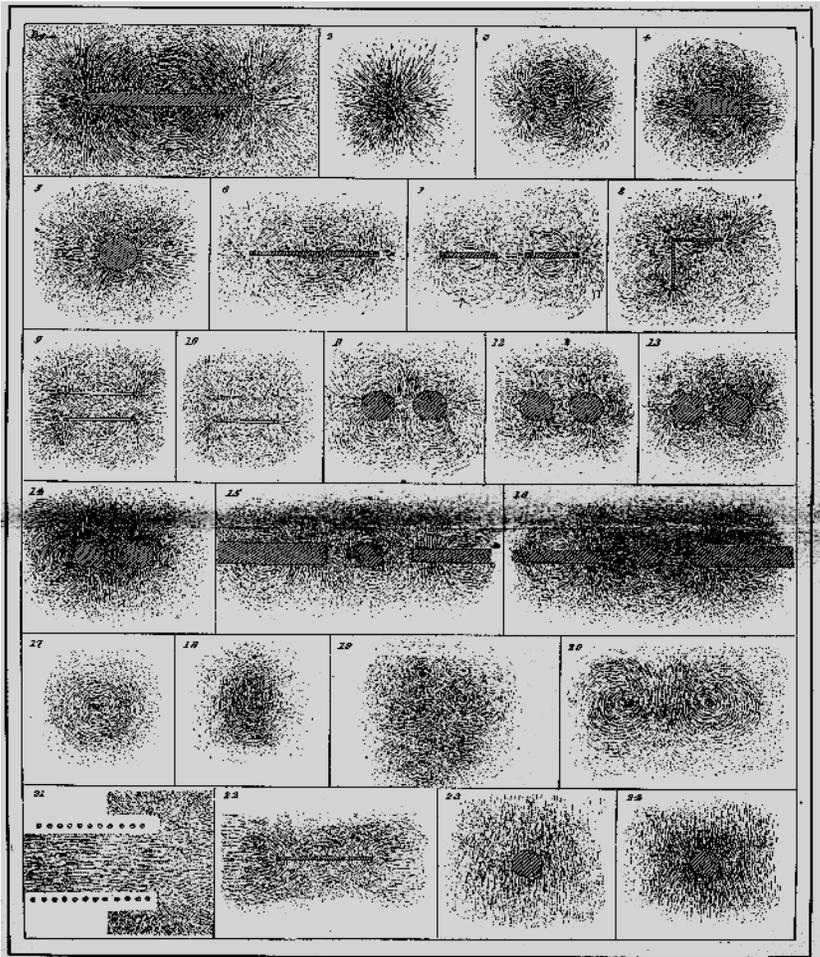


Abb. 10: Faraday: Magnetische Kraftlinien

mittelt, also mediatisiert sei (vgl. Nersessian 1985, 182-186). Die Kraftlinienbilder zeigten einerseits die Richtigkeit einer Annahme von im Raum expandierenden Magnetfeldern, andererseits legte ihre Visualisierung nahe, dass dieselben Kraftlinien auch für die Vermittlung dieser Kräfte verantwortlich waren. Die Vermittlung jedoch schien unter Ansehung der Bilder nicht länger nur als eine unmittelbare Kraftübertragung denkbar – eine weit verbreitete Annahme der zeitgenössischen Physik – sondern jene brachten Faraday vielmehr zur Annahme, dass die Kraftlinien eine »gewisse unabhängige physische Existenz haben« (Faraday 1852b, 373). Sobald ein »physikalischer Charakter der

magnetischen Kraftlinien: mittels ihres Selbstabbildungsverfahrens visuelle Evidenz erhielt, ließ sich davon ausgehend auch das Konzept ihrer zeitgebundenen Übermittlung entwickeln, denn damit schien das fehlende Element der Kraftübertragung gefunden.◀6 Eine solche Annahme, die das Ende der Theorie einer unmittelbaren Distanzwirkung bedeutete, konnte allerdings nicht mehr visuell verifiziert werden, sondern schuf die Notwendigkeit genauerer Berechnungen, um die aus den Bildern nicht abzuleitenden Konsequenzen dieser Annahme zu überprüfen.

Mit dieser Theorie, in deren Mittelpunkt die Kraftlinien standen, ließen sich darüber hinaus seltsame Phänomene beim zweitenzeitgenössischenSelbstabbildungsverfahren der Natur, den Linien auf Chladnischen Klangfiguren, erklären. Chladni hatte bereits festgestellt, dass sich mit einem Geigenbogen an einer vibrierenden Platte in dem aufgestreuten Sand Figuren bildeten, doch sobald er sehr leichtes und feines Pulver aufstreuete, fielen diese Teilchen nicht in die einzelnen Linien seiner Klangfiguren, sondern schienen gleichsam in der Luft zu schweben und sanken erst auf die Platte, wenn der Ton und die Schwingung beendet war. Eine Erklärung für dieses Phänomen lieferte Faraday bereits im Jahre 1831:

»When a plate is made to vibrate, currents are established in the air lying upon the surface of the plate, which pass from the quiescent lines towards the centres or lines of vibration [...] and then pro-

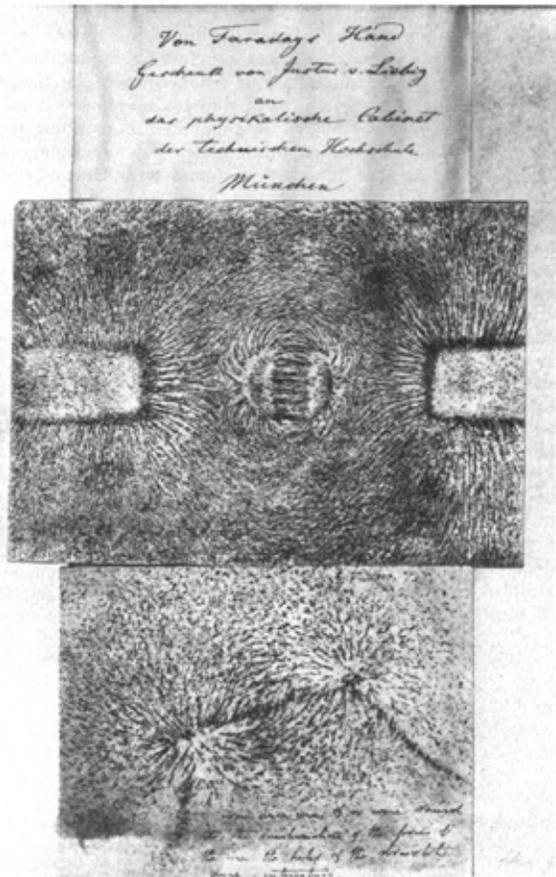


Abb. 11: Faraday: Kraftlinienbild. Von Faraday selbst 1850 mit Eisenspänen erzeugt und fixiert.

ceeding outwards from the plate to a greater or smaller distance, return towards the quiescent lines« (Faraday 1831, 302).

Damit konnten sowohl die Lichtenberg-Figuren als auch die Klangfiguren Chladnis als Belege einer Existenz elektrischer Felder *avant la lettre* angesehen werden. Eine Vorstellung der dreidimensionalen Ausbreitung dieser ›lines of vibration‹ äußerte Faraday ebenfalls bereits 1831: »As any particular part of the surface moves upwards in the course of its vibration, it propels the air and communicates a certain degree of force to it, perpendicular or nearly so to the vibrating surface« (Faraday 1831, 306). Durch diese Selbstabbildung der in der Elektrizitäts- und Klangforschung auftretenden Phänomene mittels Kraftlinienbildern, Chladnischen Klangfiguren und Lichtenberg-Figuren erhielt ihr Bild ein so großes Gewicht, dass auf ihm selbst die Grundlagen seiner theoretischen Erfassung verborgen zu sein schienen.⁴⁷ Damit etablierte sich eine Notwendigkeit ›bildgebender Verfahren‹ zur Herstellung von Evidenz in der Wissenschaft, denen hier nur in ihrer weiteren theoretischen Ausdifferenzierung nachgegangen werden soll, um die Änderungen aufzufinden, die diese visuelle Methode für die naturwissenschaftliche Erkenntnisweise bedeutete.

Maxwell

»Das von ihm selbst erarbeitete Bild hat Faraday jedoch auf den Gedanken gebracht, dass elektromagnetische Wirkungen über transversale Schwingungen der Kraftlinien weitergeleitet werden könnten« (Simonyi 2001, 344). Ausgehend von Faradays Idee, dass sowohl elektrische als auch magnetische Vorgänge im Raum zwischen den Dingen vor sich gehen, wurde in der weiteren Erforschung des Elektromagnetismus die klassische Mechanik der Physik attackiert. Insbesondere James Clerk Maxwell bewunderte Faradays Kraftlinien-Konzept ungemein und kam schließlich zu der Überzeugung, Faraday habe »sagen wollen, dass der ganze Raum von vornherein voll von Kraftlinien ist, deren Arrangement von den in ihm befindlichen Körpern abhängt, und dass die mechanischen und electrischen Actionen eines Körpers von den Kraftlinien abhängen, die an ihn anstossen« (Maxwell 1873/1883, 218 f.).

Bis zur Formulierung dieser revolutionären These hatte Maxwell die Arbeiten, Experimente und Theorien Faradays genau studiert, die ihn schließlich zu seinen berühmten Gleichungen des elektromagnetischen Feldes und damit zur bahnbrechenden Feldtheorie führten (vgl. Larmor 1937; Harman 1982, 72-98; Galison 1983, 35-51; Buchwald 1985, 20-40; Hendry 1986, 156-176; Harman 1998,

98-112). Eine Nutzung des elektromagnetischen Spektrums durch Kommunikationsmedien und damit die Ausdifferenzierung unseres gegenwärtigen Mediensystems ermöglichten überhaupt erst eben diese Feldgleichungen, die in ihrer gedanklichen Formulierung auf frühe Visualisierungsverfahren innerhalb der Elektrizitätsforschung und die durch sie vermittelte Vorstellung einer allgemeinen Kraftausbreitung zurückgehen.

Maxwell maß nämlich insbesondere dem Visualisierungsverfahren von Kraftlinien einen hohen Stellenwert bei, das für Faraday so enorme Bedeutung besessen hatte, relativierte jedoch dessen für die Theorie belanglosen Wert als reine Abbildung von Naturkräften zu einem kreativen Verfahren der Analogiebildung, das aus der Krisis der bildlichen Abbildungen eine generative Methode der wissenschaftlichen Arbeit entwickelte und zudem in der Lage war, die wichtigste Abbildung in der Physikgeschichte des 19. Jahrhunderts zu produzieren. Auf dem Weg dorthin rekonstruierte Maxwell in seiner Arbeit »On physical lines of force« (1862) die unsichtbaren Linien im Raum und stellte die Eigenschaften des elektromagnetischen Feldes als Wirkungen eines mechanisch funktionierenden Trägers, des Äthers, vor. Zuvor entwickelte Maxwell bereits in seiner Arbeit »On Faraday's lines of force« (1856) ein Äthermodell als ein mechanisches Konzept der Wirkungsweise, wie die Kräfte innerhalb eines elektromagnetischen Feldes übertragen wurden. Neben der mathematischen Klarheit seiner Formeln erscheint hier vor allem sein methodischer Zugang zu diesem Forschungsgebiet für die weitere Entwicklung seines Fachs und des wissenschaftlichen Umgangs mit Bildern bedeutsam. Als die wesentliche wissenschaftliche Leistung mit Hilfe der bisherigen Methodik definierte Maxwell die Reduktion und Vereinfachung von Forschungsergebnissen, was entweder zu einer mathematischen Formel oder einer physikalischen Hypothese führen könne. Im ersten Falle verliere man die untersuchten Vorgänge vollkommen aus dem Blick, im zweiten Falle sehe man »die Phänomene durch ein Medium« (Maxwell 1856a, 155) und müsse auf diese partielle Blindheit gegenüber den Fakten vertrauen.

»We must therefore discover some method of investigation which allows the mind at every step to lay hold of a clear physical conception, without being committed to any theory founded on the physical science from which that conception is borrowed« (Maxwell 1856a, 156).

Aus diesem methodischen Grund gelte es, sich »mit der Existenz physikalischer Analogien« vertraut zu machen, die sich von einer »theilweise[n] Ähnlichkeit zwischen den Gesetzen eines Erscheinungsgebietes mit denen eines andern« (Maxwell 1856b, 4) herleiten. Insofern weist die ›physikalische Analogie‹ einen »Ausweg, welcher die Nachteile einer rein mathematisch gefaßten Theorie

[...] und einer eigentlichen physikalischen Hypothese [...] zugleich vermeidet« (Weyl 1928, 124). Wie die Lichtenberg-Figuren ermöglichten auch die Kraftlinien Faradays eine Sichtbarmachung des vormals Unsichtbaren, hier der Magnetkräfte; Maxwell schlug an diese Visualisierungsleistung anschließend vor, die Kraftlinien als eine rein geometrische Repräsentation eines Magnetfeldes zu denken, als »ein geometrisches Modell der physikalischen Kräfte« (Maxwell 1856b, 7), das eine räumliche Ausbreitung der Magnetkräfte nach geometrischen Modellen berechenbar machte, statt das Feld selbst abzubilden. Auch thermische oder elektrische Phänomene sollten sich so in eine Sammlung reiner geometrischer Wahrheiten auflösen lassen. Daher entwarf er ein geometrisches Modell des Feldes, bei dem die Richtung der Kräfte durch Kraftlinien versinnbildlicht wurde. Um die Intensität der Kräfte vorzuführen, stellte er sich ein nicht weiter zusammenpressbares Fluidum vor, das aus Kraftlinien geformt wurde und eine regelmäßige Körperform annahm, die einer Röhre ähnelte. »This method of representing the intensity of a force by the velocity of an imaginary fluid in a tube is applicable to any conceivable system of forces« (Maxwell 1856a, 159). Die Anwendbarkeit »auf jedes denkbare System von Kräften« bedeutete im Fall des elektromagnetischen Feldes die Ausschaltung einer Fernwirkung, denn es war »in dem bei den elektrischen und magnetischen Kräften vorkommenden Falle möglich, die Röhren so anzuordnen, dass sie keine Zwischenräume freilassen« (Maxwell 1856b, 8).

»Indem ich alles auf die rein geometrische Idee der Bewegung einer imaginären Flüssigkeit zurückführe, hoffe ich Allgemeinheit und Präcision zu erreichen und die Gefahren zu vermeiden, die eine Theorie mit sich bringt, welche in voreiligen Hypothesen die wahren Ursachen der Erscheinungen gefunden zu haben beansprucht« (Maxwell 1856b, 9). ◀8

Maxwell entwarf also einen imaginären, elastischen, flüssigkeitsähnlichen Stoff innerhalb eines rein geometrischer Logik folgenden Modells, das auf alle elektrischen oder magnetischen Fernwirkungen als Kraftübertragung im Raum angewendet werden konnte. ◀9 Bei dem Träger der Bewegung handelte es sich, wie er ausdrücklich betonte, nicht einmal um ein hypothetisches Fluidum, sondern um einen »Inbegriff imaginärer Eigenschaften« ◀10 (Maxwell 1856b, 9), der insofern keine physikalische Hypothese des elektrischen oder magnetischen Feldes ermöglichte. Das geometrische Modell war vielmehr eine »physikalische Analogie«, die dem Bewusstsein die mathematischen Ideen in einer körperhaften Form vorführen sollte, sie war eine heuristische Illustration. Es bestand schlicht aus einer Verkörperung »mathematischer Ähnlichkeit« (»mathematical resemblance«; Maxwell 1856a, 157), denn die mathematische Analogie zwischen magnetischen Kraftfeldern, Wärme und Elektrizität

basierte auf mathematischer Ähnlichkeit und nicht physikalischer Gleichheit, die Ähnlichkeit ergab sich aus den mathematischen Berechnungen und nicht den damit verbundenen Phänomenen.

Es macht den Unterschied zwischen diesem Bildsystem und einem analytischen Formalismus aus, der in die Elektrizitätsforschung spätestens 1798 von Johann Wilhelm Ritter eingeführt war (vgl. Wiesenfeld 2003), dass hier eine visuelle Repräsentation die zu erklärenden Phänomene weder abbildete noch sie in abstrakten Symbolen fasste, sondern eine neue Dimension der Bildlichkeit einführte, die eine Vorstellung der Wirkungsweise des imaginären Stoffs, des Äthers, vermittelte, ohne den Anspruch zu erheben, sie »wirklich« zu zeigen. Statt dessen plante Maxwell vielmehr, ein mechanisches Konzept (»mechanical conception« (Maxwell 1856a, 188) zu entwerfen, um nicht nur in der mathematischen Ähnlichkeit zu verharren. ◀11 Er entwarf in den folgenden Jahren eine Abbildung der mathematisch und naturwissenschaftlich einzig möglichen Ausformung des Mediums zwischen Ursache und Wirkung, die er dann in aller Bescheidenheit weiteren Forschungen zur Verifikation übereignete, statt sie für gültig zu erklären. Es handelt sich um eine berühmte Abbildung aus der Arbeit »On physical lines of force« (1862), die nichts weniger als unser gegenwärtiges System der Elektrodynamik ermöglichte, weil sie Maxwell Gelegenheit gab, nicht länger über die Funktionsweise der Übermittlung nachzudenken, sondern ihre Existenz anzunehmen und – wesentlich bedeutsamer – ihre Folgen zu berechnen. Erst eine Abbildung von etwas, das nicht zu beobachten war und von dem Maxwell sagte, dass es außerhalb des Bildes nicht existierte, ermöglichte es also, die Basis des modernen Medienzeitalters zu legen. Insofern handelt es sich – zusammenfassend gesagt – bei Maxwells Äthermodell um eine Darstellung seines allgemeinen Ätherkonzepts.

Bei seiner Entwicklung dieses Ätherkonzepts ging Maxwell erneut von einer Abbildung aus, nämlich von Faradays hochgeschätzter Sichtbarmachung der Feldlinien.

»Das schöne Bild des Verlaufs der magnetischen Kraft, welches dieses Experiment bietet, erweckt in uns unwillkürlich die Vorstellung, dass die Kraftlinien etwas Reales seien und mehr anzeigen, als bloß die Resultierende zweier Kräfte, deren unmittelbare Ursache an einem ganz anderen Orte ihren Sitz hat, und welche im Felde gar nicht existiren, bis ein Magnet an diese Stelle des Feldes gebracht wird« (Maxwell 1862b, 4).

Aus dieser Wirkung des Bildes, den Kraftlinien eine physikalische Realität vermitteln zu können, die nur aus der Bildinterpretation und nicht aus empirischen Daten stammt, erwuchs der Plan, »die magnetischen Phänomene von einem mechanischen Gesichtspunkte zu betrachten und zu untersuchen, welche

Spannungen oder Bewegungen eines Mediums im Stande sind, die beobachteten mechanischen Phänomene hervorzubringen« (ebd., 5).

Ein »mechanischer Gesichtspunkt« bedeutet, dass der Raum nach diesem Modell von einem elastischen Äther erfüllt sein muss, der aus unzähligen infinitesimalen Wirbeln besteht. Diese kleinen Wirbel, deren Achsen auf den Kraftlinien liegen, stoßen direkt an ihre nebenliegenden Wirbel an und bewirken so durch direkte Kraftübertragung die Äthervibrationen getreu dem Cartesianischen Weltbild, in dem leerer Raum unvorstellbar und damit eine Distanzwirkung ohne vermittelndes mechanisches Medium undenkbar war. Zunächst sah sich Maxwell dem Problem der diskontinuierlichen Kraftübertragung gegenüber, wie es notwendigerweise bei Systemen rotierender Wirbel auftrat, denn »die an einander grenzenden Partien zweier benachbarter Wirbel müssen sich in entgegengesetzter Richtung bewegen« (ebd., 25). Aus diesem Grund fügte Maxwell kleine Partikel zwischen die einzelnen Wirbel ein, »welche wie Frictionsrollen wirken« (ebd.), da sie sicherstellten, dass sich das ganze System der Wirbel in eine Richtung drehen konnte. Um die Intensität der Kräfte vorzuführen, konstruierte er ein Modell von nicht weiter zusammenpressbaren Wirbeln, das er selbst »ungeschickt« (Maxwell 1862a, 486) nannte und das aus Kraftlinien geformt wurde sowie eine regelmäßige Körperform annahm, die einem Bienenstock oder dessen Waben ähnelte. Dieses berühmteste Bild der Physik des 19. Jahrhunderts aus dem Jahre 1861 vermittelt eine Anschaulichkeit der Vermittlung von elektrischer oder magnetischer Fernwirkung aus dem Gestaltungsprinzip einer Visualisierung »mathematischer Ähnlichkeit«. Elektromagnetische Kräfte im Raum finden darin die mechanische Entsprechung ihrer Übertragung (vgl. Siegel 1991, 36-39).

Die Bewegungsübertragung erfolgte nun »derart, dass eine Translation der Friktionsteilchen eine Rotation jener anderen Teilchen nach sich zieht. Maxwell hat die Translation den elektrischen, die Rotation den magnetischen Eigenschaften zugeordnet, aber man könnte ebenso gut umgekehrt verfahren und könnte die Rolle des Systems der Friktionsteilchen auch einer inkompressiblen Flüssigkeit übertragen« (Seeliger 1948, 132).

Wenn der elektrische Strom hier von A nach B fließt und die Wirbel GH entgegen des Uhrzeigersinns in Bewegung gesetzt werden, wirken sie auf die kleinen Partikel PO , die in entgegengesetzter Richtung des ersten Stroms in Bewegung kommen und so den induzierten Strom bewirken (vgl. Maxwell 1862b, 37). Das hier abgebildete Modell (Abb.12) enthält neben dieser Aufforderung zum Gedankenexperiment auch eine zeichnerische Ungenauigkeit, die in vielen nach Maxwells Tod publizierten Reproduktionen des Modells stillschweigend elimi-

niert worden ist, denn die unterhalb AB gelegenen rotierenden Wirbel müssten sämtlich im Uhrzeigersinn in Bewegung gesetzt werden.

Sobald die Repräsentation von elektrischen und magnetischen Vorgängen im gleichen Modell als eine der Wirkungen im Raum möglich geworden war, ließen sich ebenfalls andere Medien als Friktionsrollen denken, denn es ging schließlich um ein elastisches Medium, das ausschließlich transversale Wellen transportierte.

Maxwell entwarf sein Konzept der Vorgänge im Äther, verabschiedete sich jedoch zugleich von einer Abbildung der tatsächlichen Vorgänge, um stattdessen ein idealisiertes Wirbelmodell zu konzipieren. Dazu legte er fest, er wolle das Modell der Teilchen und Wirbel

»nicht als die richtige Ansicht über das, was in der Natur existiert, oder als eine Hypothese über das Wesen der Elektrizität im bisherigen Sinne dieses Wortes angesehen wissen. Diese Art der Verbindung ist jedoch mechanisch denkbar, leicht zu untersuchen und geeignet, die wirklichen mechanischen Beziehungen zwischen den bekannten elektromagnetischen Erscheinungen darzustellen« (Maxwell 1862b, 50).

Das Bild des Äthers entspricht insofern keinem Bild der Natur im traditionellen Sinne, es bildet nicht einmal mehr eine Hypothese über die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen ab. Vielmehr ist es ein »provisorisches und vorläufiges« (Maxwell 1862a, 486) Arbeitsmodell zur Darstellung der Kraftübertragung, das nur die eine wesentliche Voraussetzung besitzt, denkbar zu sein. Es handelt sich demnach um die visuelle Repräsentation eines imaginären Modells, das dadurch »real« wird, dass ein Betrachter es in Gedanken simuliert. Dieses ästhetische Verfahren bedeutet die entscheidende Neuerung der naturwissenschaftlichen Theoriebildung, die damit in der Lage ist, zu zeigen, »in welcher Weise die elektromagnetischen Erscheinungen durch die Fiction eines Systems von Molekularwirbeln nachgeahmt werden können« (Maxwell 1862b, 52). Um dieses offene System weiter zu entwickeln, nennt Maxwell folgende Bedingungen: »mathematische Folgerichtigkeit [...] und eine hinlänglich befriedigende Vergleichung zwischen ihren logischen Konsequenzen und den Thatsachen, soweit sie gegenwärtig bekannt sind« (ebd.). Aus diesem modernen wissenschaftlichen Ansatz, den Maxwell gegenüber der vereinfachenden Hypothesenbildung aus der mathematischen Übereinstimmung zweier unterschiedlicher Phänomene wie der Elektrizität und dem Licht für überlegen hielt, leitete sich eine neue Form der naturwissenschaftlichen Erkenntnisbildung ab, die stark vom Begriff und der Vor-Stellung eines Bildes abhängig war. Das bedeutet, dass sich neben der grundlegenden mathematischen Berechenbarkeit der wissenschaftlichen Darstellungen eine gleichsam metaphori-

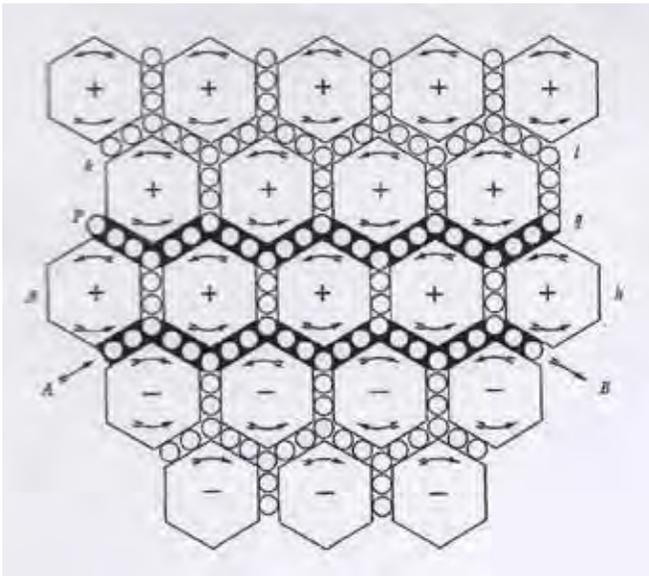


Abb. 12: Maxwell: Äthermodell

sche Ebene etablierte, die mit dem Konzept der Ähnlichkeit ihre überragenden Erfolge erzielte. Denn es ist durchaus beeindruckend, mittels einer mechanischen Analogie, genauer gesagt der Abbildung eines unmöglichen, mechanisch denkbaren, dynamischen Systems, das selbst auf der kleinen Modellbasis nicht funktionieren würde, zu den allgemeinen Feldgleichungen der Elektrodynamik vorzustoßen.

Mittelbar kann ebenfalls der Beginn einer elektromagnetischen Lichttheorie der Hypothese rotierender Wirbel, ihrem ›ungeschickten‹ Modell und dessen Gedankenexperimente induzierender Kraft zugeschrieben werden. Nach den Worten des Physikers Ludwig Boltzmanns scheint Maxwells Arbeit deswegen »zu dem Interessantesten zu gehören, was die Geschichte der Physik bietet,« speziell »die schlichte Einfachheit, mit welcher Maxwell schildert, wie er mühsam stufenweise vordrang und zur abstractesten und eigenartigsten Theorie, welche die Physik kennt, durch ganz specielle concrete Vorstellungen gelangte, die an triviale Aufgaben der gewöhnlichen Mechanik anknüpfen« (Boltzmann 1898, 86).

Die Ähnlichkeit der Naturabbildungen mit ihren angenommenen Berechnungen generiert in dem Moment die Notwendigkeit einer eigenen und vollkommen neuen visuellen Ordnung, an dem die bildgebenden Verfahren der Natur versagen, die immerhin noch das Konzept des Feldes von Faraday ermöglichen, doch den Äther eben nicht abbilden.

Nachdem das System der Repräsentation mittels Ähnlichkeit bereits bei den Lichtenberg-Figuren in sich zusammengestürzt ist, erscheint das Mittel der Repräsentation hier erneut als ›mathematische Ähnlichkeit‹. Allerdings auf eine vollkommen veränderte Art und Weise, denn die bildliche Darstellung reprä-

sentiert ein radikales Denkmodell, dessen einzige Realität, die es abbildet, es selbst ist. Damit entscheidet die Ähnlichkeit mit der eigentlichen Idee darüber, ob das Bild selbst zu den Dingen gehört, die es zeigt. Das Original des Bildes ist das Konzept, das wir uns von einer Erscheinung machen, die nur auf dem Bild existiert. Diese Methode der ›physikalischen Analogie‹ führt die Repräsentation eines Modells ›mathematischer Ähnlichkeit‹ ein, bei dem es nicht mehr darum geht, alle Bilder zu einem zu machen, sondern mittels des Bildes das Konzept als materielle Vorstellung zu realisieren. In der Geschichte der wissenschaftlichen Modellbildung, die Maxwell damit neu strukturiert, wird meiner Ansicht nach zu wenig betont, dass diese neue erfolgreiche Methode eben nicht die inneren Verfahren oder Mechanismen eines Phänomens darstellt, sondern vielmehr ein wirksames Bild der Vorstellung liefert, wie sich derjenige, der das Modell konstruiert, die inneren Verfahren denkt. ◀12 Nach einer These von Nancy J. Nersessian ist die visuelle Repräsentation des Wirbeläthermodells »intended as an embodiment of an imaginary system, displaying a generic dynamical relational structure, and not as a representation of the theoretical model of electromagnetic field actions in the aether« (Nersessian 2002, 140f.).

Nach dieser Modellbildung als Ende aller mechanischen Modelle konstruierte Maxwell folgerichtig keine neuen, sondern konzentrierte sich auf die Berechnung der dynamischen Bewegungsvorgänge im Feld. ◀13 Dabei wurde er, wie er in einem späteren Text über das Verhältnis von mathematischem und physikalischem Denken schreibt, von einem »mental image of the concrete reality« (Maxwell 1870, 220) geleitet, das hinter mathematischen Abstraktionen steckt. Dieses leitete sich jedoch eher von der Mathematik Lagranges und einem gedanklichen Übergang zu dynamischen Systemen statt von Modellen rotierender Wirbel her, die eine Theoriebildung dynamischer Systeme nur einschränkten. In diesem Sinn definierte Maxwell sein mechanisches Modell im Nachhinein gewissermaßen als materielles Gedankenexperiment, als

»Demonstrationsstück dafür, dass man sich wirklich einen Mechanismus herstellen kann, der eine Verbindung einzelner Teile schafft, die der wirklichen Verbindung der Teilchen eines elektromagnetischen Feldes äquivalent ist. In der Tat lässt ja auch das Problem der Bestimmung des Mechanismus, durch den bestimmte Bewegungen bestimmter Teile eines Feldes zu einander in bestimmte Beziehung treten, eine unendliche Anzahl von Lösungen zu« (Maxwell 1873, 580).

Insofern steht die methodische Frage der ›unendlichen Zahl von Lösungen‹ im Vordergrund, die eine Suche nach dem spezifischen Funktionsmechanismus ersetzt durch ein dem wirklichen Mechanismus äquivalentes dynamisches Denkmodell, das nicht mehr den Anspruch einer allgemeingültigen Repräsentation der Naturkräfte erhebt. In den unendlich zahlreichen mechanischen

Konzepten, die unter der Bedingung ihrer Evidenz und logischen Zulässigkeit verwendbar sind, lässt sich die wichtigste methodische Neuerung des theoretischen Ansatzes von Maxwell erkennen, der eine wissenschaftliche Erklärung zum prinzipiell offenen System macht, das einerseits leichter auf neue empirische Daten reagieren kann und andererseits in einer Modell- und damit auch Erklärungsvielfalt der wissenschaftlichen Hypothesen die bestmögliche Methode der wissenschaftlichen Erkenntnis bestimmt.

»In erster Beziehung warnte Maxwell davor, eine Naturanschauung bloß aus dem Grunde für die einzig richtige zu halten, weil sich eine Reihe von Konsequenzen derselben in der Erfahrung bestätigt hat. Er zeigt an vielen Beispielen, wie sich oft eine Gruppe von Erscheinungen auf zwei total verschiedene Arten erklären läßt. Beide Erklärungsarten stellen die ganze Erscheinungsgruppe gleich gut dar. Erst wenn man neuere, bis dahin unbekannte Erscheinungen zuzieht, zeigt sich der Vorzug der einen vor der anderen Erklärungsart, welche erstere aber vielleicht nach Entdeckung weiterer Tatsachen einer dritten wird weichen müssen« (Boltzmann 1899a, 128).

Ausgelöst und immer bezogen sind Maxwells methodische Überlegungen und damit in einem weiteren Sinne die ›Entwicklung der Methoden der theoretischen Physik‹ (Boltzmann) jedoch weiterhin auf die wesentliche Frage nach dem Äther als Universalmedium, die hinter so vielen wissenschaftlichen Modellen steckt. Den Stellenwert dieser Frage führt Maxwell auch in den letzten Sätzen seines Hauptwerks, dem zweibändigen »Treatise«, noch einmal nachdrücklich aus:

»Wenn etwas von einem Partikel zu einem andern durch einen Zwischenraum transportirt wird, in welchem Zustande befindet sich dann dieses Etwas, nachdem es das eine Partikel verlassen und bevor es das andere erreicht hat? Ist dieses Etwas, wie Neumann annimmt, die potentielle Energie zweier Partikel, wie sollen wir dann die Existenz dieser Energie an einer Stelle des Raumes, wo weder das eine noch das andere Partikel vorhanden ist, begreifen können? In der Tat, wird überhaupt Energie in endlicher Zeit, d.h. nicht instantan, von einem Körper zu einem andern übergeführt, so muss es ein Medium geben, in welchem sie, nachdem sie den einen Körper verlassen, und bevor sie andere erreicht hat, sich mittlerweile aufhält, denn wie Torricelli schon bemerkt hat, ist Energie eine Quintessenz so subtiler Natur, dass sie in kein Gefäß geschlossen zu werden vermag, ausser in der innersten Substanz der materiellen Dinge. Daher müssen auch diese Theorien alle zu der Conception eines Mediums führen, in welchem die Fortpflanzung vor sich geht. Stimmt man einmal der Hypothese von der Existenz eines Mediums zu, so glaube ich, dass demselben bei unsern Untersuchungen ein hervorragender Platz anzuweisen ist, und dass wir mit allen Mitteln uns eine begriffliche Vorstellung von allen Details seiner Wirkungsweise zu verschaffen suchen sollten. Das war aber stets mein Hauptbestreben, als ich dieses Werk ausarbeitete« (Maxwell 1873, 607).

Hertz

Dem Physiker Heinrich Hertz war es vorbehalten, auf der Basis der Maxwell'schen Gleichungen »Zweifel an der Identität von Licht, strahlender Wärme und elektrodynamischer Wellenbewegung zu beseitigen« (Hertz 1888, 196). Heinrich Hertz schuldete Maxwell größte Dankbarkeit, denn er konnte an dessen Berechnungen von »numerical relations between optical, electric and electromagnetic phenomena« **14** aus dem Jahre 1861 anschließen, die Maxwell zur Hypothese einer elektromagnetischen Lichttheorie in direktem Zusammenhang mit Forschungen zur Verbesserung seines Äthermodells führten. Mittels Maxwells Feldgleichungen erhielten Hertz' Experimente zu elektromagnetischen Wellen einen Sinn, sie gehen auf Gedankenexperimente zurück, die Hertz im Rahmen seiner Kieler Vorlesung zur »Constitution der Materie« anstellte (vgl. Hertz 1884). Nach der Durchführung seiner berühmten Experimentalserie 1886-89 machte er Maxwell ein atemberaubendes Kompliment, das sicherlich auch in seiner Erleichterung begründet war, bei Maxwell eine theoretische Anleitung für seine Experimente gefunden zu haben:

»Man kann diese wunderbare Theorie nicht studieren, ohne bisweilen die Empfindung zu haben, als wohne den mathematischen Formeln selbständiges Leben und eigener Verstand inne, als seien dieselben klüger als wir, klüger sogar als ihr Erfinder, als gäben sie mehr heraus, als seinerzeit in sie hineingelegt wurde« (Hertz 1889, 344).

Ludwig Boltzmann, der bereits in jungen Jahren die Thesen Maxwells aufmerksam studiert hatte und seit dieser Zeit von der Genialität Maxwells überzeugt blieb, kritisierte daraufhin bereits im Jahre 1892 Hertz' Begeisterung für Maxwells Formeln, als er schrieb, »dass Maxwells Formeln lediglich Konsequenzen seiner mechanischen Modelle waren und Hertz' begeistertes Lob in erster Linie nicht der Analyse Maxwells, sondern dessen Scharfsinn in der Auffindung mechanischer Analogien gebührt« (Boltzmann 1892, 23f.) .

Dieser Hinweis wurde von Hertz schließlich kurz vor seinem Tode in seiner Analyse der Verfahren wissenschaftlichen Arbeitens verarbeitet, die unter dem Namen Scheinbildtheorem Wissenschaftsgeschichte geschrieben hat. In dieser Theorie führte Hertz die Entwicklung des epistemologischen Bildkonzepts von Maxwell konsequent weiter, **15** der, ausgehend von einer »physikalischen Analogie« als heuristischer Illustration, dem Bild den theoretischen Status eines materiellen Gedankenexperiments zugewilligt hatte, und definierte innere Scheinbilder als Verfahren der Erkenntnisproduktion:

»Es ist die nächste und in gewissem Sinne wichtigste Aufgabe unserer bewussten Naturerkenntnis, dass sie uns befähige, zukünftige Erfahrungen vorauszusehen, um nach dieser Voraussicht unser gegenwärtiges Handeln einrichten zu können. Als Grundlage für die Lösung jener Aufgabe der Erkenntnis benutzen wir unter allen Umständen vorangegangene Erfahrungen, gewonnen durch zufällige Beobachtungen oder durch absichtlichen Versuch. Das Verfahren aber, dessen wir uns zur Ableitung des Zukünftigen aus dem Vergangenen und damit zur Erlangung der erstrebten Voraussicht stets bedienen, ist dieses: Wir machen uns innere Scheinbilder oder Symbole der äußeren Gegenstände, und zwar machen wir sie von solcher Art, dass die denknöthigen Folgen der Bilder stets wieder die Bilder seien von den naturnotwendigen Folgen der abgebildeten Gegenstände. Damit diese Forderung überhaupt erfüllbar sei, müssen gewisse Übereinstimmungen vorhanden sein zwischen der Natur und unserem Geiste. Die Erfahrung lehrt uns, dass die Forderung erfüllbar ist und dass also solche Übereinstimmungen in der That bestehen. Ist es uns einmal geglückt, aus der angesammelten bisherigen Erfahrung Bilder von der verlangten Beschaffenheit abzuleiten, so können wir an ihnen, wie an Modellen, in kurzer Zeit die Folgen entwickeln, welche in der äußeren Welt erst in längerer Zeit oder als Folgen unseres eigenen Eingreifens auftreten werden; wir vermögen so den Thatsachen vorauszuzeilen und können nach der gewonnenen Einsicht unsere gegenwärtigen Entschlüsse richten. – Die Bilder, von welchen wir reden, sind unsere Vorstellungen von den Dingen; sie haben mit den Dingen die eine wesentliche Übereinstimmung, welche in der Erfüllung der genannten Forderung liegt, aber es ist für ihren Zweck nicht nötig, dass sie irgend eine weitere Übereinstimmung mit den Dingen haben. In der That wissen wir auch nicht, und haben auch kein Mittel zu erfahren, ob unsere Vorstellungen von den Dingen mit jenen in irgend etwas anderem übereinstimmen, als allein in eben jener einen fundamentalen Beziehung« (Hertz 1894, 1f.).

Hertz formulierte damit den Prozess physikalisch-dynamischer Modellbildung, **16** wie er seither in diesem Fach vertreten wird, als eine Absage an das mechanistische Weltbild der Physik. »Die Grundbegriffe jeder Wissenschaft, die Mittel, mit denen sie ihre Fragen stellt und ihre Lösungen formuliert, erscheinen nicht mehr als passive Abbilder eines gegebenen Seins, sondern als selbstgeschaffene intellektuelle Symbole« (Cassirer 1953, 5). Die Erkenntnis hängt damit auf einer fundamentalen Ebene nicht länger von der Bedingung einer Ähnlichkeit zwischen Bild und Sache ab, sondern von der möglichst genauen und in sich logischen Konzeption der Darstellung unserer »inneren Scheinbilder oder Symbole der äußeren Gegenstände«. Als Resultat der Nicht-Wahrnehmbarkeit elektromagnetischer Wellen und ihres dennoch gelungenen Nachweises streicht Hertz die Wahrnehmung in einer radikalen gedanklichen Konsequenz als primäre Quelle unserer Erkenntnis und synthetisiert deren Methoden zu einem Prozess der Anfertigung innerer Scheinbilder, der nur mehr unter einer Bedingung steht: Es koppeln sich Erkenntnisfortschritte an eine Bilderstrategie, bei der »die denknöthigen Folgen der Bilder stets

wieder die Bilder seien von den naturnotwendigen Folgen der abgebildeten Gegenstände«. Das bedeutet, dass Berechnungen und Messverfahren an die Stelle der Wahrnehmung treten, denn »wir wissen auch nicht, und haben auch kein Mittel zu erfahren, ob unsere Vorstellungen von den Dingen mit jenen in irgend etwas anderem übereinstimmen, als allein in eben jener einen fundamentalen Beziehung«. Innere Scheinbilder stehen insofern am Beginn aller folgenden virtuellen Verfahren, denn sie ersetzen den Erkenntniszusammenhang von Wahrnehmung und Reflexion durch Berechnung und Simulation der Phänomene. Sobald diese inneren Scheinbilder als Modelle wissenschaftlicher Erkenntnis vorgestellt werden, liegt ihre Bedeutung nicht mehr in der Repräsentation des Seins der Naturvorgänge, sondern in einer auf Messdaten gestützten Phänomen-Beschreibung, also »in dem, was sie als Mittel der Erkenntnis leisten, in der Einheit der Erscheinungen, die sie aus sich selbst heraus erst herstellen« (Cassirer 1953, 6).

Denn es sind nicht länger – wie Lichtenberg bereits feststellte – die Funken als Erscheinungen der Elektrizität, die einer Erforschung und Nutzung von elektromagnetischen Wellen den Weg weisen, sondern die leuchtenden Blitze verstellen eher den Blick auf die tatsächlichen Vorgänge im Raum. Deren Analyse ermöglicht erst die Evidenz der Bilder von Lichtenberg, Faraday, Maxwell und Hertz, deren Leistung darin besteht, eine ›Einheit von Erscheinungen‹ zu schaffen, die sonst keine wahrnehmbare Gemeinsamkeit besitzen. Im Übergang von einer mechanischen zu einer dynamischen Auffassung der untersuchten Phänomene ist in diesem Zusammenhang der kontinuierliche Bedeutungszuwachs der Bilder, angefangen bei den Lichtenberg-Figuren über die Kraftlinien, das Wirbeläthermodell bis zu den Hertz'schen Scheinbildern, auffällig. Die Entwicklung verläuft derart, dass der Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis nicht länger nur visuell repräsentiert wird, sondern vielmehr von inneren Scheinbildern als epistemologischer Methode so abhängig ist, dass Hertz den Begriff des Bildes mit dem des Systems synonym benutzen kann.◀17 Allerdings besteht eine Theorie nach Hertz »nicht nur in einem logischen System, sondern sie liefert uns auch eine physikalische Vorstellung der natürlichen Vorgänge« (Lopes Coelho 1996, 279). Daher kann der Bildbegriff von Hertz nicht vollständig im Systembegriff aufgehen, stattdessen bezeichnet er eine von Visualisierungstechniken abgeleitete abstrakte Form physikalischer Theoriebildung, die die Fähigkeit besitzt, eine bildliche Vorstellung zu vermitteln.

Die sich an visuellen Darstellungen entwickelnde, neue wissenschaftliche Methode der inneren Scheinbilder etabliert eine auf eigenwilligen Modellen der Äthertheorie basierende, drahtlose Signalübertragung im Raum, ohne für deren Funktionieren eine andere Erklärung zu haben als die durch die inneren

Scheinbilder erst hergestellte.◀18 Wenn die Bildung neuer Konzepte, um die Wirklichkeit zu beschreiben, jedoch von ›physikalischen Analogien‹, aufgebaut auf ›mathematischer Ähnlichkeit‹, abhängt, dann gerät auch die Naturerkenntnis unter die Gesetze der Zeichentheorie, wie Ludwig Boltzmann im Jahre 1899 in einer Würdigung von Heinrich Hertz feststellte. Hertz bringe den Physikern zum Bewusstsein, »dass keine Theorie etwas Objektives, mit der Natur wirklich sich Deckendes sein kann, dass vielmehr jede nur ein geistiges Bild der Erscheinungen ist, das sich zu diesen verhält, wie das Zeichen zum Bezeichneten« (Boltzmann 1899a, 137f.). Damit zieht Boltzmann den logischen Schluss aus einer Analogie des dynamischen Modellbegriffs der Mechanik und der epistemologischen Kulturtechnik des Bildes bei Hertz auf der einen Seite sowie andererseits Hertz' bislang wenig gewürdigter semiotischer Denkweise. Diese offenbart sich als strikte Trennung der experimentellen Erkenntnisse und der für ihre Beschreibung verwendeten sprachlichen Zeichen, die laut Hertz über ein bestimmtes Eigenleben verfügen, das einen Physiker im innersten verdrießen kann, wenn er sich immer wieder mit der Frage nach dem Wesen der Elektrizität und nie mit der Frage nach dem Wesen des Goldes oder der Geschwindigkeit konfrontiert sieht.

»Können wir das Wesen irgendeines Dinges durch unsere Vorstellungen, durch unsere Worte erschöpfend wiedergeben? Gewiß nicht. [...] Mit den Zeichen ›Geschwindigkeit‹ und ›Gold‹ verbinden wir eine große Zahl von Beziehungen zu anderen Zeichen, und zwischen allen diesen Beziehungen finden sich keine uns verletzenden Widersprüche. Das genügt uns und wir fragen nicht weiter. Auf die Zeichen ›Kraft‹ und ›Elektrizität‹ aber hat man mehr Beziehungen gehäuft, als sich völlig mit einander vertragen; dies fühlen wir dunkel, verlangen nach Aufklärung und äußern unseren unklaren Wunsch in der unklaren Frage nach dem Wesen von Kraft und Elektrizität. Aber offenbar irrt die Frage in Bezug auf die Antwort, welche sie erwartet. Nicht durch die Erkenntnis von neuen und mehreren Beziehungen und Verknüpfungen kann sie befriedigt werden, sondern durch die Entfernung der Widersprüche unter den vorhandenen, vielleicht also durch Verminderung der vorhandenen Beziehungen« (Hertz 1894, 9).

Dieser Grundsatz der Bedeutungsreduktion als Chance zum Erkenntnisfortschritt gilt nicht nur für die verbale Theoriebildung, sondern wird von Hertz auch auf die Methode der inneren Scheinbilder übertragen. Es sind dort erneut zeichentheoretische Überlegungen, die es ermöglichen, auch das dynamische Denkmodell Maxwells der ›unendlichen Zahl von Lösungen‹ in die Theorie der inneren Scheinbilder zu integrieren und Ordnung innerhalb der Logik der Signifikanten zu schaffen:

»Eindeutig sind die Bilder, welche wir uns von den Dingen machen wollen, noch nicht bestimmt durch die Forderung, dass die Folgen der Bilder wieder die Bilder der Folgen seien. Verschiedene Bilder derselben Gegenstände sind möglich und diese Bilder können sich nach verschiedenen Richtungen unterscheiden« (ebd., 2).

Um dennoch den heuristischen Wert der Bilder beurteilen zu können, nennt Hertz folgende vier Kriterien, die sie zu erfüllen haben: logische Zulässigkeit, bezogen sowohl darauf, dass ihre wesentlichen Beziehungen den Beziehungen der äußeren Dinge entsprechen als auch darauf, dass ihre inneren Beziehungen zulässig sind, Richtigkeit, Deutlichkeit und Einfachheit. Um mehrere zulässige und richtige Bilder hinsichtlich ihrer Qualität beurteilen zu können, führt Hertz noch das Kriterium der Zweckmäßigkeit ein, das ein Bild bevorzugt, das »mehr wesentliche Beziehungen des Gegenstandes widerspiegelt als das andere; welches, wie wir sagen wollen, das deutlichere ist. Bei gleicher Deutlichkeit wird von zwei Bildern dasjenige zweckmäßiger sein, welches neben den wesentlichen Zügen die geringere Zahl überflüssiger oder leerer Beziehungen enthält, welches also das einfachere ist« (ebd., 2f.).

Diese vier nach ihrer Wichtigkeit hierarchisierten Grundbedingungen¹¹⁹ sowohl für eine Ästhetik der visuellen Kultur als auch für die Methodik wissenschaftlicher Erkenntnis leiten ihre Entstehung von einer tiefgehenden Krise der menschlichen Wahrnehmungsfähigkeiten ab, die Hertz bei seinen berühmten Experimenten zu elektromagnetischen Wellen so deutlich zu spüren bekam, dass sie konsequenterweise Eingang in seine Theoriebildung gefunden haben.

»Die Vorgänge, von welchen wir handeln, haben ihren Tummelplatz im leeren Raume, im freien Äther. Diese Vorgänge sind an sich unfassbar für die Hand, unhörbar für das Ohr, unsichtbar für das Auge; der inneren Anschauung, der begrifflichen Verknüpfung sind sie zugänglich, aber nur schwer der sinnlichen Beschreibung« (Hertz 1889, 340).

Aus dieser Erfahrung des nicht mehr Wahrnehmbaren in der Signalübertragung nämlich »müssen wir hinter den Dingen, welche wir sehen, noch andere, unsichtbare Dinge vermuten, hinter den Schranken unserer Sinne noch heimliche Mitspieler suchen« (Hertz 1894, 30). Tatsächlich ließ sich die Mechanik mit der Elektrodynamik nur dadurch versöhnen, dass »heimliche Mitspieler« ins Feld geschickt wurden, dass also die Vorstellung eines elektromagnetischen Äthers zwischen dem Prinzip der freien Existenz von Kräften im Raum und der klassisch-mechanischen Kraftübermittlung vermittelte. Konsequenterweise stellte Hertz daher fest, nachdem er für die Durchsetzung der Maxwell'schen Gleichungen und seiner Wellentheorie gesorgt hatte: Es

»erhebt sich die gewaltige Hauptfrage nach dem Wesen, nach den Eigenschaften des raumfüllenden Mittels, des Äthers, nach seiner Struktur, seiner Ruhe oder Bewegung, seiner Unendlichkeit oder Begrenztheit. Immer mehr gewinnt es den Anschein, als überrage diese Frage alle übrigen, als müsse die Kenntnis des Äthers uns nicht allein das Wesen der ehemaligen Imponderabilien offenbaren, sondern auch das Wesen der alten Materie selbst und ihrer innersten Eigenschaften, der Schwere und der Trägheit« (Hertz 1889, 354).

Es ist die zentrale Frage nach dem Äther, die eine Abkehr vom mechanistischen Weltbild nahe legte, wie sie auch neue methodische Verfahren der naturwissenschaftlichen Erkenntnis induzierte. Das Bild dessen, was nicht zu beweisen war, erschloss der modernen Naturwissenschaft ihre erkenntnisleitende Methode. Im Kern dieses dynamischen Theoriegebäudes steht folgerichtig die Frage nach der Bilderproduktion als generativem Potential wissenschaftlicher Erkenntnis, wie sie Ludwig Boltzmann im Jahre 1899 formulierte:

»Wenn wir nun die Überzeugung haben, daß die Wissenschaft bloß ein inneres Bild, eine gedankliche Konstruktion ist, welche sich mit der Mannigfaltigkeit der Erscheinungen niemals decken, sondern nur gewisse Teile derselben übersichtlich darstellen kann, wie werden wir zu einem solchen Bilde gelangen? wie es möglichst systematisch und übersichtlich darstellen können?« (Boltzmann 1899b,163).

- 01►** Im vorliegenden Text diskutiere ich zum einen die Frage, inwiefern ästhetische Visualisierungsverfahren Eingang in die naturwissenschaftliche Theoriebildung während der Krise des mechanistischen Weltbildes gefunden haben, das durch Kraftfelder ohne eine erkennbare Substanz als Trägerin der Kräfte radikal in Frage gestellt wurde. Zum anderen beschäftige ich mich mit der Frage nach dem erkenntnistheoretischen Wandel, den eine geänderte Bildkonzeption in die wissenschaftliche Forschung einbrachte. Vgl. zu dem Forschungsansatz, der eine Erweiterung des Bild- und damit des Kunstbegriffs auf Wissenschaftsbilder annimmt: Tauber 1996; Jones / Galison 1998; Geimer 2002.
- 02►** Georg Christoph Lichtenberg schreibt die erste Entwicklung des Elektrophors dem Naturforscher Johann Carl Wilcke im Jahre 1762 zu, »nur betrachtete Wilcke sein Instrument, das aus Glas war und vertikal stand, mit 2 beweglichen Belegungen, bloß als einen Apparat zu einem einzelnen Versuch; Volta machte eine elektrische Maschine daraus und nahm Harz, welches freilich besser ist« Lichtenberg, Georg Christoph: Brief an Franz Ferdinand Wolff vom 10. Februar 1785. In: Lichtenberg 1967, 619.
- 03►** Vgl. Lichtenberg, Georg Christoph: Brief an Georg Heinrich Hollenberg im März 1777. In: Lichtenberg 1967, 295.
- 04►** Noch deutlicher wird die frühere Übersetzung aus dem Jahre 1806 desselben lateinischen Textes: Die Figuren lehren, »daß in elektrisierten Körpern, besonders Nichtleitern, Veränderungen vorgehen, von denen die Physiker bisher nichts wahrgenommen hatten; nicht zu gedenken, daß sie auch zur Erklärung anderer Naturerscheinungen dienlich sind« (Lichtenberg 1778b, 27).
- 05►** Eine weitere Möglichkeit bestand darin, die »Blitzfiguren« zu studieren, die sich auf der Haut vom Blitz getroffener Personen bildeten, bereits in der Antike bekannt waren und durch ihre körperlichen Einschreibungen die Angst vor der Macht des Gewitters schürten(vgl. Jellinek 1903).
- 06►** Dieses Element der Kraftübertragung gab ebenfalls Anlass zu allgemeineren Überlegungen: »Sicherlich reichen die experimentellen Data zu einer vollständigen Vergleichung der verschiedenen Kraftlinien noch nicht aus. Sie gestatten noch keinen sicheren Schluss, ob die magnetischen Kraftlinien denen der Gravitation, also einer Fernkraft, analog sind, oder ob sie eine physische Existenz haben und ihrer Natur nach mehr denen der elektrischen Induction oder des elektrischen Stromes gleichen. Ich neige gegenwärtig mehr zu der letzteren Ansicht als zu der ersteren« (Faraday 1852b, 377).

07► Eine Kopplung von Elektrizität und visueller Darstellung diente vor der Entdeckung der Lichtenberg-Figuren zur Illustration des Versuchsaufbaus oder besaß darüber hinaus den Status einer Herstellung ›magischer Bilder«. Das Vergnügen an elektrischen Vorführungen ›experimenteller Philosophen« führte zu einer neuen Ordnung des Wissens, der jedoch anfänglich der Ruch des Spektakels anhing. Ein bei diesen Vorführungen häufig gezeigter Versuch, der bereits von Benjamin Franklin beschrieben wurde und sich ebenfalls bei Tiberius Cavallo findet, zeigt deutlich, wie unterschiedlich der Stellenwert der Visualität in den elektrischen Experimenten vor Erfindung der Lichtenberg-Figuren war: »Man nehme einen Kupferstich, z.B. von einem regierenden Herrn, schneide das Brustbild heraus, vergolde dessen hintere Seite, und klebe es mit dünnem Gummiwasser auf eine Glastafel so, daß die Vergoldung ans Glas kömmt, und eine Belegung desselben abgiebt. Auf die andere Seite der Glastafel klebe man den übrigen Theil des Kupferstichs so auf, daß dessen rechte oder vordere Seite ans Glas kömmt, damit, von vorn gesehen, das ganze Bild in seiner gehörigen Lage erscheine, obgleich das Brustbild vor dem Glase, und der übrige Theil des Kupferstichs hinter demselben ist. Die hintere Seite der Glastafel und des darauf geklebten Papiers überziehe man nun mit Goldblättchen, lasse aber den obern Theil frey. Zuletzt fasse man das ganze Bild am obern nicht vergoldeten Theile an, und setze eine kleine bewegliche Krone auf das Haupt des Königs. Wird alsdann diese auf beyden Seiten belegte Glastafel mäßig geladen, und einer Person so in die Hand gegeben, dass sie die hintere Vergoldung berührt, so wird diese Person, wenn sie es wagt, die Krone abzunehmen, oder nur anzutasten, einen starken Schlag bekommen, und ihren Endzweck verfehlen. Der Experimentator hingegen, der das Bild jederzeit an dem obern nicht vergoldeten Theile anfasset, wird die Krone ohne Gefahr anrühren, und dieses als einen Beweis seiner Treue angeben können« (Cavallo 1785, 195 f.).

08► »By referring everything to the purely geometrical idea of the motion of an imaginary fluid, I hope to attain generality and precision, and to avoid the dangers arising from a premature theory professing to explain the cause of the phenomena« (Maxwell 1856a, 159).

09► Diese Modell wurde dadurch ermöglicht, »indem wir die Grösse und Richtung der Kraft, von der wir sprechen, durch die Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung einer unzusammendrückbaren Flüssigkeit definiren« (Maxwell 1856b, 8).

10► »It is not even a hypothetical fluid which is introduced to explain actual phenomena. It is merely a collection of imaginary properties which may be employed for establishing certain theorems in pure mathematics in a way more intelligible to many minds and more applicable to physical problems than that in which algebraic symbols alone are used« (Maxwell 1856a, 160).

- 11►** »Ich hoffe aber durch sorgfältiges Studium der Electricitätslehre und der Lehre von der Bewegung zäher Flüssigkeiten eine Methode zu entdecken, welche auch vom elektrotonischen Zustande ein mechanisches, zu allgemeinen Schlussfolgerungen geeignetes Bild zu entwerfen gestattet« (Maxwell 1856b, 45).
- 12►** Prägend für die Modelltheorie war die Festlegung von Stachowiak: »Hauptcharakteristik dieses Wandels ist der Verzicht auf die in der klassischen Physik für erkenntnismäßig unabdingbar erachtete ›Letzt-‹darstellung theoretisch-physikalisch erschlossener Objekte und Prozesse im anschaulich-mechanischen Modell. Worauf zahlreiche Physiker des 19. und vor allem des beginnenden 20. Jahrhunderts einen erheblichen Teil ihrer Forschungsenergie verwendeten, nämlich elektromagnetische Zusammenhänge mechanisch darzustellen, im Sinne konkreter Vorstellbarkeit ›erkennbar‹ zu machen, ist den Physikern jüngerer Generationen eine nur noch aus geschichtlichen Bedingtheiten verständliche Zielsetzung« (Stachowiak 1973, 184 f.).
- 13►** Die subjektive Vorstellung innerer Verfahren verlangt nicht unbedingt Modelle, sondern kann sich als dynamisches System von der Mechanik emanzipieren, um sich nur noch in Berechnungen zu materialisieren. Dass dies einen bedeutsamen Übergang zu einer anderen Logik des Wissens darstellt, verdeutlicht William Thompson (Lord Kelvin) in seinen »Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light« an der Johns Hopkins Universität in Baltimore im Oktober 1884. Thompson lobte damals seinen Kollegen Maxwell wegen dessen Äthermodell, verwarf jedoch dessen elektromagnetische Lichttheorie als einen Rückschritt, weil ihr die mechanische Erklärungsebene fehle. Thompsons Vorbehalte artikulierten sich in den berühmten Sätzen aus der zwanzigsten und letzten Vorlesung: »I never satisfy myself until I can make a mechanical model of a thing. As long as I cannot make a mechanical model all the way through I cannot understand; and that is why I cannot get the electro-magnetic theory« (Thomson 1884, 206).
- 14►** Maxwell, James Clerk: Brief an Michael Faraday vom 19. Oktober 1861. In: Maxwell 1990, 683.
- 15►** Ludwig Boltzmann formulierte diese These bereits im Jahre 1899: »Hertz hat in seinem Buche über Mechanik, ebenso wie die mathematisch-physikalischen Ideen Kirchhoffs, auch die erkenntnistheoretischen Maxwells zu einer gewissen Vollendung gebracht« (Boltzmann 1899a, 137).
- 16►** Der dynamische Modellbegriff der Mechanik ist der epistemologischen Kulturtechnik des Bildes bei Hertz analog: »Das Verhältnis eines dynamischen Modells zu dem System, als dessen Modell es betrachtet wird, ist dasselbe, wie das Verhältnis der Bilder, welche sich

unser Geist von den Dingen bildet, zu diesen Dingen« (Hertz 1894, 199). Zum Bildbegriff vgl. Majer 1988

- 17►** »Jene aufgezählten Begriffe und Gesetze geben uns also ein erstes System der Prinzipien der Mechanik in unserer Ausdrucksweise; damit zugleich also auch das erste allgemeine Bild von den natürlichen Bewegungen der Körperwelt« (Hertz 1894, 6).
- 18►** Das erkenntnistheoretische Bild-Konzept geht Hertz' Experimentalserie voraus, denn bereits in der Kieler Vorlesung aus dem Jahre 1884 konstatiert Hertz, dass »wir von den Dingen, die wirklich sind, aber in unseren Geist nicht eingehen, Bilder geschaffen haben, die mit jenen Dingen in einigen Beziehungen übereinstimmen, während sie in anderen wieder den Stempel unserer Vorstellungen tragen« (Hertz 1884, 36).
- 19►** Auch diese Grundkriterien sind bereits in der Kieler Vorlesung 1884 entwickelt worden: »Die Eigenschaften, die wir der Materie beilegen dürfen, sind hier nur an zwei Bedingungen geknüpft: sie dürfen sich nicht widersprechen, also sie müssen logisch möglich sein, und die Rechnungen, zu welchen sie führen, müssen möglichst einfach, also sie müssen zweckdienlich sein« (Hertz 1884, 35).

Literatur

Bergmann, Ludwig / Schaefer, Clemens / Gobrecht, Heinrich (Hrsg.) (1987) 7. Aufl. Lehrbuch der Experimentalphysik. Bd. 2 (Elektrizität und Magnetismus). Berlin / New York.

Boltzmann, Ludwig (1892) Über die Methoden der theoretischen Physik. In: Boltzmann, Ludwig (1979) Populäre Schriften. Braunschweig, S. 17-25.

Boltzmann, Ludwig (1898) Anmerkungen. In: Maxwell, James Clerk (1862b): Über physikalische Kraftlinien. Hrsg. v. Ludwig Boltzmann. (Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Bd. 102). Leipzig 1898, S. 85-146.

Boltzmann, Ludwig (1899a): Über die Entwicklung der Methoden der theoretischen Physik in neuerer Zeit. In: Boltzmann, Ludwig (1979) Populäre Schriften. Braunschweig, S. 120-149.

Boltzmann, Ludwig (1899b) Über die Grundprinzipien und Grundgleichungen der Mechanik. In: Boltzmann, Ludwig (1979) Populäre Schriften. Braunschweig, S. 160-169.

Buchwald, Jed Z. (1985) From Maxwell to Microphysics. Aspects of Electromagnetic Theory in the Last Quarter of the Nineteenth Century. Chicago.

- Cassirer, Ernst** (1964 [1953]) 4. Aufl. Philosophie der symbolischen Formen. Bd. 1 (Die Sprache). Darmstadt.
- Cavallo, Tiberius** (1785) Vollständige Abhandlung der theoretischen und praktischen Lehre von der Elektrizität nebst eignen Versuchen. Leipzig.
- Chladni, Ernst Florens Friedrich** (1802) Die Akustik. Leipzig.
- Encyclopaedia Britannica** (1842) Bd. 8, Edinburgh.
- Faraday, Michael** (1831) On a Peculiar Class of Acoustical Figures; and On Certain Forms Assumed by Groups of Particles Upon Vibrating Elastic Surfaces. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, S. 299-318.
- Faraday, Michael** (1852a) On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force. In: **Faraday, Michael** (1855) Experimental Researches in Electricity. Bd. 3. London, S. 407-443.
- Faraday, Michael** (1852b) Über den physikalischen Charakter der magnetischen Kraftlinien. In: ders. (1891) Experimental-Untersuchungen über Elektrizität. Bd. 3. Berlin, S. 371-400.
- Galison, Peter** (1983) Re-Reading the Past From the End of Physics. Maxwell's Equations in Retrospect. In: Functions and Uses of Disziplinary Histories. Hrsg. v. Loren Graham, Wolf Lepenies, Peter Weingart. Dordrecht, S. 35-51.
- Geimer, Peter** (2002) Ordnungen der Sichtbarkeit. Frankfurt.
- Harman, Peter M.** (1982) Energy, Force and Matter. The Conceptual Development of Nineteenth-Century Physics. Cambridge.
- Harman, Peter M.** (1998) The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell. Cambridge.
- Heisenberg, Werner** (1955) Das Naturbild der heutigen Physik. Hamburg.
- Hendry, John** (1986) James Clerk Maxwell and the Theory of the Electromagnetic Field. Bristol.
- Hertz, Heinrich** (1884) Die Constitution der Materie. Eine Vorlesung über die Grundlagen der Physik aus dem Jahre 1884. Hrsg. v. Albrecht Fölsing 1999. Berlin.
- Hertz, Heinrich** (1888) Über Strahlen elektrischer Kraft. In: Hertz, Heinrich (1894) Gesammelte Werke. Bd. 2 (Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft). Leipzig, S. 184-198.
- Hertz, Heinrich** (1889) Über die Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität. In: Hertz, Heinrich (1895) Gesammelte Werke. Bd. 1 (Schriften vermischten Inhalts). Leipzig, S. 339-354.
- Hertz, Heinrich** (1894) Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt. In: Hertz, Heinrich (1894) Gesammelte Werke. Bd. 3 (Die Prinzipien der Mechanik). Leipzig.
- Jellinek, Stephan** (1903) Elektropathologie. Die Erkrankungen durch Blitzschlag und elektrischen Starkstrom in klinischer und forensischer Darstellung. Stuttgart.
- Jones, Caroline / Galison, Peter** (1998) Picturing Science – Producing Art. New York/ London.
- Larmor, J.** (1937) The Origins of Clerk Maxwell's Electric Ideas. Cambridge, Mass.

- Lichtenberg, Georg Christoph** (1778a) Über eine neue Methode, die Natur und die Bewegung der elektrischen Materie zu erforschen. Hrsg. v. Herbert Puppe 1956 (Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften Nr. 246). Leipzig.
- Lichtenberg, Georg Christoph** (1778b) Von einer neuen Art die Natur und Bewegung der elektrischen Materie zu erforschen. In: Lichtenberg, Georg Christoph Schriften und Briefe Bd. 3. Hrsg. v. Wolfgang Promies 1972. München, S. 24-34.
- Lichtenberg, Georg Christoph** (1967) Schriften und Briefe. Hrsg. v. Wolfgang Promies. Bd. 4. München.
- Lopes Coelho, Ricardo** (1996) Der Begriff des Bildes bei Hertz. In: Logos, N. F. Bd. 3, H. 4, S. 271-292.
- Majer, Ulrich** (1988) Semantischer Konventionalismus – Untersuchungen zur Bild-Theorie von Heinrich Hertz. Habilitation. Göttingen.
- Maxwell, James Clerk** (1856a) On Faraday's Lines of Force. In: The Scientific Papers of James Clerk Maxwell. Hrsg. v. W. D. Niven 1890. Bd. 1. Cambridge, S. 155-229.
- Maxwell, James Clerk** (1856b) Über Faraday's Kraftlinien. Hrsg. v. Ludwig Boltzmann 1912 (Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften 2. Aufl, Bd. 69). Leipzig.
- Maxwell, James Clerk** (1862a) On Physical Lines of Force. In: The Scientific Papers of James Clerk Maxwell. Bd. 1. Hrsg. v. W. D. Niven 1890. Cambridge, S. 451-513.
- Maxwell, James Clerk** (1862b): Über physikalische Kraftlinien. Hrsg. v. Ludwig Boltzmann 1898 (Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Bd. 102). Leipzig.
- Maxwell, James Clerk** (1870) Address to the Mathematical and Physical Sections of the British Association. In: The Scientific Papers of James Clerk Maxwell. Bd.2. Hrsg. v. W. D. Niven 1890. Cambridge, S. 215-229.
- Maxwell, James Clerk** (1873) Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus. Bd. 2. Berlin 1883.
- Maxwell, James Clerk** (1990) The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell. Bd. 1. Hrsg. V. P. M. Harman. Cambridge,
- Nersessian, Nancy J.** (1985) Faraday's Field Concept. In: Gooding, David & James, Frank A. J. L. (1985): Faraday Rediscovered. Essays on the Life and Work of Michael Faraday, 1791 – 1867. New York, S. 175-187.
- Nersessian, Nancy J.** (2002) Maxwell and »the Method of Physical Analogy«. Model-based Reasoning , Generic Abstraction, and Conceptual Change. In: Reading Natural Philosophy. Essays in the History and Philosophy of Science and Mathematics. Hrsg. v. David B. Malament. Chicago / La Salle, Illinois, S. 129-166.
- Pancaldi, Giuliano** (2003) Volta. Science and Culture in the Age of Enlightenment. Princeton.
- Riess, P. T.** (1846) Über elektrische Figuren und Bilder. In: Physikalische Abhandlungen der königlichen Akademie der Wissenschaft zu Berlin, S. 1-50.

- Seeliger, Rudolf** (1948) Analogien und Modelle in der Physik. In: *Studium Generale* Jg. 1, H. 3, S. 125-137.
- Siegel, Daniel M.** (1991) *Innovation in Maxwell's Electromagnetic Theory. Molecular Vortices, Displacement Current, and Light.* Cambridge.
- Siegert, Bernhard** (2003) *Passagen des Digitalen. Zeichenpraktiken der neuzeitlichen Wissenschaften, 1500 – 1900.* Berlin.
- Simonyi, Károly** (2001) (3. Aufl.) *Kulturgeschichte der Physik. Von den Anfängen bis heute.* Frankfurt/a. M.
- Stachowiak, Herbert** (1973) *Allgemeine Modelltheorie.* Wien.
- Tauber, Alfred I.** (1996) *The Elusive Synthesis: Aesthetics and Science.* (Boston Studies in the Philosophy of Science, Bd. 182). Dordrecht.
- Thomson, William** (1884) *Notes of Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light.* In: *Kelvin's Baltimore Lectures and Modern Theoretical Physics.* Hrsg. v. Robert Kargon und Peter Achinstein 1987. Cambridge. Mass., S. 7-263.
- Volta, Alessandro** (1816 [1775]) *Elettroforo.* In: *ders. Collezione Dell' Opere del Cavaliere Conte Alessandro Volta.* Bd. 1. Florenz.
- Weyl, Hermann** (1928) (2. Aufl.) *Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft.* München.
- Wiesenfeld, Gerhard** (2003) *Übersetzung in die Instrumentalsprache. Die Figuren in Johann Wilhelm Ritters ›Beweis, dass ein beständiger Galvanismus den Lebensprocess im Thierreich begleite‹.* Vortrag auf der Tagung: *Medien des Lebens,* Bauhaus Universität Weimar. (Tagungsband erscheint 2004).