

können darüber hinaus so stark sein, dass über relevante Differenzen zwischen Entitäten einfach hinweggegangen wird. Das führt regelmäßig zu Erklärungsmodellen oder Paradigmen, die zwar nicht haltbar sind, die aber von der Scientific Community als so plausibel empfunden werden, dass dies »zu wissenschaftlichen Irrwegen führen kann.«³⁸ Mehr noch können die Evidenzeffekte blind für alternative Ansätze machen, die eine mögliche Erklärung liefern, nicht aber in Übereinstimmung mit der Analogie gebracht werden können. Stegmüller spricht in diesem Zusammenhang von einem »den Fortschritt hemmende[n] Dogma«³⁹, das sich aus einer zuvor als fruchtbar erwiesenen Analogie entwickeln kann.⁴⁰ Denn selbst die heuristisch erfolgreichste Analogie ist irgendwann erschöpft, weil die Isomorphie, die ihr zugrunde liegt, immer nur partiell sein kann, ansonsten hätte man es nämlich nicht mit ähnlichen, sondern mit identischen Phänomenen zu tun. Wenn man aber bereits jede Ähnlichkeit als einen nomologischen Isomorphismus missversteht, dann führt das zwangsläufig dazu, dass man Analogien überstrapaziert. Ein Surrogat von Evidenz darf nicht mit dieser verwechselt werden. Ein Analogiemodell ersetzt nicht die Überprüfung der Gesetzmäßigkeiten eines Phänomens, das mit den Gesetzmäßigkeiten eines anderen erklärt werden soll.⁴¹ Eine Verschleppung der Analogie aus der Heuristik in die Theorie ist damit schlicht fahrlässig und letztlich immer ein Indikator dafür, dass kein belastbares Erklärungsmodell oder Paradigma zu haben war.

2.2 Analogien als heuristisches Element in der wissenschaftlichen Praxis

»The trouble is, we want to know more than we can see.«

Conversation on the Plurality of Worlds.
Bernard de Fontenelle 1686.

Weil der erkenntnisbezogene Wert von Analogien ein heuristischer ist, tauchen sie in der Wissenschaft immer da auf, wo Evidenz nicht unmittelbar

38 Ebd., S. 174 (Herv.i.O.).

39 Ebd.

40 Als Beispiel nennt Stegmüller den Glauben, dass sich jedes naturwissenschaftliche Phänomen in einem mechanischen Modell ausdrücken lassen **muss**. (Ebd.).

41 Vgl. ebd., S. 174.

hergestellt werden kann bzw. es keinen direkten Zugang zu den erklärenden Entitäten eines Phänomens gibt. »[S]ince man has no direct perception of a large majority of the objects which science has detected in the physical universe, his knowledge is based on analogies, *ad hoc* objects, possibly artificial.«⁴² Seit dem 17. Jahrhundert, u.a. initiiert durch Francis Bacons *Novum Organon* (1620), verfolgt das, was hier großzügig als moderne Naturwissenschaft bezeichnet werden soll, ein empirisch-induktives Ideal, das sich vor allem durch sensualistische Evidenz auszeichnet. »[W]hatever is not to be deduced from the phenomena«, schließt Newton aus der Unmöglichkeit, die Gravitation als kausale Entität selbst zu beobachten,

is to be called an hypothesis; and hypotheses, whether metaphysical or physical, or based on occult qualities, or mechanical have no place in experimental philosophy. In this philosophy particular propositions are inferred from the phenomena, and afterwards rendered general by induction.⁴³

Die besten Beweise sind die, die sich durch unmittelbare Anschauung im Experiment zeigen lassen. Allerdings teilt das neuzeitliche Wissenschaftsideal das Schicksal aller Ideale, in seiner konsequentesten Form praktisch nicht umsetzbar zu sein.

»The value of this [Bacon's; M.K.] method«, heißt es in Jevons *The Principles of Science*, »may be estimated historically by the fact that it has not been followed by any of the great masters of science.«⁴⁴ In der wissenschaftlichen Praxis stößt das Ideal schnell an Grenzen und so heißt es bei Jevons rückblickend weiter: »[S]cience was supposed to be advancing by the pursuance of the Baconian method, but in reality hypothetical investigation was the main instrument of progress.«⁴⁵ Diese pragmatische Haltung erinnert an die Rekapitulation des schottischen Empiristen David Hume vor dem philosophischen Skeptizismus: Theoretisch nicht widerlegbar, in der Praxis aber auch wenig sinnvoll.⁴⁶

42 Giuseppe Del Re [2000]. *Models and analogies in science*. In: *HYLE International Journal for Philosophy of Chemistry*, Vol.6 (2000), S. 5-15, hier: S. 12.

43 Isaac Newton [1726]. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Dritte Ausgabe, übers. u. hg. v. I. Bernard Cohen u. Anne Whitman. Cambridge 1972, S. 943.

44 Jevons 1874, S. 507.

45 Ebd., S. 508.

46 Vgl. David Hume [1739]. *A Treatise of Human Nature. Being an Attempt to introduce the experimental Method of Reasoning into moral Subjects. Book 1: Of the Understanding*. Oxford 1888, S. 270ff.

Denn tatsächlich kann es aus einer Vielzahl von Gründen unmöglich sein, durch Experiment und Beobachtung Evidenz herzustellen. Eine unmittelbare visuelle Evidenz mag eine hohe Beweiskraft haben, sie ist aber in vielen Fällen nicht gegeben. Denn ein Großteil der Wirkursachen entzieht sich jeder unmittelbaren Wahrnehmung. Man muss nur an die gegenwärtige Physik denken, die sich nahezu ausschließlich mit nicht-wahrnehmbaren Phänomenen beschäftigt. Die wissenschaftliche Erkenntnisgenese muss dann notwendigerweise, von einem empirisch-induktiven in einen hypothetisch-deduktiv operierenden Modus wechseln. Ein Modus, der eben immer schon essenziell für Wissenschaft ist.

Ein Mangel an unmittelbarer Evidenz ist für die empirischen Wissenschaften u.a. schon deswegen allgegenwärtig, weil sich die physische Welt der menschlichen Wahrnehmung in großen Teilen entzieht. Spätestens ab der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts erweitern optisch-mechanische Instrumente den möglichen Erkenntnishorizont, indem sie Nicht-Sichtbares sichtbar machen. Erkenntnis ist nun nicht mehr an die eingeschränkten Wahrnehmungsmöglichkeiten eines *naked eye* (Hooke) gebunden, sondern an die technischen Möglichkeiten einer potenzierten Wahrnehmung. Das bedeutet dann eben auch, dass prinzipiell alles Gegenstand der Empirie werden kann. »Das Unsichtbare [...] ist eine relative und variable Grenzkategorie des potenziell Sichtbaren«⁴⁷ geworden, liest man etwa bei Hartmut Böhme. D.h., optische Instrumente erweitern nicht nur den tatsächlichen Bereich des Sichtbaren, sondern schaffen gleichzeitig ein potenziell Sichtbares: das Noch-nicht-Sichtbare. Mit der Einführung der Kategorie des *potenziell Sichtbaren*, entsteht ein Bewusstsein dafür, dass die Grenzen des Objektbereichs einer empirischen Wissenschaft nicht mehr statisch, sondern beweglich geworden sind.

Der englische Universalgelehrte Robert Hooke, der für das Mikroskop war, was Galileo Galilei für das Fernrohr, bezeugt im Vorwort seiner *Micrographia* (1665), welche einschneidende Zäsur die optischen Instrumente, in seinem Fall das Fernrohr und das Mikroskop, für das Verständnis über den Objektbereich der empirischen Forschung bedeuten.

There is a new visible World discovered to the understanding. By this means the Heavens are open'd, and a vast number of new Stars, and new Motions,

47 Hartmut Böhme [2003]. *Die Metaphysik der Erscheinungen. Teleskop und Mikroskop bei Goethe, Leeuwenhoek und Hooke*. In: Helmar Schramm, Ludger Schwarte, Jan Lazardzig (Hg.): *Kunstammer, Laboratorium, Bühne. Schauplätze des Wissens im 17. Jahrhundert*. Berlin/New York 2003, S. 359–397, hier: S. 367.

and new productions appear in them, to which all the antient Astronomers were utterly Strangers. By this the Earth it self, which lyes so neer us, under our feet, shews quite a new thing to us, and in every little particle of its matter, we now behold almost as great a variety of Creatures, as we were able before to reckon up in the whole Universe it self.⁴⁸

Auf den ersten Blick erscheint es widersprüchlich, dass eine Figur wie die Analogie, die die Nicht-Beobachtbarkeit von Phänomenen geradezu im Programm trägt, formal kompatibel mit einem wissenschaftlichen Ideal sein soll, das »dem Wirklichkeitsbegriff anschaulicher Evidenz verhaftet [bleibt]« und für das »alle Naturprozesse prinzipiell durch das Sehen erklärbar werden.«⁴⁹ Und natürlich entspricht die Analogie keinem wissenschaftlichen Ideal, ihr heuristisches Potenzial kann sie aber gerade da ausschöpfen, wo ein empirisches Wissenschaftsideal einen Objektbereich erschaffen hat, den es nicht annähernd vollständig erfassen kann. Visuelle Evidenz mag zwar wünschenswert sein, sie ist aber nicht immer zu haben und so braucht es, wenn schon nicht valide Methoden, so doch zumindest eine wissenschaftliche Praxis, mit der unbekannte Objekte erschlossen werden können.

Der Ausgangspunkt der modernen Naturwissenschaft ist damit der Folgende: Die generelle Erkennbarkeit der empirischen Welt ist mit dem Auftauchen optischer Instrumente nicht mehr von der menschlichen Wahrnehmungsfähigkeit abhängig, sondern von den technologischen Möglichkeiten ihrer Erweiterung. Gleichzeitig affirmieren die neuen optischen Geräte ein Erkenntnisideal, das auf Anschauung gründet. Wissenschaftliche Erkenntnis wird zwangsläufig relativ zum technologischen Möglichen. Was sich jedoch nicht ändert, ist, dass auch die potenzielle Beobachtbarkeit von Phänomenen in den meisten Fällen weiterhin eine Nicht-Beobachtbarkeit bleibt.

»[B]ut till such time as our *Microscope*, or some other means, enable us to discover the true *Schematisme* and *Texture* of all kinds of bodies«, bemerkt Hooke in seiner *Observation XVIII – Texture of Cork*, »we must grope, as it were, in the dark, and only ghes to the true reasons of things by similitudes and comparisons.«⁵⁰ Wenn Hooke den Begriff *Analogie* hier auch nicht verwendet,

48 Robert Hooke [1665]. *Micrographia. Or some Physiological Descriptions of Minute Bodies made by magnifying Glasses with observations and inquiries thereupon*. London 1665, S. 10.

49 Hans Blumenberg [1975]: *Die Genesis der kopernikanischen Welt*, Bd.3. Frankfurt a.M. 1995, S. 717.

50 Hooke 1665, S. 114 (Herv.i.O.).

meint er ebendies: Um sich der Erklärung für ein bestimmtes Phänomen anzunähern, versucht man es mithilfe ähnlicher Phänomene zu verstehen. Das hat sich bis heute nicht geändert. Zu Hookes Lebzeiten waren die Objektbereiche, die sich einer unmittelbaren Anschauung entzogen in erster Linie die Astronomie, das, was man großzügig als Theorie des Lichts bezeichnen könnte sowie chemische Prozesse. In diesen Fällen griff auch Hooke wie viele seiner Zeitgenossen auf ein hypothetisch-deduktives-Modell zurück.⁵¹ Das hypothetisch-deduktive Modell sieht dabei wie folgt aus: Aus einer Hypothese werden Annahmen deduziert, die dann mithilfe von Experimenten überprüft werden. Die Analogie steht zeitlich vor diesem Prozess. Sie taucht am Anfang auf, sie ist Teil der Hypothesenbildung.

Dass die Analogie in der Wissenschaft eine heuristische Konstante ist, liegt eben auch daran, dass Hypothesenbildung die Grundlage naturwissenschaftlicher Theoriebildung ist. Jede Erklärung, die nicht unmittelbar evident ist (und das sind nun mal die wenigsten), muss zuerst hypothetisch generiert werden. Dabei ist es durchaus überraschend, dass auch die Naturwissenschaft Probleme hat, überhaupt Erklärungsmodelle zu finden. Dass Analogien in der naturwissenschaftlichen Heuristik eine so exponierte Position einnehmen, überrascht dann weniger.

Über die heuristische Bedeutung der Analogie für die Wissenschaft kursiert eine Annahme, die nicht falsch, aber durchaus mit Vorsicht zu genießen ist und die sich bei Rudolf Carnap findet: »[T]he probability that an object *b* has a certain property, is increased by the information that one or more other objects, which are similar to *b* in other respects, have this property.«⁵² Wenn Ähnlichkeiten zwischen Phänomenen die Wahrscheinlichkeit für eine tatsächliche Isomorphie erhöhen, ist man geneigt, das Vorliegen einer Analogie zum Indikator für die Wahrscheinlichkeit des Erfolgs einer Hypothese zu machen. Für wissenschaftliche Maßstäbe ist das natürlich zu wenig. Für den Prozess der Hypothesenbildung ist es hingegen völlig legitim.

51 Vgl. F. F. Centore [1970]. *Robert Hookes Contributions to Mechanics. A Study of Seventeenth Century Natural Philosophy*. Dordrecht 1970, S. 36.

52 Rudolf Carnap [1963]. *Discussion: variety, analogy, and periodicity in inductive logic*. In: *Philosophy of Science* 30 (3) 1963, S. 222-227, hier: S. 225.

2.2.1 Zwei Fallbeispiele aus der naturwissenschaftlichen Forschung

2.2.1.1 Die Analogie von Licht und Wellen

Um die Natur zu erkennen, gilt es in der modernen Naturwissenschaft Effekte zu beobachten und deren Ursachen zu bestimmen. Die Natur selbst wird als ein deterministisches System verstanden, in dem sich aus der Ähnlichkeit von Effekten auf eine Ähnlichkeit der Ursachen schließen lässt. Innerhalb einer Episteme, die auf Beobachtung gründet, kann sich die Plausibilität für eine Hypothese allein schon dadurch einstellen, dass Phänomene bzw. Effekte ähnlich erscheinen. Das ist mitnichten ein valides Kriterium, weil es unzählige Effekte gibt, die sich ähneln, denen aber völlig unterschiedliche Ursachen zugrunde liegen. Und auf der anderen Seite gibt es unzählige Effekte, die sich nicht besonders ähnlich sind, sich aber unter dasselbe Gesetz subsumieren lassen. Der Glaube, dass Hypothesen, die auf Analogien gründen heuristisch erfolgreicher sind, setzt aber genau diese Annahme voraus, nämlich dass es in einem deterministischen System wahrscheinlich ist, dass ähnliche Effekte ähnliche Ursachen haben bzw. ähnliche Phänomene ähnliche Eigenschaften.

Es gibt aber auch den Fall, dass eine Ähnlichkeit von Phänomenen angenommen wird, nicht weil sie ähnlich erscheinen, sondern weil diese Annahme eine befriedigende Erklärung für ein unbekanntes Phänomen liefern kann. Eine der berühmtesten Analogien der Wissenschaftsgeschichte ist so ein Fall, der die Eigenschaften eines beobachtbaren und mechanisch beschreibbaren Phänomens als Eigenschaften für ein nicht-beobachtbares Phänomen annimmt. Gemeint ist die Analogie zwischen der Ausbreitung des Lichts und der Ausbreitung von Schall- bzw. Wasserwellen. Bereits 1665 legt Hooke der *Royal Society* in seiner *Micrographia* eine Beschreibung des Lichts als Wellen vor.

Every pulse or vibration of the luminous body will generate a sphere, which will continually increase and grow bigger, just after the same manner (though indefinitely swifter) as the waves or the rings on the surface of water do swell into bigger and bigger circles about a point in it, where by the sinking of a Stone the motion was begun.⁵³

Der Analogie von Licht- und Wasserwellen geht eine Prämisse voraus, die uns heute nicht mehr allzu vertraut ist, nämlich dass Bewegung nur in der Materie möglich ist. Eine Prämisse, die ironischerweise durch das empirische

53 Hooke 1665, S. 57.

Wissenschaftsideal geradezu erzwungen wird, weil es verlangt, die Natur aus sich selbst heraus zu erklären und nicht durch den Rückgriff auf irrationale Hilfsentitäten. Hooke ist aber nicht der Einzige, der in der Wellenbewegung das beobachtbare Pendant zur Bewegung des Lichts sieht.

Im selben Jahr veröffentlicht Francesco Grimaldi, Professor an der Universität von Bologna, seine Abhandlung *Physico Mathesis de Lumine. Coloribus et Irade*. Auch Grimaldi nimmt an, dass Licht Eigenschaften aufweist, die denen von Wellen ähnlich sind. Das Renne macht am Ende aber der niederländische Physiker Christiaan Huygens, der 1678 die Analogie von Licht und (Schall)wellen in *Abhandlung über das Licht* zum ersten Mal theoretisch voll erfasst.⁵⁴ Davon ausgehend, dass die »wahre Philosophie« die ist, »in welcher man die Ursache aller natürlichen Wirkungen auf mechanische Gründe zurückführt«⁵⁵, fügt die sogenannte Undulationstheorie des Lichts dem Erklärungsmodell der geometrischen Optik (Strahlentheorie) ein mechanisches hinzu.

Wie vor ihm bereits Hooke erkennt auch Huygens die Unzulänglichkeit der Strahlentheorie, die zwar intuitiv einleuchtend ist, weil sie empirisch erfahrbar ist, bestimmte Eigenschaften des Lichts aber nur unzureichend oder überhaupt nicht erklären kann. Dass »Lichtstrahlen, welche aus unendlich vielen Richtungen herkommen, sich kreuzen, ohne sich gegenseitig irgendwie zu hindern«⁵⁶, ist ein Phänomen, das aus damaliger Sicht mit den Gesetzen der geometrischen Optik nicht beschreibbar ist. Aufgrund der gegenseitigen Durchdringung des Lichts, schließt Huygens aus, dass es sich bei dessen Ausbreitung um eine Übertragung von Materie handeln könnte. Dafür bemüht er das Bild von durcheinanderfliegenden Pfeilen oder Geschossen durch die Luft, die bei einem Zusammentreffen gegeneinanderprallen, nicht aber durcheinander hindurchgehen. Huygens folgert, dass sich Licht »auf eine andere Weise ausbreiten [muss]«, und dass »die Kenntnis, welche wir von der Fortpflanzung des Schalles in der Luft besitzen, uns dazu führen [kann], sie zu verstehen.«⁵⁷

Eine Analogie zwischen Licht und Schall, egal wie offensichtlich oder intuitiv plausibel sie uns heute erscheinen mag, fällt nicht einfach so vom Him-

54 Die *Abhandlung über das Licht (Traité de la Lumière)* verfasste Huygens bereits 1678 und trug sie der Königlichen Akademie vor, veröffentlicht wurde sie allerdings erst zwölf Jahre später.

55 Christiaan Huygens [1690]. *Abhandlung über das Licht*. Leipzig 1890, S. 10.

56 Ebd.

57 Ebd., S. 11.

mel. Anzunehmen, dass sich Licht wie Schall verhält, setzt bestimmte Grundannahmen voraus, wovon die erste bereits die wäre, dass die Phänomene der Natur mit den Gesetzen der Mechanik beschrieben werden können. Ebenso muss vorausgesetzt werden, dass die Ausbreitung des Lichts im Raum eine Dauer hat, sowie dass es keinen leeren Raum geben kann, die Ausbreitung des Lichts also eine Art Träger benötigt, zu Zeiten Huygens ist das der sogenannte *Äther*. Wie aber begründet Huygens die Analogie?

Heute, wo die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht eine naturphysikalische Längeneinheit ist, ist es vollständig unstrittig, dass die Durchquerung des Lichts durch den Raum eine Dauer hat. Tatsächlich konnte die Frage, ob das Licht eine endliche oder unendliche Ausbreitungsgeschwindigkeit hat, aber erst 1676, zwei Jahre vor Huygens *Abhandlung über das Licht*, durch den Dänen Ole Rømer entschieden werden. Weil die Geschwindigkeit des Lichts so hoch ist, dass sie mit bloßem Auge auf kurze, ja selbst auf große Distanz überhaupt nicht wahrgenommen werden kann, kann man es durchaus für möglich halten, dass die Geschwindigkeit des Lichts unendlich ist. Der Nachweis, dass Licht eine endliche Geschwindigkeit hat, konnte also überhaupt nur erbracht werden, indem man die Bewegung des Lichts auf einer sehr großen Distanz beobachtet.

Rømer zeigt anhand der Verfinsterung des ersten Jupitermondes, dass der Zeitpunkt für dieses Ereignis abhängig von dem Ort ist, an dem die Erde sich in ihrer Umlaufbahn befindet. D.h., dass der Zeitpunkt der Verfinsterung in Abhängigkeit zu der Größe der Entfernung von der Erde zum Jupitermond variiert. Würde sich das Licht mit unendlicher Geschwindigkeit ausbreiten, dürfte es eine solche Verzögerung aber nicht geben, weil die Länge der Strecke, die das Licht zurücklegen muss, keinen Einfluss auf den Zeitpunkt des Ereignisses hätte.

Für Huygens, der von einer prinzipiellen Beschreibbarkeit natürlicher Erscheinungen durch die Mechanik ausgeht, kann die Ausbreitung des Lichts Gegenstand seiner Untersuchungen werden, weil sie eine Bewegung ist. Damit gibt es eine erste Ähnlichkeit mit dem Schall, die eben darin besteht, dass es sich bei der Ausbreitung des Lichts und des Schalls, um eine Bewegung im Raum handelt. Die zweite Ähnlichkeit ist die, dass es sich beide Male um eine Bewegung handelt, bei der es »sich nicht um die Fortführung eines Körpers [...], sondern um eine folgeweise, von den einen zu den anderen Körpern übergehende Bewegung [handelt].«⁵⁸

58 Ebd., S. 13f.

Die Luft als Mittel, durch die sich der Schall fortpflanzt, ersetzt Huygens durch den Äther, eine aus »unsichtbaren Körpertheilchen«⁵⁹ zusammengesetzte elastische *Materie*. Die Bewegung des Lichts durch diese Masse elastischer Teilchen stellt sich Huygens als eine Kettenbewegung von Stößen vor.⁶⁰ Das Vorbild dafür ist das Kugelstoßpendel, eine mechanische Apparatur, die der französische Physiker Edme Mariotte 1673 in seiner Abhandlung *Traité de la percussion ou chocq des corps* erstmalig erwähnt. Das Kugelstoßpendel, das sich heute vor allem als dekorative Spielerei auf Schreibtischen wiederfindet, demonstriert nicht weniger als das Prinzip der Impulserhaltung. Der Anstoß der ersten Kugel auf die ihr nächste, führt dazu, dass der Impuls von einer Kugel auf die jeweils benachbarte weitergegeben wird und sich schließlich in der letzten als Energie entlädt. Diese mechanische Art der Bewegungsübertragung nimmt Huygens auch für das Licht an.

Der ganze Zauber der Analogie von Licht und Schall (oder eben auch der Ausbreitung des Lichts und der von Wellen auf Wasseroberflächen) besteht in der Annahme einer ähnlichen Bewegungsübertragung und der Vermutung, dass eine allmähliche (und das bedeutet eine gleichmäßige) Ausbreitung kreisförmig verlaufen muss. »Wir wissen«, heißt es in der *Abhandlung über das Licht*,

dass vermittelst der Luft, die ein unsichtbarer und ungreifbarer Körper ist, der Schall sich im ganzen Umkreis des Ortes, wo er erzeugt wurde, durch eine Bewegung ausbreitet, welche allmählich von einem Lufttheilchen zum anderen fortschreitet, und dass, da die Ausbreitung dieser Bewegung nach allen Seiten gleich schnell erfolgt, sich gleichsam Kugelflächen bilden müssen [...]. Es ist nun zweifellos, dass auch das Licht von den leuchtenden Körpern bis zu uns durch irgend eine Bewegung gelangt, welche der dazwischen befindlichen Materie mitgetheilt wird [...]. Wenn nun [...] das Licht zu

59 Ebd., S. 19.

60 So heißt es über die Art wie sich Licht im Äther ausbreitet bei Huygens: »Nimmt man eine Anzahl gleich grosser Kugeln aus sehr hartem Material und ordnet sie in gerader Linie so, dass sie sich berühren, so wird, wenn eine gleiche Kugel gegen die erster derselben stösst, die Bewegung wie in einem Augenblick zur letzten gelangen, welche sich von der Reihe trennt, ohne dass man bemerkt, dass die übrigen sich bewegt hätten; und diejenige, welche den Stoss ausgeübt hat, bleibt sogar unbeweglich mit ihnen vereinigt. Es offenbart sich also hierin ein Bewegungsübergang von ausserordentlicher Geschwindigkeit, welche umso grösser ist, je grössere Härte die Substanz der Kugeln besitzt.« (Ebd., S. 18).

seinem Weg Zeit gebraucht, so folgt daraus, dass diese dem Stoffe mitgetheilte Bewegung eine allmähliche ist und darum sich ebenso wie diejenige des Schalles in kugelförmigen Flächen oder Wellen ausbreitet.⁶¹

Tatsächlich ist das die einzige Stelle in dem Text, in der Huygens eine Analogie zwischen Licht und Schall bildet. Mehr noch weist er im Verlauf seiner Ausführungen explizit auf die signifikanten Unterschiede zwischen der Ausbreitung des Schalls und der des Lichts hin. Die Analogie funktioniert hier eindeutig als heuristisches Instrument, für die Wellentheorie des Lichts theoretikonstitutiv ist dagegen das mechanische Modell, das für den Schall bereits bekannt ist und das am Licht ausprobiert wird.

2.2.1.2 Maxwells mathematischer Formalismus der Faraday'schen Feldlinien

Ein Fall aus der Wissenschaftsgeschichte, der die Spannweite zwischen der Unähnlichkeit der Phänomene bei gleichzeitiger nomologischer Isomorphie weit aufmacht, ist die mathematische Formulierung der Faraday'schen Kraftlinien durch James C. Maxwell.

Der schottische Physiker behilft sich in seiner ersten größeren Abhandlung *On Faraday's Lines of Force* aus dem Jahr 1856 mit einer Analogie, die als Methode eine gewisse Berühmtheit erlangt hat und mit der Maxwell den von Michael Faraday beschriebenen (magnetischen) *Feldlinien* zum aller ersten Mal eine mathematische Form gibt.

Faradays Beschreibung des magnetischen Kraftfeldes und der Feldlinien ist ausschließlich empirisch abgeleitet, seine Beweise besitzen »experimental evidence«⁶². So schließt er seine Überlegungen *On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force* von 1852 mit dem Satz, dass die Eigenschaften der »lines of magnetic force [...] affirm upon the evidence of strict experiment.«⁶³ Faraday ist Experimentalphysiker, seine Schrift enthält nicht eine einzige Formel, geschweige denn einen mathematischen Beweis, er entwickelt die Feldlinien als einen qualitativen Begriff, umgekehrt arbeitet Maxwell nicht experi-

61 Ebd., S. 11.

62 Michael Faraday [1852]. *On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force*. In: *The London, Edinburg, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Vol.3 Jan.-Jun. 1852, Nr.20 Jun., S. 401-427, hier: S. 410.

63 Ebd., S. 427.

mentell-empirisch.⁶⁴ Wenn Maxwell die Faraday'schen Feldlinien berechenbar machen will (weil sich mit Faradays Methode etwa deren Richtung, nicht aber deren Intensität bestimmen lässt), vermeidet er bewusst die Arbeit am Begriff, die nach dem Wesen und den Ursachen fragt (es geht ihm nicht um die Genese ontologischer Aussagen) und beschränkt sich auf eine rein numerische Formalisierung. Allerdings fehlen Maxwell zu diesem Zeitpunkt die Mittel dafür, mit anderen Worten: Es gibt bis dahin schlicht keine Möglichkeit, die Faraday'schen Kraftlinien mathematisch zu formulieren. Und genau hier kommt bei Maxwell die Analogie ins Spiel.

In order to obtain physical ideas without adopting a physical theory we must make ourselves familiar with the existence of physical analogies. By a physical analogy I mean that partial similarity between the laws of one science and those of another which makes each of them illustrate the other.⁶⁵

Entscheidend ist hier das, was Maxwell mit *partial similarity* meint, nämlich eine mathematische Formähnlichkeit zweier physikalischer Phänomene. »Passing from the most universal of all analogies to a very partial one, we find the same resemblance in mathematical form between two different phenomena.«⁶⁶ Eine numerisch-formale Äquivalenz der Relata setzt keine Ähnlichkeit der Relata als empirische bzw. physikalische Größe voraus; d.h., dass sich auch völlig heterogene Phänomene mathematisch gleich ausdrücken lassen können. Demnach ist die eigene Einschätzung Maxwells strenggenommen noch zu schwach, weil er *nur* von Ähnlichkeit spricht, wo er von Identität (des mathematischen Formalismus) sprechen könnte. Der französische Physiker und Wissenschaftstheoretiker Pierre Duhem bringt diesen Sachverhalt in seiner Abhandlung über *Ziel und Struktur der physikalischen Theorien* (1906) hingegen auf den Punkt: »Wenn zwei Kategorien von sehr verschiedenen, sehr unähnlichen Erscheinungen auf abstrakte Theorien reduziert worden sind, kann es geschehen, daß die Gleichungen, in denen die eine derselben formuliert ist, algebraisch, mit den Gleichungen, die

64 Vgl. Friedrich Steinle [2011]. *Die Entstehung der Feldtheorie. Ein ungewöhnlicher Fall der Wechselwirkung von Physik und Mathematik*. In: Karl-Heinz Schlote, Martina Schneider (Hg.): *Mathematics meets physics. A contribution to their interaction in the 19th and the first half of the 20th century*. Frankfurt a.M. 2011, S. 441-486, hier: S. 443.

65 James Clerk Maxwell [1854]. *On Faraday's Lines of Force*. In: W. D. Niven (Hg.). *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. New York 1965, S. 155-229, hier: S. 156.

66 Ebd.

die andere ausdrücken, identisch ist.«⁶⁷ Die Reduktion von der Duhem spricht, verweist auf einen Wechsel der erklärenden Ebene: So können sich empirische Entitäten unähnlich sein, während sie auf einer höheren Abstraktionsebene formal identisch sind,⁶⁸ man abstrahiert auf eine formalere Ebene, indem man das empirisch Besondere subtrahiert.

Um die Faraday'schen Feldlinien in einen mathematischen Formalismus zu überführen, denkt Maxwell sie analog zu einem hydrostatischen System, bestehend aus Röhren, die mit einer nicht komprimierbaren Flüssigkeit gefüllt sind: »If we consider these curves not as mere lines, but as fine tubes of variable section carrying an incompressible fluid [...] we might represent the intensity of the force [...] by the motion of the fluid in these tubes.«⁶⁹ Damit hat Maxwell ein physikalisches Phänomen, das sich mathematisch beschreiben lässt, und das in modifizierter Form auch die Feldlinien numerisch fassen kann. Was Maxwell dabei in Analogie setzt, sind empirische Begriffe wie etwa Druck für Intensität etc.

Maxwell selbst bezeichnet die Analogie als eine »artificial method«⁷⁰, ein Kunstgriff, dem ein instrumenteller Charakter eigen ist, sie ist ein Hilfskonstrukt, das, nachdem es mathematische Mittel bzw. eine Hypothese generiert hat, aufgegeben wird. Die Analogie ist substituierbar, weil sie für die Theorie, und selbst für die Mathematisierung der Feldlinien, nicht zwingend notwendig ist. Sie legitimiert keine Argumentation, sie begründet nichts, sie lässt sich aus der Theorie vollständig streichen bzw. durch etwas anderes ersetzen. Das von Maxwell als Relata zu den Feldlinien erdachte hydrostatische System ist noch nicht einmal eine reale empirische Größe, sondern eine fiktive. Die

67 Pierre Duhem [1906]. *Ziel und Struktur der physikalischen Theorien*. Leipzig 1908, S. 124.

68 Die Tatsache, dass Ähnlichkeiten zwischen physikalischen Phänomenen wahrscheinlicher werden, je höher der Abstraktionsgrad der Beschreibung ist, ist selbsterklärend und wie wir im weiteren Verlauf sehen werden eine beliebte Strategie, um überhaupt Ähnlichkeiten zwischen Entitäten herzustellen.

69 Maxwell 1854, S. 158f.

70 Ebd., S. 203.

Flüssigkeit, die er imaginiert, ist eine »purely imaginary substance.«⁷¹ Das spielt aber keine Rolle, solange das in Analogie erdachte System berechenbar ist.

Dass es bei Maxwells Vorgehen ausschließlich auf eine formale Äquivalenz ankommt und nicht auf die Wiedergabe einer empirischen, zeigt sich auch daran, dass er in einer späteren Arbeit über elektromagnetische Induktion, *On physical Lines of Force* (1861/62), das zuvor imaginierte hydrostatische System, durch eins ersetzt, das mit dem ersten völlig inkompatibel ist.⁷² Und es wäre auch denkbar, dass die von Maxwell erdachten hydrostatischen Systemen überhaupt keine Ähnlichkeit mit den Faraday'schen Feldlinien als empirische Größe verfügen würde. Zum einen, weil empirische Äquivalenz ohnehin keine hinreichende Bedingung für formale Äquivalenz, geschweige denn für formale Identität ist. Zum anderen, weil Maxwells Beweis auf einer anderen Ebene funktioniert. Der Grund dafür ist, dass Analogien zwar durch Äquivalenz initiiert werden können, aber ohnehin nur durch (partielle) Isomorphie bestätigt. Die Bestätigung für die Richtigkeit der analogisch generierten Erkenntnisse, in Maxwells Fall die Formeln, liegt dann in der Übereinstimmung der Folgerungen mit den Tatsachen.

Um Maxwells Vorgehen auf einer formaleren Ebene zu diskutieren, bietet sich das von Carl G. Hempel und Paul Oppenheim entwickelte Modell für wissenschaftliche Erklärungen an.⁷³

Bei wissenschaftlichen Erklärungen handelt es sich demnach um Argumente, die sich aus dem Explanan und dem Explanandum zusammensetzen. Das Explanandum ist die empirische Beschreibung des zu erklärenden Phänomens. Das Explanan ist die Gesamtheit der Prämissen, aus denen deduziert wird. Die Prämissen lassen sich zusätzlich in zwei Kategorien einteilen, in »antecedent conditions and general laws.«⁷⁴ Die *antecedent conditions* sind

71 Ebd., S. 160. Dort heißt es: »The substance here threatened of must not be assumed to possess any of the properties of ordinary fluids except those of freedom of motion and resistance of compression. 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 in which algebraic symbols alone are used.«

72 Vgl. Steinle 2011, S. 476.

73 Carl G. Hempel, Paul Oppenheim [1948]. *Studies in the Logic of Explanation*. In: *Philosophy of Science*, Vol.15 Nr.2 April 1948, S. 135-175.

74 Ebd., S. 136.

die Einzeltatsachen, die ein bestimmtes Phänomen ausmachen bzw. die empirisch gegebenen Bedingungen.

Als Beispiel für ein zu erklärendes Phänomen nennen die beiden Autoren das Steigen des Quecksilbers in der Säule eines Thermometers bei steigender Temperatur. *Antecedent conditions* wären dann etwa, dass das Thermometer eine mit Quecksilber gefüllte Glasröhre ist, die in warmes Wasser getaucht wird.⁷⁵ Diese Gruppe an Aussagen besteht aus allen relevanten Tatsachen als empirische Größen, die relevante Elemente des zu erklärenden Effekts sind. Die zweite Gruppe von Prämissen stellen die *general laws*, mit denen die erste Gruppe beschrieben werden kann. In dem Beispiel sind das etwa die Gesetze zur Wärmeausdehnung und -leitung der beiden Stoffe Glas und Quecksilber.⁷⁶ Diese allgemeinen Gesetze verbinden jetzt das Explanan mit dem Explanandum, indem sie Letzteres erklären. Erklärung meint in diesem Modell die Subsumtion von Ereignissen unter allgemeine Gesetze. Das Erklärungsmodell ist ein deduktives Argument, in dem die Konklusion, also das Explanandum, logisch notwendig aus dem Explanan, den Prämissen, folgt.

Wie alle deduktiven Argumente ist auch das Modell von Hempel und Oppenheim nicht erkenntniserweiternd, weil das Explanandum nicht über das Explanan hinauskommen kann, sonst wäre es eben auch nicht logisch zwingend oder anders formuliert, das Explanan muss das Explanandum enthalten. Deswegen funktioniert das Erklärungsmodell auch über Subsumption, d.h. der Effekt als empirische Größe (Explanandum), wird unter generelle Gesetzmäßigkeiten (Explanan) subsumiert, die den zu erklärenden Effekt durch generelle Prinzipien ausdrücken.

Die Erklärung liegt im Explanan, das die einzelnen empirischen Elemente mit den zugehörigen Gesetzen verbindet. Da es sich um ein formales Modell handelt, lässt sich darüber nachdenken, ob es sich für analogische Erklärungen adaptieren und modifizieren lässt. Das Erklärungsmodell setzt ein kausales Verhältnis zwischen dem Explanan und dem Explanandum voraus, so dass sich das Explanandum mit dem Effekt bzw. der Wirkung und das Explanan mit den Ursachen eines Ereignisses gleichsetzen lässt. Das Explanan umfasst die Ursachen eines Effekts auf zwei Arten. Zum einen als empirische Ursachen, die nur in einem einzelnen, sehr speziellen Fall vorliegen und zum anderen, auf einer höheren Abstraktionsebene, als allgemeine Prinzipien. Das bedeutet, dass jeder empirische Effekt immer nur ein möglicher, von

75 Vgl. ebd.

76 Vgl. ebd.

einer endlich großen Anzahl von potenziellen Realisierungen der allgemeinen Prinzipien ist.

Die einfachste Ausgangssituation für das analogische Erklärungsmodell wäre die, dass es anstelle eines Explanandum zwei gäbe. Also zwei Effekte, von denen nur einer erklärungsbedürftig ist. Denn eine Analogie macht ja nur dann Sinn, wenn von einem Explanandum das vollständige Explanan bekannt ist. Die *antecedent conditions*, also die erste Gruppe der Prämissen, von denen es jetzt notwendig zwei gibt, unterscheiden sich in ihrer empirischen Realisation. Die *general laws*, also die zweite Gruppe der Prämissen, sind – und das wäre das Spezifische von Analogieerklärungen – für beide Phänomene identisch. Diese formale Bestimmung entspricht auch dem bereits diskutierten Stegmüller'schen Analogiemodell.

In Maxwells Analogiekonstruktion ist S die Faraday'schen Feldlinien. S konstituiert sich aus dem Individuenbereich J_1 , also der Menge an Individuen, für die die Gesetze G_1, \dots, G_n gelten. Im konkreten Fall der Maxwell'schen Analogie handelt es sich bei den Gesetzen G_1, \dots, G_n nicht um allgemeine Prinzipien, sondern um mathematische Formeln. Der Unterschied kann aber ignoriert werden, da es formal keine Rolle spielt, ob G_n ein allgemeines Prinzip, ein Naturgesetz oder eine mathematische Formel ist. Für Maxwell ist S nicht vollständig bekannt, was er bestimmen möchte, ist die mathematische Formulierung von J_1 , also G_1, \dots, G_n . Der zweite Individuenbereich J_1^* ist das von Maxwell erdachte, fiktive hydrodynamische System, für das bestimmte Gesetze gelten G_1^*, \dots, G_n^* .

Tatsächlich ist die Analogie von Maxwell sehr besonders, weil er sich J_1^* (hydrodynamische System) erdenkt und G_1^*, \dots, G_n^* zu diesem Zeitpunkt noch unbekannt sind. D.h., Maxwell muss G_1^*, \dots, G_n^* (analytische Gleichungen) zuallererst für J_1^* formulieren.⁷⁷ Der Unterschied von J_1^* zu J_1 ist aber, dass J_1^* ein System beschreibt, das im Gegensatz zu J_1 mit den für Maxwell bekannten mathematischen Mitteln beschrieben werden kann. Im Gegensatz zu Maxwells Vorgehen setzt Stegmüllers Schema dagegen voraus, dass G_i (G_1, \dots, G_n) oder G_i^* (G_1^*, \dots, G_n^*) bereits bekannt sind.

Dahingehend existiert bei Maxwell also noch ein Zwischenschritt, der in Stegmüllers Modell nicht vorgesehen ist. Denn Maxwell entwickelt J_1^* in Analogie zu J_1 zuallererst, um dann in einem zweiten Schritt G_i^* , also die mathematische Beschreibung von J_1^* , zu formulieren. J_1^* muss dabei so beschaf-

77 Tatsächlich ist diese Art komplexerer Analogiebildung für die Wissenschaft wesentlich realistischer als eine auf dem Reißbrett entworfene, formal simple.

fen sein, dass seine mathematische Formulierung G_i^* , »dieselbe syntaktische Struktur oder dieselbe logische Form« wie G_i besitzt. D.h., die Faraday'schen Feldlinien müssen mit derselben mathematischen Formel beschreibbar sein, wie das von Maxwell entworfene hydrodynamische System. Natürlich kann Maxwell nicht wissen, ob das am Ende auch tatsächlich der Fall ist. Allerdings ist die Konstitution von J_i^* so angelegt, dass eine syntaktische Isomorphie wahrscheinlich ist. Denn Maxwell entwickelt J_i^* , indem er empirische Begriffe zueinander in Analogie setzt, die einander als Ereignisse ähnlich erscheinen. Denn syntaktische Isomorphie ist dann gegeben, wenn »man die logischen (einschließlich der mathematischen) Konstanten festhält und nur gewisse (oder sämtliche) deskriptiven oder empirischen Konstanten durch andere ersetzt.«⁷⁸ Die empirischen Konstanten, die von Maxwell durch andere ersetzt bzw. in Analogie zueinander gebracht werden, sind dann etwa die Fließrichtung der Flüssigkeit mit der Verlaufsrichtung der Kraftlinien, die Fließgeschwindigkeit der Flüssigkeit mit der Intensität der Feldlinien, der Druck in den Röhren mit dem elektromagnetischen Potential usw. Was in dem Modell in Analogie gesetzt wird, sind die Begriffe als physikalische Größen.

Ein nomologischer Isomorphismus, zwischen den in Analogie gesetzten Systemen ($S; S^*$), ist nach Stegmüller eine notwendige Bedingung für ein gültiges Erklärungsmodell. Allerdings eine, über die sich durchaus streiten lässt. Denn man kann berechtigterweise fragen, ob sie nicht schon zu restriktiv ist. Die Maxwell'sche Analogie ist der Versuch einer mathematischen Formalisierung empirischer Größen, was bedeutet, dass Maxwell auf einer, ausgehend von der empirischen Ebene physikalischer Phänomene, hohen Abstraktionsebene operiert. Diese formale Strenge trifft man bei Weitem nicht bei allen Analogien in den Naturwissenschaften an. Auch wenn immer erst ex post entschieden werden kann, ob ein syntaktischer oder ein partieller Isomorphismus vorliegt, zeigt sich an Maxwells Analogie für die Faraday'schen Feldlinien sowie an der Entstehung der Undulationstheorie des Lichts, dass die Analogie als Instrument der Hypothesengenerierung berechtigterweise einen hohen Stellenwert hat.

78 Stegmüller 1969, S. 171.