

Die Funktion von Analogien in den Naturwissenschaften, auch in Abgrenzung zu Metaphern und Modellen

Klaus HENTSCHEL ML, Stuttgart

Mit 6 Abbildungen

Zusammenfassung

Diese Einleitung untersucht die verschiedenen Funktionen von Analogien in Wissenschaft, Medizin und Technik. Der Schwerpunkt liegt auf ihrer heuristischen Bedeutung. Die Ergiebigkeit von Analogien ist mit der systematischen Tiefe und Breite der bestehenden Verbindungen verknüpft. Verschiedene Beispiele aus unterschiedlichen Perioden der Wissenschaftsgeschichte werden behandelt, vor allem GALILEO, spätviktorianische Anhänger der Maxwellschen Theorie wie George Francis FITZGERALD und Oliver LODGE, aber auch Heinrich HERTZ und Niels BOHR. Diese Beispiele werden in Hinblick auf die spezifisch verschiedenen beanspruchten Gültigkeitsdauern untersucht. Sie dienen als Beweis oder Gegenbeweis für verschiedene systematische Analogieanalysen, wie sie von verschiedenen Wissenschaftsdenkern, vor allem Francis BACON, John Stuart MILL, Ernst MACH, Harald HØFFDING, Ernest NAGEL, Mary HESSE und Peter ACHINSTEIN unterbreitet wurden. Der analytische Rahmen für die hier unterstützten Analogien ist das, was die Kognitionswissenschaftlerin Dedre GENTNER als *structure-mapping* bezeichnete.

Abstract

This introduction surveys the various functions of analogies in science, medicine and technology. The focus is on their heuristic importance. The productiveness of analogies is linked to the systematic depth and breadth of the established connections. Various examples are presented from different periods in the history of science, most notably GALILEO; such late-Victorian Maxwellians as George Francis FITZGERALD and Oliver LODGE; and Heinrich HERTZ and Niels BOHR. These examples are examined in terms of the specific differing temporal ranges of their claimed validities. They serve as evidence or counterevidence for various systematic analyses of analogies as put forward by various philosophers of science, most notably Francis BACON, John Stuart MILL, Ernst MACH, Harald HØFFDING, Ernest NAGEL, Mary HESSE and Peter ACHINSTEIN. The analytic framework for analogies supported here is what the cognitive scientist Dedre GENTNER has termed *structure-mapping*.

Einleitung

Analogien zählen zu den ältesten Denkformen der Menschheit¹ und erfreuen sich bis heute großer Beliebtheit, sowohl in der Umgangssprache wie auch in literarischen und wissenschaftlichen Diskursen.² Das Wort Analogie leitet sich ab aus der griechischen Vorsilbe ἀνα-

1 Siehe etwa SCHNEIDER 2000 sowie STAHL 1993 über die Nutzung von Analogien in der Archäologie.

2 Für eine knapper gefasste Literaturübersicht siehe HENTSCHEL 2007b, eine Kurzfassung dieses Aufsatzes, die allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern der Tagung in Stuttgart 2008 zur Verfügung gestellt wurde, um die begriffliche und methodische Kohärenz der Beiträge dieses Sammelbandes zu erhöhen. Ferner die Einführung von DURAND-RICHARD in DURAND-RICHARD 2008 sowie die leider auf angelsächsische Literatur beschränkte Bibliographie von GUARINI et al. 2009.

und dem Substantiv *λόγος*. Sowohl das Adjektiv *ἀναλογος* wie auch das Substantiv *ἀναλογία* finden sich erst in der klassischen Zeit, zuerst im pythagoräischen Sinn geometrischer Proportion (A:B analog C:D), seit der Zeit von PLATON auch im übertragenen Sinne.³ Otto REGENBOGEN hielt die Analogie gar für *die* prototypische Forschungsmethode antiker, genauer „voraristotelischer Naturwissenschaft“, die Althilologen Wolfgang SCHADEWALDT und Hermann FRÄNKEL haben die Bedeutung analogischer Denkformen speziell in den Fragmenten der Vorsokratiker herausgearbeitet,⁴ und auch der Doyen der alten Geschichte, Geoffrey LLOYD, hält Analogien neben Polaritäten für eines der Grundmuster antiken Denkens, und zwar sowohl im vorsokratischen Griechenland wie auch im alten China.⁵ Aber auch im Denken des Mittelalters und der frühen Neuzeit finden sich Analogien wie etwa die zwischen Mikrokosmos und Makrokosmos⁶ oder die zwischen belebter und unbelebter Natur⁷ zuhauf. Das *Novum Organon* von Francis BACON, dem wichtigsten Methodologen der frühen Neuzeit und geistigen Paten der Londoner *Royal Society*, hat als Kern eine systematische Erfassung und Tabellierung von Analogien im allgemeinen Sinne von „resemblances and conjugations of things“,⁸ deren Studium für ihn den ersten unentbehrlichen Schritt in Richtung von empirischer Naturwissenschaft darstellte:

“Men’s labour therefore should be turned to the investigation and observation of the resemblances and analogies of things, as well as in wholes as in parts. For these it is which detect the unity of nature, and lay a foundation for the constitution of the sciences.”⁹

Seit der frühen Neuzeit bis heute wurde z. B. der Mensch u. a. mit einer Maschine, mit hydraulischen Systemen, mit einem Computer und mit einem Hologramm verglichen, wobei auffällt, dass die jeweiligen Basisbereiche der zu verschiedenen Zeiten präferierten Analogien immer die avanciertesten Bereiche der jeweiligen Technik waren. Aber auch in der heutigen Natur- und Geisteswissenschaften, Medizin und Technik werden Analogien trotz gelegentlich anzutreffender abschätziger Bemerkungen über die Gefahr „bloßer“ Analogiebetrachtungen quer durch die Disziplinen von der Archäologie bis zu den Biowissenschaften und von der Physik bis zur Sprachwissenschaft nicht nur als eine beliebte Popularisierungsstrategie einge-

3 Zur Begriffsgeschichte von „Analogie“ siehe SZABO 1969, S. 193–221, KLUXEN 1971 sowie IRMSCHER 1988.

4 Siehe SCHADEWALDT 1978, z. B. S. 374, sowie vor ihm bereits FRÄNKEL 1955 zur Heraklitischen Denkform.

5 Siehe REGENBOGEN 1931 bzw. LLOYD 1966, 1968. Zu analogischem Denken im alten China siehe ferner z. B. BODDE 1991, S. 71ff., LO 1995, Patrick FREI in GLOY und BACHMANN 2000 und Alexei VOLKOV in DURAND-RICHARD 2008.

6 Siehe z. B. die Beiträge von BACHMANN, ALBERTINI und GLOY in GLOY und BACHMANN 2000; die Beiträge über „Analogy in Patristic and Medieval Thought“ sowie für die frühe Neuzeit (etwa für HOBBS’ Leviathan) wichtigen „Analogy of the body politic“ im Dictionary of the History of Ideas I, 64–70 (1968); speziell zur Mikrokosmos-Makrokosmos-Analogie: ALLERS 1944, 1994, FEHRENBACH 1996, BÖHME 2002 und hier die Beiträge von Heinz SCHOTT und Reinhard KRÜGER.

7 In der metaphorischen Rede vom „Totbrennen“ des Kalkes finden sich Spuren dieser Analogie bis ins 18. Jahrhundert, in der Alltagssprache z. T. bis heute.

8 Siehe BACON 1620/1979, II, 4 und 10–16 sowie z. B. LEATHERDALE 1974, S. 4–8, zu BACON und S. 9 zur Umsetzung dieses Methodenideals in der botanischen Taxonomie etwa von ADANSON. Für weitere Beispiele personen-orientierten Nachweises der Wirkungsmächtigkeit analogischen Denkens in der frühen Neuzeit siehe etwa STICKER 1969 zu LEIBNIZ sowie Beiträge von Katherine PARK, Lorraine DASTON und Peter GALISON über BACON, GALILEI und DESCARTES in Isis (1984).

9 Beide Zitate aus BACON 1620/1979, II, 27, der ebenda einschränkend ergänzt: “although they [analogies] are of little use for the discovery of forms, they nevertheless are very serviceable in revealing the fabric of the parts of the universe, and anatomizing its members; from which they often lead us along to sublime and noble axioms, especially those which relate to the configuration of the world rather than to simple forms and natures.”

setzt, sondern weiterhin auch als *eine* von vielen Forschungsstrategien.¹⁰ Einer der ersten, der mit einer Vielzahl von Beispielen auf die große heuristische Bedeutung von Analogien in der Forschungspraxis hingewiesen hat, war der Physiker, Physiologe und Philosoph Ernst MACH (1838–1916),¹¹ zugleich Vorreiter einer engen Verbindung von Wissenschaftsgeschichte und -theorie. Mit dem Überhandnehmen formalistischer Ansätze in der Wissenschaftstheorie gerieten diese praxisnahen Einsichten zeitweise in den Hintergrund, aber neue kognitionspsychologische und wissenschaftstheoretische Strömungen haben seit etwa 1995 zu einer neuen Welle des Interesses an schwer formalisierbaren, aber wissenschaftlich dennoch oft außerordentlich fruchtbaren *mental leaps* wie eben auch dem Analogieschluss geführt.¹² Eine der Funktionen dieser Aufsatzsammlung ist die einer Art Zwischenbilanz des Wissensstandes dieses spannenden Forschungsfeldes und der Nachweis von Fruchtbarkeit der in diesem Kontext gewonnenen Einsichten für die Wissenschafts-, Medizin- und Technikgeschichte, welche von den Ergebnissen jener transdisziplinär zwischen Feldern wie Kognitionswissenschaft, Philosophie und Kulturgeschichte weit verstreuten Studien zu Analogien stärker als bislang Gebrauch machen sollten.

Analogien als schillerndes Untersuchungsobjekt

In einem amüsanten Aufsatz über die ambivalente Rolle von Analogien in der Quantentheorie schreibt der zu Provokationen neigende Wissenschaftstheoretiker Mario BUNGE Analogien die Rolle einer „prolific but superficial matron“ zu und konstatiert: „Analogy, like the Indian monkeys, is found in every household and everyone admires its fertility but nobody examines it carefully and no one trusts it.“¹³ Ihrem hohen Verbreitungsgrad in Vergangenheit und Gegenwart korrespondiert allerdings keine ebenso große Klarheit über ihre Definition und Abgrenzung von anderen Formen des Vergleichens und des In-Beziehung-Setzens. Schon John Stuart MILL klagte: „There is no word [...] which is used more loosely, or in a greater variety of senses, than analogy.“¹⁴ Insbesondere herrscht bis heute beträchtliche Verwirrung über die systematische Abgrenzung der Metaphern von Analogien einerseits sowie über die wissenschaftstheoretisch ebenso grundlegende Unterscheidung zwischen Analogien und Modellen andererseits.¹⁵ Leider übergehen auch renommierte Kognitionspsychologen wie etwa Diane F. HALPERN diese Unterscheidungen gerne allzu leichtfertig mit Bemerkungen wie „The English grammatical [gemeint ist: semantic] distinction among analogy, metaphor, and

10 Zur Archäologie siehe WYLIE 1988, STAHL 1993; zur Physik SEELIGER 1947/48, HARRÉ 1988 und TIEMANN 1993 sowie PATY und COMTE in DURAND-RICHARD 2008; zur Chemie VAN'T HOFF 1885, FARBER 1950, SNELDERS 1994 und FRANCOEUR 1997 (letzterer insbesondere zu „materiellen Analogien“, sprich physischen Modellen von Molekülen); zur Biologie CANGUILHEM 1963, BONNER 1963; zur Technik SARLEMUN und KROES 1988; für diese u. v. a. andere Disziplinen von der Medizin über die Mathematik und Philosophie bis zur Philologie siehe diverse Beiträge zu Berichten zur Wissenschaftsgeschichte *J2* (1989) wie auch in diesem Band.

11 Siehe insbesondere MACH 1905/1926, S. 220–231 sowie in diesem Band den Beitrag von Hayo SIEMSEN.

12 Ein Indiz dafür: GENTNER et al. 2001, ferner auch die Publikationen von THAGARD, HOLYOAK und GENTNER sowie DURAND-RICHARD 2008 mit Schwerpunkt auf der Analyse von Verwendung von Analogien in der Geschichte der Mathematik.

13 Siehe BUNGE 1967.

14 MILL 1843/1887, S. 393; vgl. dazu auch WELLER 1970, S. 113.

15 Schon ACHINSTEIN 1964, S. 330f. klagte über die synonyme Verwendung von Analogie und Modell bei so angesehenen Wissenschaftstheoretikern wie Ernest NAGEL, Richard BRAITHWAITE u. v. a.; vgl. z. B. HESSE 1966, ACHINSTEIN 1967, Kap. 7 (Analogies and Models), sowie LEATHERDALE 1974, Kap. 1–2.

simile is not being considered here because it is irrelevant in this context.”¹⁶ Es zeigt sich, dass ein Verzicht auf saubere begriffliche Abgrenzung von Metapher, Analogie und Modell mit einem herben Verlust an Auflösungsschärfe einhergeht. Diesem Manko soll hier durch ausführlich begründete Wortwahl sowie eine Kombination systematischer Betrachtungen und wissenschaftshistorischer Beispiele abgeholfen werden, wobei der Autor die Hoffnung hegt, dass die angedeuteten begrifflichen Abgrenzungen auch auf andere Gebiete übertragbar sind, in denen sowohl Metaphern wie auch Analogien und Modelle eingesetzt werden und in denen eine Vermischung jener drei, miteinander verwandten, aber keinesfalls deckungsgleichen Denkformen allzu nahe liegt. Begonnen werden soll mit einigen begrifflichen Abgrenzungen.

Metaphern und Analogien

Auf den ersten Blick scheinen Metapher und Analogie fast synonym miteinander zu sein. Ob ich (metaphorisch) von der „Blütezeit“ einer Kultur rede, oder eine Analogie zwischen den Wachstumsphasen einer Pflanze und den Entwicklungsphasen einer Kultur behaupte, scheint – zumindest was die dahinterstehende Systematik des Vergleichens betrifft – auf das gleiche hinauszulaufen. Ist ersteres nicht eigentlich eine implizite Form von letzterem? Mit anderen Worten: sind Metaphern nicht so etwas wie unausgepackte Analogien, oder umgekehrt Analogien so etwas wie ausgeführte Metaphern? Tatsächlich hat u. a. Max BLACK (1909–1988) in einflussreichen Beiträgen Metapher und Analogie in genau diesem Sinn aufeinander bezogen,¹⁷ während Charles PERELMAN und ihm folgend die Vertreter der *new rhetoric* die Metapher als eine eingepackte, kondensierte Analogie aufgefasst haben.¹⁸ Die auf ARISTOTELES, CICERO und QUINTILIAN zurückgehende klassische Theorie der Metapher interpretiert diese als einen **verkürzten Vergleich**,¹⁹ und zwar zweifach verkürzt: um die fehlende Vergleichspartikel „wie“ und um den Vergleichsgesichtspunkt. Mit der Übertragung eines fremden Namens auf etwas, dem eigentlich eine andere Bezeichnung zukommt, entsteht – auch im Kontrast zu anderen Tropen wie etwa der Metonymie, Synekdoche oder Ironie, denen kein Vergleich zugrunde liegt – nach dieser Auffassung eine vergleichsvermittelte Bedeutungsübertragung. Dadurch, dass das *tertium comparationis* unerwähnt bleibt, muss jede Metapher vom Leser oder Hörer semantisch erst aufgeschlossen werden (sofern es sich nicht um sogenannte „tote“ Metaphern handelt, deren metaphorischer Charakter aufgrund häufigen Gebrauchs niemandem in der Sprachgemeinschaft mehr bewusst ist). Auf diesen metaphorischen Überschuss bzw. die von der Metapher eingeleitete semantische Interaktion

16 HALPERN 1996, S. 83, in fast gleichem Wortlaut nochmals auf S. 375.

17 Siehe BLACK 1954; reprinted in BLACK 1962, S. 22–47, 259, sowie BLACK 1979, auf S. 31: “every metaphor may be said to mediate an analogy or structural correspondence.” Ohne auf die Qualifikationen in BLACKS Interaktionstheorie der Metapher zu achten, auf die ich später zurückkommen werde, hat darauf bezugnehmend z. B. STEPAN 1986 Metapher und Analogie “interchangeably” als völlig synonym miteinander verwendet (Zitat S. 261); auch HUTTEN 1956, OPPENHEIMER 1956, LLOYD 1966, BERGGREN 1962/63, ROTHBART 1984, S. 61 ff., u. v. a. Autoren trennen nicht scharf genug.

18 Siehe PERELMAN 1969, hier S. 4, 7, sowie PERELMAN und OLBRECHTS-TYTECA 1969/2000, Teil 3, III, §82–88, insbesondere §87.

19 ARISTOTELES Rhet. G4.1406b20–24, sowie 1457b, wo Metaphern als Bezeichnung von etwas mit dem Namen eines anderen, aufgrund der Analogie beider, definiert werden; M. T. CICERO, de orat. III, 157 bzw. M. F. QUINTILIAN: Inst. orat. VIII, 6, 8f. Zu ARISTOTELES’ Theorie der Analogie vgl. ferner HESSE 1965b, KOPPE 1995 sowie Philippe HUNEMAN in DURAND-RICHARD 2008.

zwischen dem sogenannten „Brennpunkt“ der Metapher (in ihrem ursprünglichen Wortfeld) und ihrem durch die übertragene Bedeutung und deren Konnotationen entstehenden weiteren „Rahmen“ heben einige neuere Theorien der Metaphorik ab.²⁰

Douglas BERGGREN formulierte eine regelrechte **Spannungstheorie** (*tension theory*), um diese in metaphorischer Rede vollzogene Überschreitung semantischer Grenzen zwischen Bedeutungsfeldern zu explizieren. Eigentlich begehe man in bzw. mit jeder Metapher einen Selbstwiderspruch (“a significant self-contradiction”), aber dieser sei im Unterschied zu sinnloser oder fehlerhafter Rede bewusst und gezielt eingesetzt sowie begleitet von dem Wissen um den fiktiven Charakter des Ausgesagten. Das subsidiäre Bedeutungsfeld, das durch die Metapher eröffnet wird, reiche ihren Brennpunkt als eigentlichen Gegenstand mit neuen Bedeutungsschichten an und wirke dadurch wie ein WahrnehmungsfILTER, der die Aufmerksamkeit auf neue Aspekte dieses Brennpunktes lenke und zu einer Art stereoskopischer Sicht auf diesen Gegenstand führe, das nun aus zwei verschiedenen Perspektiven auf einmal gesehen werden könne.²¹ Ein gutes Beispiel dafür wäre die in der frühen Neuzeit vielbenutzte Metapher vom Buch der Natur, das in mathematischen Lettern geschrieben ist: Statt einem bloß-kontemplativen Betrachten der Natur wird hier eine neue „Lesart“ der Natur nahegelegt, die jenseits der Oberflächenerscheinungen nach (abstrakten) Strukturen sucht und zu angestrengtem „Lesen“ auffordert.

Auf genau solche semantische Reorganisation hebt die von den Linguisten Samuel R. LEVIN (1917–2010), Eva Feder KITTAY und Adrienne LEHRER entwickelte Theorie der Metapher als **Transfer semantischer Felder** ab.²² In Metaphern, so ihre These, die ich weit überzeugender finde als die beiden erstgenannten Theorien, werden Bedeutungsschichten von einem sekundären Vergleichsbereich S' auf einen primär interessierenden Zielbereich S übertragen, so etwa wenn man – wie DESCARTES, LA METTRIE und andere Anhänger des mechanistischen Weltbildes – den menschlichen Körper mit einer Maschine oder mit einer Uhr vergleicht.²³ Das semantische Feld des Zielbereichs S, hier der Mensch mit all seinen typischen Attributen, würde durch diese Metapher um eine Reihe ganz untypischer Attribute erweitert, die einem mit dem ersten unverträglichen semantischen Kontrastfeld S', nämlich dem des unbelebten, speziell des Maschinellen, zugeordnet wären. Mit dieser Übertragung semantischer Eigenschaften (*feature transfer*) sei nicht nur eine (in diesem Falle zumindest in der frühen Neuzeit ungeheure) Provokation verbunden, sondern zumindest potentiell immer auch ein Erkenntnisgewinn, nämlich dann, wenn es sich als fruchtbar erweist, das Arbeiten des menschlichen Körpers oder Geistes mit dem Funktionieren einer Maschine zu vergleichen.²⁴ Der Sprachphilosoph Daniel ROTHBART hat diese semantische Transfertheorie der Metapher durch Un-

20 Siehe z. B. BERGGREN 1962/63, BLACK 1954, 1979, LEATHERDALE 1974, S. 1ff., TOURANGEAU und STEINBERG 1981 sowie KOPPE 1995 für weitere Nachweise.

21 Siehe BERGGREN 1962/63, insbesondere S. 240–244, zum *metaphorical sort-crossing* und zum dadurch erreichten *plurisignificative sign focus*. In die gleiche Richtung gehen Mark TURNERS Überlegungen zum *conceptual blending*.

22 Zum folgenden siehe LEVIN 1977, KITTAY und LEHRER 1981 sowie ROTHBART 1984; ein historisches Beispiel in GRUBER 1980.

23 Für Hinweise auf Primärliteratur und weitergehende Analysen dieser Uhren- und Maschinenmetapher sowie der damit konnotierten metaphorischen Felder siehe z. B. LAUDAN 1966, McREYNOLDS 1978.

24 Dieses Beispiel ist auch deswegen so gut, weil es zeigt, wie dieser durch die Uhren-Metapher angeschobene Transfer sehr auf der Oberfläche bleibt, ohne mit einem Transfer ganzer Relationsnetze oder weitergehender Aussagen verbunden werden zu können. Es machte (und macht bis heute) keinen Sinn, nach weitergehenden Entsprechungen etwa des Ineinandergreifens der Zahnräder oder der Unruhe der Uhr im menschlichen Gehirn zu suchen und einschlägige Konnotationen wie das „richtig-ticken“ oder das „aufziehen“ sind als konzeptuelle Metapher Teil eines breiten, aber diffusen „metaphorischen Feldes“, wie Lutz KASPER in seinem Beitrag ausführt.

terscheidung von vier verschiedenen Typen semantischer Übertragung weiter ausgebaut: in Metaphern könne das semantische Feld des Zielbereiches entweder durch einzelne Attribute erweitert werden (*constant conjoining transfer*), oder einzelne Attribute des Zielbereiches würden durch den Vergleichsbereich ersetzt (*constant replacing transfer*), wie etwa in der metaphorischen Redewendung, dass mein Computer nach einer „Krankheit“ wieder „gesund“ sei. Der semantische Konflikt, dass etwas nicht zugleich belebt und unbelebt sein könne, und etwas unbelebtes niemals gesund oder krank sein kann, wird dadurch aufgelöst, dass dem Computer – wenn hier auch nur spielerisch – eine Art „Leben“ zugebilligt werden muss. Statt einzelnen zeitlich konstanten Attributen könnten in Metaphern ferner auch Variablen in dieser doppelten Weise transferiert werden.²⁵ Einige Fachtermini der Wissenschaft werden durch eine solche stipulative, gleichwohl metaphorische Übertragung kreiert, so etwa in der Astrophysik die Rede von „Weißen Zwergen“ als prägnante Bezeichnung von hellleuchtenden, aber relativ zu anderen sehr kleinen Sternen, oder „Schwarze Löcher“ als Singularitäten in der Raumzeit, der nicht einmal Licht mehr zu entkommen vermag. Viele Fachausdrücke der Wissenschaften sind auf diese Weise als von Anfang an tote Metaphern entstanden, während andere, etwa die der chemischen Affinität, anfangs sehr wohl echte Metaphern gewesen seien, die erst allmählich in einem langsamen Gewöhnungsprozess nicht mehr als solche erkennbar seien.²⁶ In genau jenem semantischen Informationsgewinn aus der Anreicherung des Zielbereiches mit semantischen Attributen oder Variablen des Vergleichsbereiches besteht für die Anhänger der semantischen Transfertheorie auch die kreative Leistung von Metaphern in der Wissenschaft, welche inzwischen von niemandem mehr ernsthaft bestritten wird.

Auf den ersten Blick hat die Auffassung von Metaphern als semantischem Transfer einiges für sich, doch hat schon in den 1960er Jahren Max BLACK darauf hingewiesen, dass beim Gebrauch von Metaphern mehr passiert als nur ein einseitig gerichteter Übertrag von Attributen durch Vergleich von *explanans* und *explanandum*. Deshalb vertrat BLACK eine andere Auffassung der Metapher, die sogenannte **Interaktionstheorie**.²⁷ Ihm zufolge findet bei jeder „guten“ Metapher ein Prozess wechselseitiger Assimilation von sekundärem und primärem Bereich statt, an dessen Ende sich unsere Sicht von beiden Bereichen geändert hat: nicht nur unsere Wahrnehmung des Menschen als wolfsähnlich, sondern auch umgekehrt die des Wolfes als menschenähnlicher. Deshalb seien, so BLACK weiter, Metaphern keine einseitig gerichteten Vergleiche, sondern wechselseitig angelegt. So richtig BLACKS Hinweis auf die Existenz einer Rückkopplung einer Metapher von „*x* als *y*“ vom Primärbereich *x* auf den Sekundärbereich *y* ist, so sehr zeigt doch gerade die für BLACK so wichtige Kommunikationssituation, in die Metaphern jeweils eingebettet sind, dass es für die Metaphern-verwendenden Sprecher (oder Schreiber) eben *nicht* auf die nähere Beleuchtung von *y*, sondern nur auf den Primärbereich *x* ankommt. Sie reden (oder schreiben) von *x* und illustrieren dies neben

Jenen metaphorischen Modellierungs-Angeboten frühneuzeitlicher Mechanisten blieb heuristische Fruchtbarkeit weitgehend versagt. Für eine ausgeführte Analyse siehe hier den Beitrag von Peter FRIEBE über BOYLE.

25 Zu den Einzelheiten und ihrer Formalisierung siehe ROTHBART 1984, S. 599ff., der auch schon erkannt hat, dass „recipient and donor semantic field must be incongruous [but must] share fundamental and ontological precepts“ (S. 613), da ihre Verbindung sonst nicht zu kohärenten Konzepten führen kann.

26 Siehe nochmals ROTHBART 1984, S. 608f. zu dieser *aggramatization* sowie z. B. RANDALL 2005 für viele weitere Beispiele für Metaphern in der Sprache der Physik. Der Versuch von JONES 1982, die ganze Physik als Metapher zu interpretieren, mit Raum, Zeit, Materie und Zahl als „kardinalen Metaphern“, wird von ROTHBART 1984, S. 614, zu Recht als Beispiel für eine *metaphoric inflation* angeprangert, welche seither leider noch zugenommen hat.

27 Neben den bereits weiter oben genannten Texten von BLACK empfehle ich als eine sehr klare Analyse der Black-schen Interaktionstheorie (auch im Hinblick auf deren wissenschaftstheoretischen Nutzen) HESSE 1965a.

anderen Stilmitteln auch durch die eine oder andere Metapher, (wie oben schon gezeigt) häufig auch durch Metaphern aus verschiedenen Sekundärfeldern y . Eindeutiger Bezugspunkt bei dieser Verwendung bleibt – im wissenschaftlichen Diskurs ebenso wie in den meisten umgangssprachlichen Verwendungen, vielleicht nicht so sehr im literarischen Kontext – das Primärfeld x . Metaphern sind (im Unterschied zu Analogien) asymmetrisch.²⁸

Wenn Joseph John THOMSON (1856–1940) nach der Jahrhundertwende vom *plum pudding model* des Atoms redete, dann war der Sinn dieser Metapher nicht etwa, neues über Früchtepuddings auszusagen, sondern anzudeuten, dass er sich die Verteilung negativer Ladungen im Atom so vorstellte, wie die von Früchten in einem kontinuierlichen Teig, also einer im gesamten Raum ausgeschmierten positiven Ladung. Dass für das gleiche Modell im deutschen die Variante „Rosinenkuchenmodell“ gebräuchlicher ist, zeigt übrigens auch, wie wenig es hier auf den Sekundärbereich dieser Metapher ankommt. Die in der Kosmologie der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts aufkommende Rede von einem „Seifenblasen-Universum“ will nur ein *simile* für großräumige Massenverteilungen bieten, und auch John Archibald WHEELERS Metapher von *quantum foams* (1955) ist ein unausgepacktes *simile*, mit dem Fluktuationen der Raum-Zeit-Struktur in sehr kleinen Dimensionen der unvorstellbar kleinen Größenordnung $\sim 10^{-35}$ m angedeutet werden sollen. Demgegenüber ist z. B. die Rede des Entomologen William Morton WHEELER (1865–1937) von der Ameisenkolonie als einem Organismus – obwohl scheinbar genauso weithergeholt und genauso überraschend – mehr als eine bloße Metapher, sondern eine verblüffend gut funktionierende, allerdings soziobiologisch sehr gefährlich mißbrauchbare Analogie.²⁹ Worin besteht nun also der genaue Unterschied zur Analogie?

Zur Abgrenzung von Metapher und Analogie

Wenn man sich der gängigen Deutung von Metaphern als einer vergleichsvermittelten Bedeutungsübertragung³⁰ oder auch der semantischen Transfertheorie der Metapher anschließt und im Kontrast dazu die traditionelle Deutung von Analogien als Ausdruck einer strukturellen oder funktionellen Ähnlichkeitsrelation³¹ vor Augen hat, scheinen Metaphern und Analogien in eben jener überraschenden In-Beziehung-Setzung zweier ganz verschiedener semantischer Felder einander sehr ähnlich zu sein. Auch die Wortherkunft von „Metapher“ scheint dies zu bestätigen, denn μεταφέρειν bedeutet im griechischen „hinübertragen“, „überführen“, „übertragen“ oder „verschieben“.³² In diesem Sinne wären also die Wellenmetaphorik der Akustik

28 In ihrem neuesten Aufsatz erwähnen GENTNER und COLHOUN 2009, S. 4, experimentelle Ergebnisse, denen zufolge in den ersten 600 Millisekunden „participants found forward and reversed metaphors equally comprehensible“, aber danach setzen doch stark asymmetrische Effekte ein, die beispielsweise die beiden Sätze: „my butcher is like a surgeon“ und „my surgeon is like a butcher“ sehr deutlich voneinander unterscheiden!

29 Siehe zu der verblüffenden Wirkung dieser Analogie WHEELERS, BONNER 1963, S. 275; zum Ausbau dieser Analogie dann u. a. die Arbeiten der Soziobiologen A. E. EMERSON, C. R. HASKINS und E. O. WILSON.

30 Diese Meinung vertritt HESSE 1965b unter Rückgriff auf die Aristotelische Theorie der Metapher.

31 In diesem Sinne beispielsweise der Beitrag über „Analogie“ in der Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie, Bd. 1, S. 98–99, sowie Oxford English Dictionary, 2. Aufl., Bd. 1, S. 432 (1989), dort insbesondere die Wortbedeutungen 3 – 4; auch die ursprüngliche griechische Bedeutung von *ἀναλογία* verweist auf die Übereinstimmung von Relationen bzw. Proportionen zwischen zwei Vergleichsobjekten (A:B wie C:D). (Ebenda, Bed. 1.) Zu diesem Wortursprung von Analogie als geometrischer Proportion in der griechischen Mathematik siehe detailliert SZABÓ 1969, S. 193–221, sowie IRMSCHER 1988.

32 Siehe z. B. KOPPE 1995 sowie GLOY in GLOY und BACHMANN 2000, S. 265.

oder die Strom- und Teilchenmetaphorik der Elektrodynamik nur Bedeutungsverschiebungen aus den anschaulichen Erfahrungsbereichen der klassischen Mechanik makroskopischer Körper in nicht mehr sichtbare Gegenstandsbereiche hinein. Gleichsam „aus Verlegenheit“ würden diese abstrakten Prozesse mit Bezeichnungen aus den besser vertrauten sichtbaren Erfahrungskontexten belegt, als „anschauliche *Katachresen* für unanschauliche Zusammenhänge“.³³

„Auf den zweiten Blick“ (auch dieses eine Metapher, von deren unsere Sprache geradezu „durchtränkt“ ist – dabei gleich noch eine Metapher „auf dem Fuße“ folgend) bestehen aber wichtige Unterschiede zwischen Metapher und Analogie, die es meines Erachtens rechtfertigen, ja sogar notwendig machen, eine kategoriale Unterscheidung beider vorzunehmen. Auch wenn es vielleicht Grenzfälle geben wird, die eine eindeutige Zuordnung schwermachen, sollte dies nicht darüber hinwegtäuschen, dass aufgrund der gleich zu erläuternden Merkmale im allgemeinen recht gut entscheidbar ist, ob ein sprachlicher Vergleich *nur* eine Metapher oder *schon* eine Analogie ist. Die in diesem Beiwörtern „nur“ und „schon“ angedeutete Abstufung ist, so behaupte ich, die einer Stufenfolge von einfachem, gewissermaßen harmlosen und nicht weiter belastbaren verkürzten *simile* über die Analogie als einem komplexen Vergleich mit mehrstufigen, belastbaren Ähnlichkeitsrelationen hin zu einem voll ausgebautem Modell als letzter und komplexester Stufe. Damit kommen wir zu folgender schematischer Abgrenzung (Abb. 1).

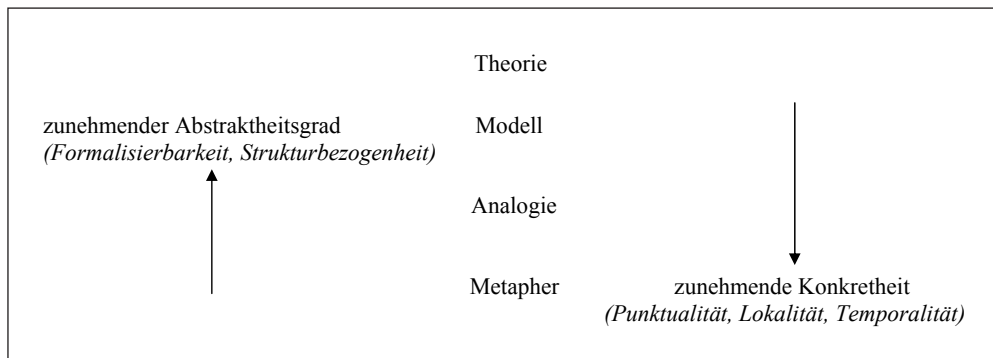


Abb. 1 Schematische Abgrenzung von Theorie, Modell, Analogie und Metapher in Hinsicht auf Abstraktionsgrad bzw. Objekteigenschaftsbezogenheit

Man beachte, dass die vertikale Richtung keine Relation der Inklusion darstellen sollen: zwar sind sowohl Analogien wie auch Metaphern Formen des Vergleichens, aber nicht alle Metaphern sind auch Analogien (oder umgekehrt) und nicht alle Analogien sind Modelle. Wir werden im Folgenden sehen, wie dieses einfache Schema neben dieser ersten Dimension von Abstraktheit bzw. Objekteigenschaftsbezogenheit noch durch etliche weitere Dimensionen angereichert werden kann, die diese Grundunterscheidung allesamt stützen. Umgangssprachliche und auch literarische Diskurse erreichen die Stufe eines „Modells“ meist gar nicht, weshalb in literaturwissenschaftlichem Kontext auch zumeist nur Analogien und Metaphern thematisiert und oft genug vermengt werden. Demgegenüber werden hier vorwiegend natur-

³³ Siehe in diesem Sinne HESSE 1966 sowie diese referierend KOPPE 1995, Zitat S. 869; vgl. hier in diesem Band die Beiträge von LUTZ KASPER und CHRISTOPH HUBIG.

wissenschaftliche Beispiele herangezogen, um die drei Stufen zu exemplifizieren und dabei auch systematisch klar voneinander abzugrenzen. Die zwischen Metapher, Analogie und Modell kategorial unterscheidenden Wesensmerkmale (im Sinne der Aristotelischen *differentia specifica*), welche ich nun nacheinander besprechen werde, sind solche der zeitlichen Reichweite, der Tiefe und der Richtung des Vergleichens.

Zeitliche Reichweite

Metaphern sind (im besten Falle) geistvolle, aber eher für den Augenblick, die spezifische Sprechsituation bzw. den jeweiligen Kontext des Textes konzipierte Stilmittel. „Metaphors profess their inconstancy“, schrieb Thomas HOBBS (1588–1679) in seinem *Leviathan*.³⁴ Metaphern kommen einem „begnadeten“ Redner „über die Lippen“ und bieten sich dem Schreiber gleichsam als „verzierende Schnörkel“ seines Textes an, ohne dass sie über diese momentgebundene Wirkung hinaus einen Langzeiteffekt haben oder haben sollen. Es sind feinsinnige *minutiae* des Denkens, Gedanken-„splitter“, „kalkulierte Absurditäten“.³⁵ Ihr korrekter Einsatz bedarf der ständigen Kontrolle, insbesondere zur Kompatibilität mit anderen Metaphern, wie sie kurz zuvor eingesetzt wurden oder kurz danach verwendet werden sollen. In dem unaufmerksamen „Mischen“ von Metaphern besteht eine der „Todsünden“ des Schreibens und Vortragens, die einem früher auf guten Schulen noch „ausgetrieben“ wurde, während in heutigen Gebrauchstexten eine veritable „Inflation“ von Metaphern zu konstatieren ist, die trotz ihrer häufigen Inkompatibilität miteinander keinen mehr so recht zu stören scheint, vielleicht auch deshalb, weil die Ubiquität von Metaphern deren Vorhandensein bzw. deren Verwendung kaum mehr bewusst macht.³⁶ Schon dieser unsystematische, erratische Einsatz von Metaphern in wissenschaftlichen Texten ebenso wie in der Umgangssprache, in der sie oft in breiten „metaphorischen Feldern“ auftreten,³⁷ statt gezielt und bewusst eingesetzt zu werden, zeigt ihren markanten Unterschied von Analogien, deren Einsatz zumindest in wissenschaftlichen Texten sehr viel überlegter und systematischer erfolgt.

Spontaneität versus Systematizität

Genau in diesem vereinzelnden, partikulär-bleibenden Einsatz besteht meines Erachtens das Wesen der Metapher und die Basis ihrer kategorialen Abgrenzbarkeit von Analogien und Modellen. Der in der Metapher steckende Vergleich, die In-Relation-Setzung zweier Themen, bleibt „parasitär“ zum laufenden Diskurs, mehr oder weniger zufällig bestimmt durch die Visualität und Sprachwelt, vielleicht auch das momentane sprachliche Umfeld und den sonstigen Hintergrund des jeweiligen Autors. Diese häufig eher unbewusste Steuerung in der Wahl

34 In der von C. B. MACPHERSON 1968 bei Penguin herausgegebenen Ausgabe auf S. 110; deshalb zählte HOBBS Metaphern kategorisch unter die „abuses of speech“, ohne allerdings selbst auf sie zu verzichten!

35 Diesen letzten, wie ich finde außerordentlich treffenden Ausdruck hat Christian STRUB 1991 geprägt, der im Anschluss an Hans BLUMENBERGS Metaphorologie den Versuch einer „historisch reflektierten sprachanalytischen Metaphorologie“ vorgelegt hat. Andere Deutungen geben Nelson GOODMAN (*moonlighting*), Donald DAVIDSON (*day dreaming*), BEARDSLEY (*a poem in miniature*), Sol WORTH (*caricature*), FAUCONNIER und TURNER 2008 (*blending*); zur Multidimensionalität von Metaphern RADMAN 1991 und die dort bzw. in WEINRICH 1983 zitiert weiterführenden Texte.

36 In *submerged metaphors* sieht BERGGREN 1962/63, S. 456, die größte Gefahr für mißbräuchliche Verwendung.

37 Ein interessantes Beispiel für die These „Metaphors do come in groups“ gibt GRUBER 1980 anhand von DARWINS Verwendung von Metaphern wie „contrivance, tangled bank, branching tree, war, wedging, selection“.

und Abfolge von Metaphern hat vielfach Anlass zu Versuchen psychoanalytischer Deutungen jener Textschicht gegeben, die allerdings in der Mehrzahl der Fälle wenig überzeugend bleiben, weil es stets viele mögliche Gründe für die Metaphernwahl gibt und oft auch mehrere Metaphern parallel zueinander benutzt werden.³⁸ Der amerikanische Kognitionslinguist George LAKOFF (*1941) hat freilich die Auffassung vertreten, dass die Wahl mancher Metaphern, speziell der sogenannten „konzeptionellen Metaphern“, sehr wohl auf ein dahinter stehendes Denkmodell schließen lasse: so zeige eine verstärkte Wahl militärischer Metaphern an, dass sich der Sprecher in einem mental-emotionalen „Kriegszustand“ befinde, während umgekehrt die bevorzugte Wahl von Familienmetaphern Harmoniebedürfnis signalisiere – beides Phänomene, die er an vielen interessanten Beispielen aus Politik und Alltagswelt nachgewiesen und untersucht hat.³⁹ Während sich für HOBBS, John LOCKE u. v. a. damit massive Kritik an den Metaphern als „loose figures of speech“ verband, bewerten andere dieses nomadenhafte der Metaphern äußerst positiv und machen es z. T. sogar zu ihrem einzigen Wesensmerkmal,⁴⁰ weil dadurch Bedeutungen zwischen verschiedenen Kontexten „wandern“ können und Wissen sich durch metaphorischen Sprachgebrauch fortentwickelt. In diesem Band verfolgt insbesondere der Beitrag von Lutz KASPER diese Lakoffsche Perspektive auf „metaphorische Konzeptualisierungen“ physikalischer Wissensfeldern weiter.

Dennoch funktionieren Analogien – zumindest idealtypisch – anders als Metaphern, selbst wenn man konzeptuelle Metaphern mit LAKOFF und Mark JOHNSON oder Sabine MAASEN und Peter WEINGART als nicht-hinterfragbare, Denkform-bestimmende Elemente des Diskurses aufzuwerten bereit ist. Mit der Aufstellung einer Analogie verbinden sich zeitlich wie auch systematisch weiterreichende Behauptungen und Absichten. Ich bediene mich einer Analogie nicht nur zur Verdeutlichung oder Ausschmückung eines einzelnen „Punktes“ in meiner Argumentation und auch nicht im Sinne eines Trojanischen Pferdes wie etwa die verführerische Holismus-Metapher in präfaschistoiden Texten,⁴¹ sondern weil ich weitergehende Absichten damit verfolge, die meinen Argumentationsgang für längere Zeit (mit)bestimmen werden und in der jeweils vorgebrachten Analogie offen zum Ausdruck gebracht werden. Insofern reklamiere ich für Analogien größere zeitliche Reichweite, sowohl bezogen auf ihre Präsenz im jeweiligen Diskurs wie auch auf die Geltungsdauer dieser Analogie, die nicht nur für den Moment konzipiert wurde, sondern Anspruch auf längeres Bedachtwerden erhebt. An dieser Stelle ist es dann auch wichtig, darauf hinzuweisen, dass viele Analogien – in den Naturwissenschaften wie auch im Alltagsgebrauch und in der Literatur – keineswegs mit dem Anspruch auf absolute und unbedingte Geltung vorgetragen werden, sondern typischerweise in der Manier eines unverbindlichen Vorschlags: wie etwas auch sein *könnte*, womit sich X *vielleicht* auch vergleichen ließe, oder was Y *eventuell* auch ähneln könnte. Dieses konjunktivisch-hypothetische der Analogie ist wichtig, weil der darin angedeutete Freiraum des Denkens genau der ist, in dem neue Theorieentwürfe, neue Denkansätze und neue Formen des Sehens wissenschaftlicher Objekte als etwas ande-

38 Ein typisches Beispiel sind die umstrittenen Versuche der Deutung langer Wortlisten unklarer Funktion in LEONARDO DA VINCI'S *Codex Trivulzianus* durch STITES 1970 oder der bevorzugten Metaphern von SHAKESPEARE durch SPURGEON 1935. FISCHER 1970, S. 245, empfiehlt deshalb als Rezept gegen irreführende Verwendung von Metaphern ihre Bewusstmachung und ihren kontrollierten Einsatz.

39 Siehe für interessante Beispiele insbesondere aus der US-amerikanischen Politik LAKOFF und JOHNSON 1980, insbesondere S. 473f., zur Abgrenzung idiosynkratischer (unsystematischer) von konventionellen (systematischen) Metaphern.

40 So etwa die Wissenschaftssoziologen Sabine MAASEN und Peter WEINGART 2000, S. 3f., 20f.; vgl. auch S. 27.

41 Siehe dazu HARRINGTON 1995 und die dort genannte Primärliteratur.

res denn gemeinhin gesehen sich entfalten können, ohne gleich mit dem Verweis auf das „offensichtliche“ Anderssein der Wirklichkeit abgetötet zu werden. Darum waren (und sind noch immer) Analogien mit die wichtigsten Vehikel des Neuen in den Wissenschaften; heuristische Verfahren der Wissenserweiterung auf der Basis von Bekanntem. Wie diese Übertragung im Einzelnen funktioniert, wird im nächsten Abschnitt noch näher besprochen – zunächst noch weiter zum Unterschied von Analogien und Modellen im Hinblick auf ihre zeitliche Geltungsdauer.

Aus den gelungensten Analogien, die ihren Ursprung wissenspsychologisch betrachtet übrigens durchaus auch in spontanen Metaphern haben können, was von Kognitionspsychologen und Linguisten einmal näher zu untersuchen wäre, werden durch weitere „Vertiefung“ und „Andockung“ theoretischen Wissens in der obersten hier betrachteten Stufe der Wissensorganisation dann veritable Modelle,⁴² wie ich sie weiter unten an Beispielen von MAXWELL, HERTZ und BOHR diskutieren werde. Kennzeichen dieser Modelle ist u. a., dass sie als Modelle von der *scientific community* wahrgenommen und für längere Zeit diskutiert werden. Wie der „Fortschritt“ der Wissenschaften es will (auch dies eine aus dem zeremoniellen Hofwesen stammende Metapher,⁴³ allerdings eine von ungeheurer Wirkungsmächtigkeit), werden die allermeisten davon früher oder später wieder durch neue, andere Modelle abgelöst und „ad acta“ gelegt. Aber festzuhalten bleibt, dass historisch gesehen viele Modelle die Gemüter der Naturforscher für eine ganze Zeit beweg(t)en, womit schon rein faktisch ein höherer Geltungsanspruch und eine längere zeitliche Reichweite ihrer Wirkung belegt ist, ganz unabhängig davon, wie man wissenschaftstheoretisch zu ihrer normativen Geltungskraft stehen mag. Ich selbst bin dezidiert Anhänger einer naturalisierten Epistemologie, wonach es nicht Sinn und Zweck von Wissenschaftsgeschichte und Wissenschaftsforschung sein kann, selbst normative Aussagen über die Geltung oder Nichtgeltung solcher Modelle zu treffen, sondern nur retrospektiv-beschreibend die jeweilige historische Geltungskraft solcher Modelle zu erfassen und die Gründe dieser so unterschiedlich langen Wirkmächtigkeit zu verstehen. Wie sich im nächsten Abschnitt zeigen wird, hängen diese Gründe aufs engste zusammen mit der unterschiedlichen Tiefe und Relationsdichte dieser Modelle.

Tiefe

Wie die obigen Betrachtungen zur hohen Wahlfreiheit bei der Selektion von Metaphern sowohl in Gebrauchstexten wie auch in wissenschaftlichen Quellen gezeigt haben, sind Metaphern sprachliche Instrumente zur punktuellen Verdeutlichung, zur „Ausschmückung kleiner Flächen“, um schon wieder „in einem Bilde“ zu reden. Diese Metaphern fallen einem oft erst während des Schreibens bzw. während der freien Rede ein. Ihre Sequenz mag allenfalls einer assoziativen Logik geschuldet sein, die eben auch das Nachwirken einer Metapher auf die ein oder zwei nächstfolgenden erklären mag, wie sie des Öfteren in Texten nachweisbar ist (siehe oben die beiden mit geschweifter Klammer hervorgehobenen Beispiele). Abgesehen von dieser paarweisen Verkettung, die Metaphern den Markow-Ketten analog macht (hier eine Analogie, keine Metapher!) unterliegen die Abfolgen von Metaphern zumindest in naturwissenschaftlichen,

42 Zur historischen Genese dieses Konzepts siehe JAMMER 1965, MÜLLER 1983 sowie STACHOWIAK 1983.

43 Laut Oxford English Dictionary, 2. Aufl., Bd. 12 (1989), S. 592–593, bedeutete *progress* ursprünglich „a state journey made by a royal or noble personage, or by a church dignitary“. Aus diesen offiziellen, zeremoniellen Rundreisen abgeleitet wurde es dann im schon übertragenen Sinne synonym für das Reisen an sich benutzt und daraus wiederum durch metaphorische Erweiterung abgeleitet, erschließt sich auch das Fortschreiten im Sinne des Erreichens immer höherer Ziele: OED, Wortbedeutungen 1 – 2; 3 bzw. 4.

medizinischen und technischen Gebrauchstexten aber typischerweise keiner übergeordneten Gesetzmäßigkeit – ein(e) Autor(in) wird sich ganz verschiedener Metaphern aus ganz verschiedenen Bereichen bedienen, um das Argument zu stützen, ohne dass diese Bereiche miteinander etwas zu tun haben müssen. Die von Metaphern eines Textes aufgemachten Beziehungsräume haben keine miteinander vernetzte Struktur, sondern sie bleiben untereinander unverbunden, um nochmals ein vielleicht hilfreiches Bild zu konstruieren. Warum sind solche Metaphern trotzdem hilfreich? Eben weil sie eine zusätzliche Dimension eröffnen, ein Bild, ein Gleichnis, das, wenn es gut gewählt ist, genau das vor Augen führt, um das es an jener Stelle eigentlich geht. Über diese lokal begrenzte Wirkung hinaus haben Metaphern in naturwissenschaftlichen Texten – anders als in literarischen – normalerweise keine systematische, übergeordnete Funktion für das Ganze, auch wenn durch die Metaphorik eines Autors bei sorgfältiger Auswahl insgesamt sehr wohl eine gewisse Akzentuierung des Gesamteindrucks erfolgen kann. Sofern eine Metapher über ein längeres Textstück hinweg „ausgebaut“ wird, wird aus ihr eine Allegorie.⁴⁴ Eine launige Metapher, wie z. B. die Bezeichnung einer Person X als ein „Partylöwe“, gibt nicht viel her bezüglich der Übertragbarkeit der Attribute eines Löwen auf die Attribute von X: vielleicht soll es heißen, dass X ähnlich selbstsicher und dominant ist, vielleicht aber auch nur, dass X ähnlich faul ist und nur, wenn’s ums Fressen und andere körperlich vordringliche Angelegenheiten geht, in die Gänge kommt ... Wie auch immer: die Liste der sinnvoll übertragbaren Attribute wird recht klein bleiben und die systematische Reichweite dieses Vergleichs der Person X mit einem Löwen somit gering. Ganz anders liegt die Sache bei Analogien.

Die Strukturtransfer-Theorie der Analogie

So verschieden auch die Motive für die Einführung von Analogien sein mögen: sofern es sich bei ihnen überhaupt um Analogien handelt, steckt mehr dahinter als nur ein lokales, quasi-punktuell *simile*, wie es viele Metaphern kennzeichnet. Den tiefen strukturellen Unterschied zwischen Metapher und Analogie erfasste schon 1874 W. Stanley JEVONS: “analogy denotes a resemblance not between things, but between the relations of things.”⁴⁵ Auch der dänische Philosoph Harald HØFFDING (1843–1931) grenzte 1905 Analogien von Metaphern in gleicher Weise ab; zwar benutzen beide Ähnlichkeitsbetrachtungen (*likenesses*), aber bei Analogien sind dies Ähnlichkeiten zwischen Relationen, nicht zwischen vereinzelt Eigenschaften.⁴⁶ Mit jeder Analogie, die diesen Namen verdient, werden also weiterreichende Netze von Beziehungen zwischen zwei verschiedenen Gegenstandsbereichen oder -objekten behauptet, dem **Quell-** oder **Basisbereich B** und dem **Ziel-** oder **Targetbereich Z**⁴⁷: „B ist analog Z“ behauptet das Vorhandensein *etlicher* gleicher oder übertragbarer Eigenschaften von B und Z *und* ähnliche Beziehungen *zwischen* den Attributen von B und denen von Z.

44 Die klassische Belegstelle der Rhetorik dazu ist QUINTILIAN: Inst. orat. VIII, 6, 44, sowie HORAZ: Carm. I, 14; über größer angelegte Bildfelder und -reihen in französischen Novellen bzw. Predigten von John DONNE, analysiert bei ULLMANN 1960 bzw. SCHLEINER 1970, siehe WEINRICH 1983, Sp. 1186.

45 JEVONS 1920, S. 627; LEATHERDALE 1974, S. 4, führt den nicht sehr gebräuchlichen Unterschied zwischen *manifest analogies* im Sinne der Übertragung von Eigenschaften zwischen Objekten und *imported analogies* im Sinne von formalen Struktur analogien ein, der hier nicht übernommen wird.

46 HØFFDING 1905, S. 200: “Analogy is likeness of the relations of different objects, not likeness of single qualities.”

47 Siehe zu dieser Terminologie z. B. GENTNER 1983, darauf aufbauend HOLYOAK und THAGARD 1989. PERELMAN 1969, S. 4, bzw. 2000, S. 373, spricht hingegen von der Basis, die dem *secondary system* von BLACK und HESSE entspricht, als *phoros* und vom Zielbereich [dem *primary system* BLACKS entsprechend] als *thème*.

Mit anderen Worten: eine Analogie zwischen B und Z geht über den punktuellen Vergleich einzelner Attribute (wie sie für die Metapher typisch sind) weit hinaus und setzt typischerweise **ganze „Netze“ von Relationen** miteinander in Beziehung. B und Z ähneln einander nicht nur in *einer* Hinsicht, sondern in überraschend *vielen*. In wie vielen ist beim Aufkommen einer Analogie oft noch gar nicht von vornherein klar – die besten Analogien sind solche, bei denen sich durch weitere Verwendung und „Ausspinnen“ der Analogie immer weitere Parallelen zwischen Basis und Target ergeben. Und zwar, wie an historischen Beispielen im Folgenden noch zu exemplifizieren sein wird, auch in beide Richtungen.

Damit hängt auch die große **heuristische Stärke der Analogie** als Erkenntnisfindungs- und Erweiterungsinstrument zusammen. Wenn nämlich bezüglich des Basisbereichs das Wissen bereits fortgeschritten ist und vieles über die Binnenrelationen verschiedener Attribute von B bekannt ist, leistet die Analogie eine quasi-automatische Übertragung dieses gesamten Wissens über B auf den noch unbekannt oder unzureichend erforschten Zielbereich Z, so z. B. von den optischen Komponenten eines Mikroskops auf die elektrischen Komponenten eines zum Mikroskop „analog“ konstruierten Elektronenmikroskops.⁴⁸ Selbstverständlich ist durch die Verwendung der Analogie noch keineswegs garantiert, dass diese Übertragung von B auf Z legitim ist, dass also Z tatsächlich auch genau die gleichen Binnenrelationen seiner Attribute aufweist, wie B dies tut, aber letzteres ist dann durch weitere Erforschung von Z abprüfbar und führt im besten Falle zur Bestätigung und zum weiteren Ausbau der Analogie, andernfalls früher oder später zur Modifikation oder zum Fallenlassen dieser Analogie, vielleicht zugunsten einer anderen, neuen Analogie.

Die Kognitionspsychologin Dedre GENTNER, Begründerin dieser Theorie von Analogien als geistiger Übertragung von Strukturen (*mental mapping*), der auch ich mich anschließen möchte, hat diese kognitive Theorie an etlichen praktischen Beispielen ausgeführt, welche sowohl der Wissenschaftsgeschichte wie auch dem Schulunterricht sowie der kognitionspsychologischen Forschung entstammen. Sie hat ferner auch gezeigt, wie Analogien sich systematisch analysieren lassen als Übertragung ganzer Bündel von Relationen R zwischen Objekten der Basis- und Zieldomäne. Während die meisten Attribute A der Objekte b_i der Basis bzw. t_i der Zieldomäne für die Analogie ignoriert werden müssen, behauptet jede Analogie GENTNER zufolge genau diese Erhaltung der Relationen beim Übergang von B zu Z: $R(b_i, b_j) \rightarrow R(t_i, t_j)$. Daraus folgt dann auch konsequent ihre Definition der Analogie im Unterschied zu einer vollständigen Ähnlichkeitsbehauptung, bei der gerade auch diese Attribute von B auf Z übertragbar sind: “An analogy is a comparison in which relational predicates, but few or no object attributes, can be mapped from base to target.”⁴⁹

Systematizität von Analogien und ihr Zusammenhang mit Schemata

Eine weitere, ebenfalls einleuchtende These von GENTNER ist die, dass es unter all den vielen vorhandenen Relationsaussagen typischerweise die höher abstrahierten und stark mit anderen Komponenten vernetzten Relationstypen sind, die in Analogien von B auf Z übertragbar

48 Zu diesem faszinierenden Beispiel siehe SARLEMIJN 1987, S. 41, 44, dort als „Anamorphie“ bezeichnet. Weitere heuristische Vorteile von Analogien bei NAGEL 1961, S. 110, WELLER 1970, S. 115; HOLYOAK 1985.

49 GENTNER 1983, S. 159. Die starke Formalisierung erklärt sich im Hinblick auf die von ihr angestrebte Umsetzbarkeit dieses Formalismus für eine maschinelle Spracherkennung und Argumentrekonstruktion. Diese sprachlogisch-formale Seite der Analogienrekonstruktionen wird hier im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

sind, eine These, die sich als **Systematizität der Analogie** zusammenfassen lässt.⁵⁰ So wird beispielsweise bei der Analogie zwischen Planetensystem und Atombau u. a. die Relation übernommen, dass die Sonne (bzw. der Kern) wesentlich massiver als die umlaufenden Planeten (bzw. Elektronen) ist, während die im Basissystem ebenso gültige Relation, dass die Sonne sehr viel heißer ist als die Planeten ignoriert werden muss, um die Analogie nicht misszuverstehen. Ersteres ist aber für das Verständnis der Analogie sehr viel wichtiger, da es genau die Masse ist, die auch für die Berechnung der Gravitationskraft zwischen Sonne und Planet relevant ist, während die Temperatur der Sonne und andere ihrer Attribute, dafür irrelevant sind. Die Massenrelation hat Systematizität im Gesamtgefüge der Analogie, während die Temperaturrelation dies nicht hat, sondern eine Einzelbehauptung ohne Querbezüge bleibt.

Unter welchen Bedingungen werden Analogien überhaupt erkannt und konstruktiv eingesetzt? In einem hochinteressanten Experiment haben Mary L. GICK und Keith J. HOLYOAK 1983 mehreren Gruppen gleichaltriger, jugendlicher Testpersonen verschiedene hilfreiche Vorinformationen in Form von Geschichten gegeben und untersucht, wie viele von ihnen dann jeweils unter Nutzung dieser Vorinformationen eine dazu analoge Lösung des Problems (das berühmte Dunckersche Strahlungsproblem) zu finden in der Lage waren.⁵¹ Diejenigen, die als Vergleichsgruppe ganz ohne jegliche Vorinformationen in den Test geschickt wurden, hatten nur zu rund 10 % von sich aus eine richtige Lösung anzubieten; diejenigen, die zuvor nur eine dazu analoge Geschichte erzählt bekommen hatten, waren auch nur zu 30 % in der Lage, die Dunckersche Konvergenzlösung zu finden, während sich diese Quote auf 75 % erhöhte, wenn ihnen der Wink gegeben wurde, die vorher gehörte Geschichte bei ihrer Lösungssuche zu berücksichtigen, was schon zeigt, wie schwer es ist, spontan zu einer analogischen Lösungsstrategie zu kommen. Aber noch verblüffender ist, dass sich diese Quote auch durch Hinzufügung einer zusammenfassenden Lösungsstrategie am Ende der präsentierten Geschichte oder durch Hinzufügung eines zusammenfassenden Diagramms nicht wesentlich verbesserte. Hingegen stieg diese Quote beträchtlich, wenn man den Versuchspersonen nacheinander nicht nur eine, sondern zwei, zueinander und zur gesuchten Lösung analoge Geschichten erzählte, und zwar auf 39 % im Falle zweier sehr ähnlicher Geschichten und sogar auf 52 % im Falle zweier semantisch sehr unähnlicher, aber strukturell analoger Geschichten. Diesen Befund interpretierten GICK und HOLYOAK dahingehend, dass sie annehmen, durch die Hintereinanderschaltung von zwei oder mehreren strukturell gleichartigen Geschichten würde aus diesen von den Versuchspersonen ein sogenanntes **Schema** gebildet, eine auf abstrakterer Ebene liegende Lösungsstrategie, die sie dann auch auf das dargebotene Problem zu übertragen fähig sind. Diese Interpretation wird noch dadurch gestützt, dass diejenigen Versuchspersonen, die ein solches allgemeines Lösungsschema zu benennen in der Lage waren, mit sehr hoher Sicherheit (zu 91 %) diese Analogie dann auch erfolgreich auf das spezielle Problem anwandten. Kognitionspsychologisch ließe sich aus diesem Experiment schließen, dass zumindest der wiederholte Gebrauch von ähnlichen Analogien besonders bei trainierten Problemlösern wie sie auch erfahrene Naturwissenschaftler und Techniker darstellen, auf tiefliegende Schemata

50 GENTNER 1983, S. 162ff., sowie ergänzend zur entwicklungspsychologischen Herausbildung der Erkenntnis solcher Systematizität zwischen dem Alter von 5 und 10 Jahren GENTNER und TOUPIN 1986.

51 Für Details dieses Experiments und seiner Auswertung siehe GICK und HOLYOAK 1980, 1983, insbesondere S. 35–37, zu den vier verschiedenen, den Versuchspersonen vorgegebenen und zur gewünschten Lösung analogen Geschichten (über Militärinterventionen und Feuerlöschen von verschiedenen Seiten); das allgemeine Schema lautet in diesem Fall: "use many small forces applied together to add up to one large force necessary to destroy the object."

schließen lässt, die diese Problemlöser durch langes Lernen und Erfahrung verinnerlicht haben. Neben diesem *reasoning from schemata* bleibt aber immer auch der direktere Schluss von einer Basis- auf eine Zieldomäne ohne den „Umweg“ über ein tieferliegendes Schema möglich. Bei der Ermittlung solcher Schemata, die naturwissenschaftlichen und technischen Schlüssen zugrunde liegen, steht die Wissenschaftsgeschichte und -psychologie noch ganz am Anfang.

Von Keith J. HOLYOAK und Paul THAGARD wurde darauf hingewiesen, dass bei Analogiebildungen in der Praxis neben diesem strukturellen Merkmal der Relationsübertragung auch **semantische und pragmatische Randbedingungen** mit am wirken sind.⁵² Das Kriterium semantischer Ähnlichkeit sorgt dafür, dass die Analogiebildung vorwiegend zwischen Bereichen stattfindet, zwischen denen ein zumindest partieller semantischer Überlapp in Bezug auf einzelne Prädikate der Basis- und Zielbereiche besteht, während das Kriterium der pragmatischen Zentralität unter all den vielen sich jeweils für eine Analogiebildung anbietenden Basisbereichen just den aussucht, der mit den übergreifenden Absichten und Erkenntnisinteressen desjenigen zusammenpasst, der oder die diese Analogie durchführt. Zusammenfassend können wir festhalten, dass Analogien (unserer Auffassung nach im Unterschied zu Metaphern) genau die von der oben geschilderten Interaktionstheorie der Metapher geforderte Wechselseitigkeit der Bezüge von Primär- und Sekundärbereich (entsprechend dem Ziel- und Basisbereich in der Definition von GENTNER) aufweisen. Auch wissenschaftshistorisch gesehen waren die besten Analogien genau diejenigen, die durch *wechselseitige* Abbildbarkeit von Relationsnetzen aufeinander das Wissen über B und Z vertieft haben.⁵³

Verschiedene Typen von Analogien

Die bislang vorliegende wissenschaftstheoretische Literatur zu Analogien, die allerdings in ihrem Gesamtumfang bei weitem nicht der immensen Bedeutung dieser Forschungsstrategie für die Wissenschaften gerecht wird, sondern noch stark ausgebaut zu werden verdient,⁵⁴ unterscheidet Analogien noch weiter: u. a., je nachdem, wie die Bereiche B und Z zueinander stehen bzw. je nach Ziel und Zweck ihres Einsatzes:

- (1.) horizontale *versus* vertikale Analogien;
- (2.) kurzreichweitige (naheliegende) *versus* langreichweitige (ferne, weithergeholte) Analogien;
- (3.) substantive (materielle oder physische) *versus* formale (mathematische oder strukturelle) Analogien;
- (4.) attributive Analogien (*analogia attributionalis*) *versus* funktionelle Analogien;
- (5.) visuelle *versus* verbal repräsentierte Analogien;
- (6.) tiefe (ergiebige bzw. starke) *versus* flache (platte bzw. schwache) Analogien;

52 Zum Folgenden siehe HOLYOAK und THAGARD 1989 sowie KEANE et al. 1994 zu *constraints* in AI-Programmen zur Erfassung von Analogien. Eine Einschränkung des *mapping*-Modells der Analogie für mathematische Anwendungen in objektreichen, aber relationsarmen Domänen zeigt SCHLIMM 2008 auf, aber seine axiomatische Charakterisierung von Analogien findet umgekehrt für unsere historischen Beispiele keinerlei Anwendbarkeit.

53 Siehe NERSESSIAN 1988 sowie meine eigenen Beispiele im Folgenden, insbesondere zu MAXWELL und HERTZ, beides Meister in diesem Hin- und Her zwischen verschiedenen Ebenen der Analogiebildung und Modellierung.

54 Für neuere Ansätze einer wissenschaftstheoretischen Analyse von Analogien siehe z. B. HOLYOAK und THAGARD 1995, DARDEN und RADA 1988 und die in den folgenden Fußnoten erwähnten früheren Autoren und Texte.

- (7.) positive *versus* negative Analogien (KEYNES);
- (8.) heuristische *versus* rechtfertigende Analogien;
- (9.) illustrative *versus* komparative Analogien.

ad (1.) Die erste dieser Unterscheidungen grenzt den üblichen Fall derjenigen Analogien, in denen Basis- und Zielbereich verschieden voneinander sind, von dem eher ungewöhnlichen, aber in den Naturwissenschaften durchaus vorkommenden Fall ab, dass *innerhalb* eines Gegenstandsgebiets eine Analogie zwischen verschiedenen Ebenen z. B. der Auflösung oder der Theoretizität erfolgt. Ersteres ist z. B. der Fall, wenn Charles DARWIN (1809–1882) in seiner Theorie der Evolution eine Analogie zwischen biologischen Populationsstatistiken und der kameralistisch-volkswirtschaftlichen Bevölkerungsstatistik eines Adam SMITH (1723–1790) konstruierte, eine für damalige Verhältnisse äußerst gewagte, überhaupt nicht naheliegende Analogie zwischen zwei nebeneinanderstehenden Wissensgebieten.⁵⁵ Eine im Unterschied dazu **vertikale** Analogie lag beispielsweise vor, als man sich in den 1930er Jahren dazu entschloss, sich den Atomkern aus noch kleineren Teilchen, den Neutronen und Protonen, zusammengesetzt vorzustellen, analog zu der früher schon akzeptierten Zusammensetzung des Atoms aus Hülle (Elektronen) und Kern und analog auch zu der noch viel älteren Idee einer Zusammensetzung der Materie insgesamt aus sehr viel kleineren Atomen. Auch der japanische Physiker Hideki YUKAWA (1907–1981), der in den 1930er Jahren annahm, dass die Kernkraft durch ein Austauschteilchen analog zum Austauschteilchen des Photons für die elektromagnetische Kraft vermittelt wird, ließ sich dabei von einer formalen Analogie zwischen zwei Teilgebieten der Physik leiten, von dem eines auf sehr kleine Raumzeitbereiche nahe den Atomkernen beschränkt war. Diese Beschränkung der Reichweite der Kernkraft, die mit größer werdenden Abständen viel stärker als die elektromagnetische Kraft abfällt, zwang YUKAWA dann auch dazu, die Masse dieses Austauschteilchens im Unterschied zum Photon des Elektromagnetismus nicht verschwinden zu lassen, sondern ihm einen endlichen Wert zu geben, der mit der experimentell bestimmbaren Reichweite in einem reziproken Verhältnis stand.⁵⁶

ad (2.) Im Sinne der zweiten Unterscheidung wäre etwa DARWINs ausdrückliche Anleihe bei SMITH zugleich auch ein Beispiel für eine **langreichweitige Analogie**, weil die beiden Gebiete, denen die Basis bzw. die Targetdomäne entstammen, sehr „weit“ voneinander entfernt liegen. Freilich bleibt der Ausdruck „weit“ hier metaphorisch, da der Raum der von den verschiedenen Disziplinen aufgespannt wird, keine Metrik aufweist,⁵⁷ aber es ist trotz der Restunschärfe dieser Begrifflichkeit doch klar, was gemeint ist: die In-Bezug-Setzung zweier weit ab voneinander anzusiedelnder Wissensfelder (in der Sprache der Kritiker – übrigens auch der von DARWIN – dann oft als „weithergeholt“ verunglimpft). Beispiele dazu gleich.

Eine Analogie ist demgegenüber **kurzreichweitig oder „naheliegend“**, wenn die beiden durch die Analogie miteinander in Beziehung gesetzten Wissensfelder „nahe“ beieinander

55 Zur Ideengeschichte siehe etwa YOUNG 1969, zur weiteren Karriere der analogischen Übertragung eines „Kampfes um die Existenz“ als bloßer Metapher vgl. auch MAASEN und WEINGART 2000, Kap. 3 und dortige Referenzen. DARWIN hat diesbezüglich in seinen *Origin of Species* (Penguin-Ausgabe 1962, S. 216) übrigens (in unserem Sinn terminologisch ungenau) von *metaphorical expressions* gesprochen und diese damit gerechtfertigt, dass sie für die Kürze der Kommunikation unverzichtbar seien (“they are almost necessary for brevity”).

56 Für eine hochinteressante introspektive Beschreibung dieses schwierigen Prozesses der Anpassung seiner Analogie an die experimentellen Befunde siehe YUKAWA 1985, S. 174f.

57 Interessante Überlegungen zu diesem Problem finden sich in BUCHANAN 1932.

liegen, z. B. verschiedene Teilgebiete der Physik betreffen, weshalb die Analogie dann oft auch als „naheliegend“ bezeichnet wird. Als ein gutes Beispiel dafür führe ich die Analogie an, welche James BRADLEY (1693–1762) zwischen der von ihm astronomisch beobachteten Aberration des Fixsternlichts und dem scheinbar schrägen Fallen z. B. von Regentropfen von einem schnell bewegten Fahrzeug aus gesehen konstruierte.⁵⁸ Aus der Perspektive der Newtonianischen Teilchentheorie des Lichts war dies eine „naheliegende“ Analogie, während sich für uns heute der „Abstand“ der beiden Bezugsebenen voneinander eher vergrößert hat. In die gleiche Kategorie des Kurzreichweitigen fällt z. B. die Analogie, die Matthias POUILLET (1790–1868) vollzog, als er 1879 die Eigenschaften des wohlbekannten ballistischen Pendels, bei dem die Geschwindigkeit eines Projektils durch den Ausschlag eines trägen Pendels bestimmt wird, auf dessen Pendelfläche es aufprallt, mit denen des von ihm neu konstruierten galvanometrischen Pendels verglich, bei dem kurzzeitig wirkende sehr große Stromstöße durch einen „analogen“ Ausschlag der Galvanometernadel gemessen wurden.⁵⁹ Bezugsdisziplin für Basis- und Zielbereich der Analogie blieb in beiden Fällen die Physik, allerdings verschiedene Teilgebiete, nämlich die altbewährte Mechanik einerseits und die Optik bzw. Elektrodynamik andererseits. MACHS Analogie zwischen der Verdichtungswelle eines Projektils in der Luft und Bugwellen eines Schiffes bzw. Stauwellen vor Brückenpfeilern verbindet Aero- und Hydrodynamik, und die Analogie zwischen Schall und Licht verbindet die Akustik mit der Optik.⁶⁰

Eine **Analogie mittlerer Reichweite** liegt vor, wenn keiner dieser beiden Extremfälle vorliegt, sondern Übertragungen zwischen eng benachbarten, aber verschiedenen Gebieten der Naturwissenschaft stattfinden, so etwa im Falle von Jacobus Henricus VAN'T HOFF (1852–1911), der 1884 die Analogie zwischen mechanischem Gleichgewicht und chemischem Gleichgewicht erkannte, woraus sich schließlich eine neue „physikalische Chemie“ ergab.⁶¹ Ein weiteres, von Elektrotechnikern bis heute sehr geschätztes Beispiel ist die Analogie zwischen elektrischen und mechanischen Schwingungsvorgängen, die sowohl auf der Ebene der Elemente schwingender Systeme wie auch auf der Ebene der beschreibenden Differentialgleichungen funktioniert, was u. a. dazu führt, das für jedes mechanische Schwingungsproblem ein elektrisches Ersatzschaltbild angegeben werden kann: den schwingenden Massen entsprechend dabei die elektrischen Kapazitäten, der Federnachgiebigkeit die Induktivität, und der Dämpfernachgiebigkeit der elektrische Widerstand; mechanische Geschwindigkeitsdifferenzen entsprechend elektrische Potentialdifferenzen (jeweils zwischen den Enden des schwingenden Elements), und der im mechanischen Element wirkenden Kraft entspricht der durch das elektrische Element fließende Strom.⁶²

Von diesen drei Analogie-Typen haben die fernreichweitigen die größte Beachtung gefunden, da in ihnen die ungeahntesten Querverbindungen zwischen Wissensgebieten aufgezeigt werden, die normalerweise nicht miteinander in Verbindung gebracht werden. In einem Auf-

58 Siehe dazu BRADLEY 1725/27; hinter dieser hübschen Analogie stand das Newtonische Teilchenbild des Lichts.

59 Siehe dazu POUILLET 1839. Dieses Instrument war wichtig als Vorbild für andere graphisch registrierende Messinstrumente, wie sie dann ab 1840 von Carl LUDWIG in Leipzig u. a. gebaut wurden.

60 Siehe HOFFMANN und BERZ 2001, S. 44, 95, 259ff., mit Auszügen aus MACHS Tagebüchern von 1887 bzw. DARRIGOL 2010 und dort jeweils genannte weiterführende Literatur.

61 Siehe VAN'T HOFF 1884 sowie u. a. zeitgenössische Arbeiten von Svante ARRHENIUS, Pierre DUHEM und Wilhelm OSTWALD.

62 Ausführliche und sehr klare Darstellungen dieser Analogie bei KLOTTER 1950, SARLEMIJN und KROES 1988, S. 250f.

satz *Über die Methoden der theoretischen Physik* schrieb einer der Vordenker dieser damals noch jungen Subdisziplin der Physik, Ludwig BOLTZMANN (1844–1906), über die gerade von ungeahnt „weitreichenden“ Analogien ausgehende Faszination:⁶³

„Die überraschendsten und weitgehendsten Analogien zeigten sich zwischen scheinbar ganz disparaten Naturvorgängen. Die Natur schien gewissermassen die verschiedensten Dinge genau nach demselben Plane gebaut zu haben, oder, wie der Analytiker trocken sagt, dieselben Differentialgleichungen gelten für die verschiedensten Phänomene. So geschieht die Wärmeleitung, die Diffusion und die Verbreitung der Elektrizität in Leitern nach denselben Gesetzen. Dieselben Gleichungen können als Auflösung eines Problems der Hydrodynamik und der Potentialtheorie betrachtet werden. Die Theorie der Flüssigkeitswirbel sowie die der Gasreibung zeigt die überraschendste Analogie mit der des Elektromagnetismus etc.“

Ein anderes gutes Beispiel für eine heuristisch fruchtbare fernreichweitige Analogie wäre etwa die Migration der Normalverteilungskurve, entwickelt zwischen 1774 und 1812 von Pierre Simon DE LAPLACE (1749–1827), Carl Friedrich GAUSS (1777–1855) und Wilhelm BESSEL (1784–1846) im Kontext der Analyse von statistischen Fehlern bei astronomischen und geophysikalischen Messungen, in die Bevölkerungsstatistik ab 1835 durch den belgischen Astronom und Statistiker Adolphe QUETELET (1796–1874) und ab 1869 in die Anthropologie durch Francis GALTON (1822–1911).⁶⁴ Wie schwer gerade die Auffindung guter fernreichweitiger Analogien ist, wird uns – für die viele dieser Analogien selbstverständlich geworden sind – oft nicht bewusst. Es kommt aber sehr gut zum Ausdruck in folgendem Zitat des US-amerikanischen Psychologen und Vorkämpfers des Pragmatismus William JAMES (1842–1910):

“Why cannot anyone reason as well as anyone else? Why does it need a Newton to notice the law of squares, a Darwin to notice the survival of the fittest? The flash of insight between an apple and the moon, between the rivalry for food in nature and the rivalry for man’s selection, was too recondite for any but exceptional minds. Genius, then, [...] is identical with the possession of similar associations to an extreme degree.”⁶⁵

JAMES koppelt den Begriff des Genies also ganz eng an den Gebrauch von Analogien. Heute etwas aus der Mode gekommen, wird statt des Genie-Begriffs in neueren Texten statt dessen lieber von Kreativität oder anderen positiv besetzten Termini verwandter Bedeutung gesprochen, aber geblieben ist die Grundidee, jene seltene Gabe des Herstellens fruchtbarer Querbeziehungen mit dem souveränen Einsatz von Analogien zu verknüpfen. Nur konsequent, dass einige dieser Autoren ihre Klientel dann speziell in diesem Erzeugen von Analogien trainieren,⁶⁶ um deren „Kreativitätspotential“ zu erhöhen, was freilich nur die eine Hälfte

63 Ludwig BOLTZMANN in DYCK 1892, S. 89–98, Zitat S. 95; BOLTZMANN verwies dabei übrigens auch auf MAXWELL 1890, Bd. 1, S. 156; für das verwandte Beispiel der Laplace-Gleichung, mit der Gravitation, Elektrostatik, Elastizität und der Fluss von Fluida beschrieben werden kann, siehe LEATHERDALE 1974, S. 28.

64 Siehe dazu DASTON 2008 und die dort genannten Primärtexte, ferner VAN BENDEGEM 2000.

65 Siehe JAMES 1890, Bd. II, S. 343 und 360.

66 Für Beispiele siehe etwa HALPERN 1996, S. 374ff., *analogical thinking* und dort genannte weitere Autoren wie etwa W. J. J. GORDON, der seinen Kunden riet, bewusst Analogien herbeizuführen zu “strange new contexts in which to view a familiar problem”, um aus dieser Verfremdung neue Impulse zu gewinnen. Vgl. neben dieser

des Problems löst, da als zweiter Schritt eine ebenso souveräne kritische Bewertung der unzähligen Möglichkeiten zur Herstellung von Analogien folgen muss, um aus dem Heuhafen von Stroh die wertvolle Nadel herauszufischen. Meines Erachtens bestand die „Genialität“ (wenn man denn an diesem Terminus festhalten will) von Robert HOOKE, Johannes KEPLER, Ernst MACH, James Clerk MAXWELL oder Henri POINCARÉ – alles bekennende Anhänger der analogischen Methode – nicht so sehr im Produzieren einer besonders großen Zahl analogischer Verknüpfungen, sondern eher darin, aus diesem großen Fundus von Möglichkeiten besonders effizient und zuverlässig diejenigen Optionen herauszufischen, die wissenschaftlich erfolversprechend weiterzuverfolgen sind.⁶⁷ Im Falle von Antoine LAVOISIER (1743–1794), der die Fernanalogie des Verbrennungsvorgangs von Kohle mit dem Prozess der Atmung erkannte (in beiden Fällen wird dasjenige Gas, das der Sauerstoff nannte, verbraucht und Kohlendioxid erzeugt),⁶⁸ blieb der Ausbau dieser fruchtbaren Analogie zu einem geschlossenen System der antiphlogistischen Chemie letztlich den Anhängern dieses während der französischen Revolution guillotinierten Naturforschers vorbehalten. In unzähligen anderen Fällen sind diese äußerst riskanten fernreichweitigen Analogien jedoch gescheitert, so etwa auch der ambitionöse Versuch des Innsbrucker Physikers Leopold PFAUNDLER (1839–1920), in Analogie zum bereits sozialdarwinistisch verkürzten „Kampf ums Dasein“ zwischen den Lebewesen auch in der Chemie eine solche „Concurrenz der Moleküle“ einzuführen: „im Kampf ums Dasein neigt sich der Sieg zu Gunsten der einfacheren Moleküle“; die „schwächeren“ Moleküle zerfallen, die „stärkeren“ überleben.⁶⁹

Von Kognitionspsychologinnen wie etwa Diane HALPERN wurde untersucht, ob sich Fern- oder Nahanalogien besser dem Gedächtnis einprägen und welche von beiden besser als Lernhilfe im Unterricht eingesetzt werden kann. Sie konnte durch Reihenuntersuchungen mit Kontrollgruppen nachweisen, dass Fernanalogien (im Jargon der Kognitionspsychologen auch *distant domain analogies* genannt) statistisch signifikant besser geeignet sind, das Verständnis schwieriger Sachverhalte zu fördern und sich diese besser merken zu können. Ihre Erklärung für diesen überraschenden Befund läuft darauf hinaus, dass Nahanalogien (*near domain analogies*) neben der strukturellen Ähnlichkeit von Basis und Zielbereich auch noch oberflächliche äußere Ähnlichkeiten aufweisen, die die Probanden von dem strukturell wesentlichen Kern ablenken.⁷⁰ Mit steigender *between domain distance* verschwindet diese Gefahr. “When the similarity relationship is more obscure, as in a distant domain analogy, subjects are required to seek underlying relationships in order to render it meaningful.”⁷¹

sogenannten Synektik ferner die Technik des *brainstorming* von A. F. OSBORN, Fritz ZWICKYS morphologische Analyse und G. S. ALTSCHULLERS TRIZ-Methode. Frau Katheryna SEREBRYAKOVA ist derzeit dabei, unter meiner Betreuung eine Promotion zur Geschichte dieser heuristischen Problemlösungsmethoden zu erarbeiten.

67 Über den Entdeckungsprozess und die darin beobachtbaren plötzlichen Gestaltwechsel siehe HANSON 1958; zu MAXWELL siehe unten; spezifisch zu POINCARÉ siehe Michel PATY in DURAND-RICHARD 2008.

68 Über diese Analogie siehe z. B. DOROLLE 1949, S. 99–102; vgl. jedoch auch SNELDERS 1994, S. 69f., für das Beispiel der Salz- und Blausäure, bei dem LAVOISIER durch Analogieschlüsse zur Schwefelsäure zu der irrigen Annahme geführt wurde, dass alle Säuren Sauerstoff enthalten müssten.

69 Näheres dazu berichtet SNELDERS 1994, S. 67f., dort auch Hinweise auf die Primärliteratur dazu.

70 Dass diese äußerlichen Ähnlichkeiten von jüngeren Kindern stärker bzw. bis zum Alter von etwa 5 Jahren fast ausschließlich beachtet werden, haben GENTNER und TOUPIN 1986 sowie VOSNIADOU und ORTONY 1983 nachgewiesen.

71 Siehe HALPERN et al. 1990, Zitat S. 303; als Nahanalogie diente z. B. der Vergleich des lymphatischen Systems mit dem Blutkreislauf, als Fernanalogie der der Lymphen mit einem Schwamm; vgl. weitere Beispiele ebenda, S. 300.

Andererseits zeigt sich auch eine Altersabhängigkeit in der Wahrnehmungsfähigkeit für diese struktureller angelegten Fernanalogien; von jungen Probanden im Alter bis zu etwa 9 Jahren werden sie kaum verstanden, während sich einfachere Analogien mit größerer Ähnlichkeit der Gegenstandsbereiche in Ansätzen schon ab dem Alter von 3 oder 5 Jahren zeigen.⁷² Noch rigidere Aussagen wagt Graeme S. HALFORD in seinem "structure-mapping approach to cognitive development". Seiner Auffassung nach gibt es vier kognitiv klar voneinander getrennte Entwicklungsphasen des menschlichen Intellekts. Auf der Stufe 1, die Kinder typischerweise im Alter von einem Jahr erreichen, können sie einzelnen Objekten Namen zuordnen und verbinden mit diesen Namen auch innere Vorstellungsbilder; bis zum Alter von 5 Jahren erreichen sie in Stufe 2 die Fähigkeit, relationale Verhältnisse zu erkennen und zu benennen; erst danach kommt in Stufe 3 die Fähigkeit hinzu, einfache Systemrelationen zu erkennen und miteinander vergleichen zu können und *multiple-system mappings*, wie sie für komplexere Analogien benötigt werden, werden erst in Stufe 4 mit etwa 11 Jahren möglich.⁷³

ad (3.) Die traditionelle Wissenschaftstheorie unterscheidet zwischen **substantiven** (*synonom* damit auch materiellen oder physischen) und **formalen** (mathematischen oder strukturellen) Analogien.⁷⁴ So sind z. B. Schallwellen und Ultraschallwellen einander physisch analog, insofern beides Druckwellen sind, die sich nur bei Vorhandensein eines übertragenden physischen Mediums ausbreiten können und deren Geschwindigkeit sich in ganz analoger Weise aus den physikalischen Charakteristiken dieser Medien wie z. B. ihrer Dichte und Elastizität berechnen lassen. Schallwellen und Lichtwellen hingegen, die lange ebenfalls für einander physisch analog gehalten wurden, sind dies nicht, wohl aber formal analog, da beide Formen von Wellenausbreitung mathematisch mit ein und derselben Wellengleichung beschrieben werden können, auch wenn die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse (longitudinale Druckwelle bzw. transversale elektromagnetische Welle) völlig verschieden sind. In gleicher Weise wurde auch die Ausbreitung von Flüssigkeiten, von Elektrizität und von Wärme im verallgemeinerten Fluidumsmodell des ausgehenden 18. Jahrhunderts für physisch analog gehalten,⁷⁵ während sich nach dem Zusammenbrechen dieses Standardmodells der Materie im 19. Jahrhundert eine formale mathematische Analogie der entsprechenden Phänomene gehalten hat, die von POISSON, RIEMANN u. a. sogar noch weiter ausgebaut wurde, obwohl die zugrundeliegende Modellvorstellung längst obsolet geworden war. Mit der Rede von materiellen Analogien werden häufig auch physische, anfassbare Modelle bezeichnet, so etwa wenn Eric FRANCOEUR 1997 von *material analogy* redet und damit *Ball-and-stick*-Modelle von Molekülen meint, deren Vorzüge er anpreist:

72 Die Altersangaben schwanken und scheinen auch stark von den jeweils zugrundegelegten Analogietypen und -beispielen abzuhängen; vgl. etwa HOLYOAK et al. 1984, S. 2042f., HALPERN 1987, HALPERN et al. 1990.

73 Siehe HALFORD 1987, insbesondere S. 621 sowie S. 616, für eine graphische Kontrastierung der 4 Typen von *mapping*. Ergänzend dazu auch WINNER et al. 1976 zur entwicklungspsychologischen Entfaltung des Verständnisses und aktiven Gebrauchs von Metaphern, die bis zum Alter von 10 Jahren häufig wörtlich, also mißverstanden werden.

74 Siehe z. B. NAGEL 1961, S. 110, sowie erläuternd dazu auch ACHINSTEIN 1964, S. 329f., 338ff., und KROES 1989, S. 147–153. Hélène METZGER hingegen unterschied 1926 zwischen virtuellen, formalen und den Wirkungsmechanismus betreffenden Analogien (*analogies agissantes*), eine Unterscheidung, die soweit ich sehe, von niemandem übernommen wurde und deshalb hier nicht weiter thematisiert wird. Zur optisch-mechanischen Analogie siehe DARRIGOL 2010.

75 Zu diesem Standardmodell des 18. Jahrhunderts siehe HEILBRON 1993 und dort angeführte Primärliteratur.

“models embody, rather than imply, the spatial relationship of the molecule’s components. As a result, the observer is freed from the constraints of perspective: free to embrace, at leisure, many points of view. Models can also be manipulated. Like many other types of objects handled by scientists in the field or the laboratory, they can be touched, measured, tested, dissected, or assembled, and tinkered with in many different fashions. In other words, they act as a material analogy.”⁷⁶

In der Beschreibung der Vorzüge solcher tangibler Modelle, stimme ich FRANCOEUR vollkommen zu, nur finde ich für all diese Objekte die Bezeichnung „materielles Modell“ eindeutiger und angemessener (vgl. hierzu unten die genauere Abgrenzung von Analogie und Modell).

ad (4.) Eng mit der vorigen Unterscheidung verwandt ist diejenige zwischen **attributiven** und **funktionalen** Analogien. Dann und nur dann, wenn der analogische Transfer von Basis zum Zielbereich in der Übertragung eines oder mehrerer Attribute eines Objekts aus dem Basisbereich besteht, dem ein „analoges“ Objekt im Zielbereich zugeordnet wird, liegt eine sogenannte attributive Analogie vor. Oft handelt es sich schlicht um äußere Ähnlichkeiten, aus denen aber in der Naturwissenschaft leider nur wenig geschlossen werden kann. Speziell im Mittelalter und in der frühen Neuzeit hatte jene *analogia attributionis* jedoch Hochkonjunktur, so etwa in der Paracelsischen Signaturenlehre, in der von *äußerlichen* Ähnlichkeiten auf *innere* Ähnlichkeiten der Wirkmechanismen geschlossen⁷⁷ wurde: Weil Melissenblätter herzförmige Gestalt haben, müssten sie laut PARACELTUS als Herzmittel tauglich sein; weil sich in der Blüte der *emphrosia officinalis* vermeintlich das menschliche Auge abzeichnet, sprach er ihr die Heilkraft des sogenannten „Augentrost“ bei Augenkrankheiten zu; weil der Adlerstein (*Aetitis*) – ein Hohlkiesel, in dem ein anderer Stein eingeschlossen ist – beim Schütteln klappert, vermutete man seine Nützlichkeit bei der Geburtshilfe, und alle roten Steine (Rubin, Granat, Haematit) wurden als blutstillende Mittel eingesetzt. Wichtiger als attributive Analogien sind darum für die spätere Praxis der Medizin, Naturwissenschaft und Technik die funktionalen Analogien, in denen Funktionsentsprechungen zwischen Komponenten im Basis- und Zielbereich vorliegen. Wie verblüffend weitgehend solche Funktionsentsprechungen zwischen völlig verschiedenen Gebieten sein können, verdeutlicht das folgende Diagramm, das funktionale Entsprechungen zwischen mechanischen, elektrischen, hydraulischen und pneumatischen Maschinenkomponenten aufzeigt, die ohne jene auf eine Systemanalyse der Ingenieure J. M. SCHOENMAKERS und H. P. TOMESSEN zurückgehende Strukturanalyse kaum zu erkennen gewesen wäre, da Elemente wie die Kupplung, der Lichtschalter oder das Steuer eines Autos kaum irgendwelche äußerlichen Attribute miteinander gemeinsam haben.⁷⁸

ad (5.) Mit den beiden vorigen Unterscheidungen verwandt, aber nicht deckungsgleich ist auch diejenige zwischen **verbal** bzw. **visuell repräsentierten Analogien**. Letztere können oft ganz oder fast ganz ohne Worte einfach nur durch Nebeneinanderstellen zweier oder mehrerer Abbildungen deutlich werden und „springen“ dem Betrachter – wenn sie gut sind – dann gleichsam „ins Auge“. Selbstverständlich können visuelle Analogien auch präzise verbalisiert oder formalisiert werden, nur können umgekehrt viele in Worten oder Formeln erfasste Analogien gar nicht oder nur auf Umwegen visualisiert werden. In den materiellen Modellen

⁷⁶ Siehe FRANCOEUR 1997, Zitat S. 14, bzw. seinen Beitrag in de CHADAREVIAN und HOPWOOD 2004.

⁷⁷ Zur frühneuzeitlichen Medizin hier den Beitrag von Heinz SCHOTT, ferner FELLMETH und KOTHEDE (Hrsg.) 1993, S. 45–50.

⁷⁸ Für dieses und weitere gute Beispiele für Funktionsanalogien siehe SARLEMIJN und KROES 1988, S. 240ff.

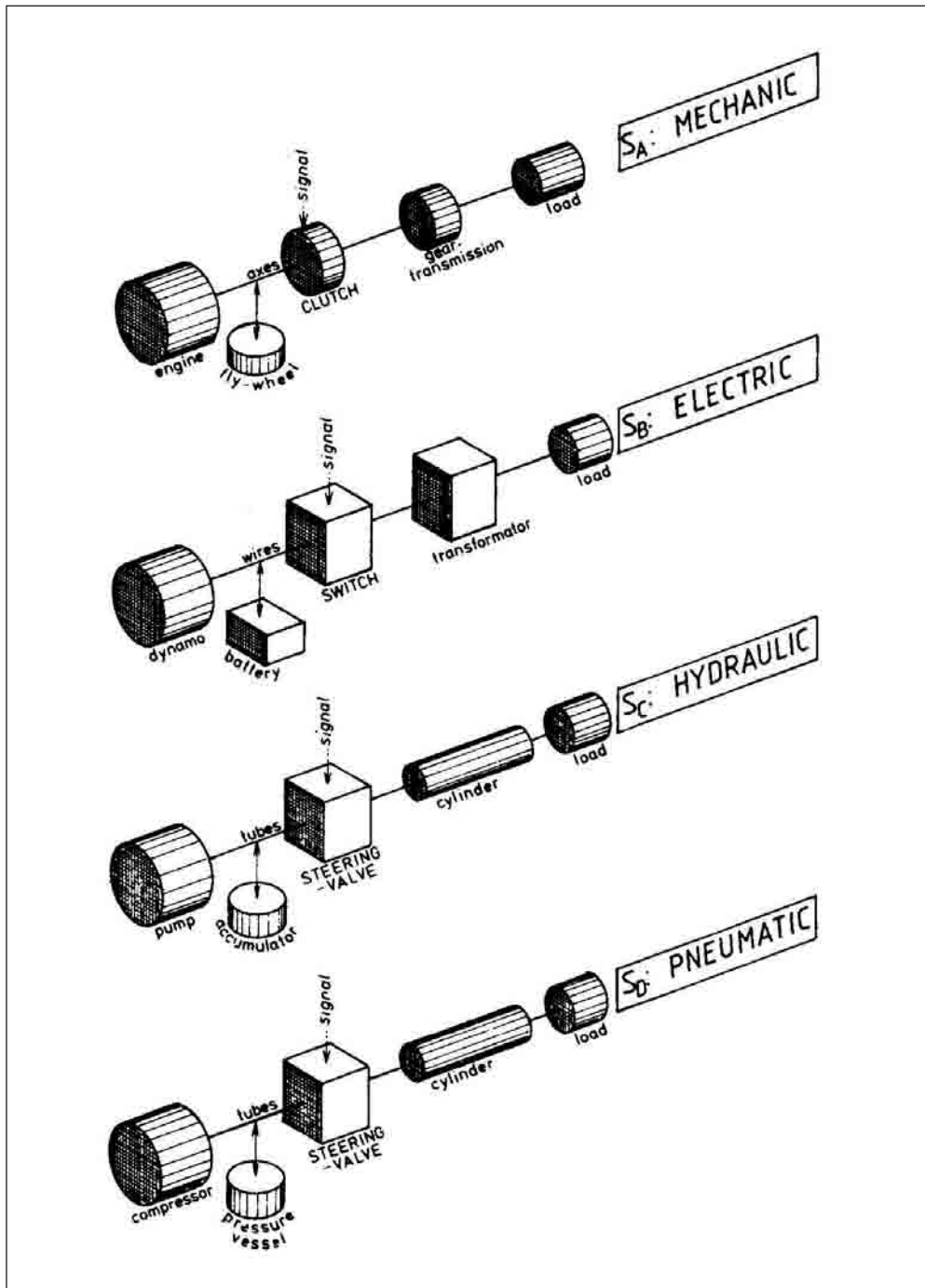


Abb. 2 Funktionsanalogien zwischen 4 technischen Systemen, aus SARLEMIJN 1987, S. 47, bzw. SARLEMIJN und KROES 1988, S. 242, modifiziert übernommen aus einer Vorlage von SCHOENMAKERS und TOMESSEN.

der vorigen Unterscheidung werden Analogien etwa der räumlichen Lage oder andere strukturelle Ähnlichkeiten visuell erfassbar, dennoch wäre es falsch, beide gleichzusetzen, zumal sehr viele visuelle Analogien auch ohne materielles Modell klar und deutlich kommunizierbar sind. Ein hervorragendes Beispiel sind die spekulativen Überlegungen von d'Arcy Wentworth THOMPSON (1860–1948) in seiner zum Klassiker avancierten Studie *On Growth and Form*, die 1917 in erster Auflage erschien und noch bis in unsere Zeit hinein immer wieder abgedruckt wurde. Unter den vielen von ihm konstruierten analogisch verknüpften Bildketten sei hier nur eine herausgegriffen, die von den berühmten Kurzzeitbelichtungsaufnahmen fallender Wassertropfen durch Arthur Mason WORTHINGTON (1852–1916) (links bzw. in der Mitte in einer späteren Zeitphase nach dem Wiederhochschnellen des Wassers als sogenannter „Strömungspilz“ oder „Tintenpilz“) bis zu scheinbar analogen Formen von „hydroiden“ Polypen (rechts) reicht. Doch was folgt aus dieser Bilderkette? Etwa, dass die mittlere und rechte Form miteinander in ihrer Genese verwandt sind? Mitnichten! Der Biologe d'Arcy THOMPSON war sich dieser Begrenzung seiner Methode sogar bewusst, denn er formuliert im Begleittext stets sehr vorsichtig: „we seem to see“, „we seem able to discover“ usw., sowie an einer Stelle sogar noch ausdrücklicher zweifelnd: „it is hard indeed to say how much or little all these analogies imply“.⁷⁹ Visuelle Analogien können zwar erstaunliche Bild- und Strukturbezüge herstellen, aber sie haben keinerlei bindende Aussagekraft über die wissenschaftlich und technisch so stark im Vordergrund stehenden Kausalbeziehungen bzw. die in der Biologie interessierenden evolutionären Relationen. Sie stehen in starker Resonanz zu attributiven Analogien (siehe oben) und werden häufig zusammen mit diesen eingesetzt (so etwa massiv in der Alchemie der frühen Neuzeit⁸⁰).

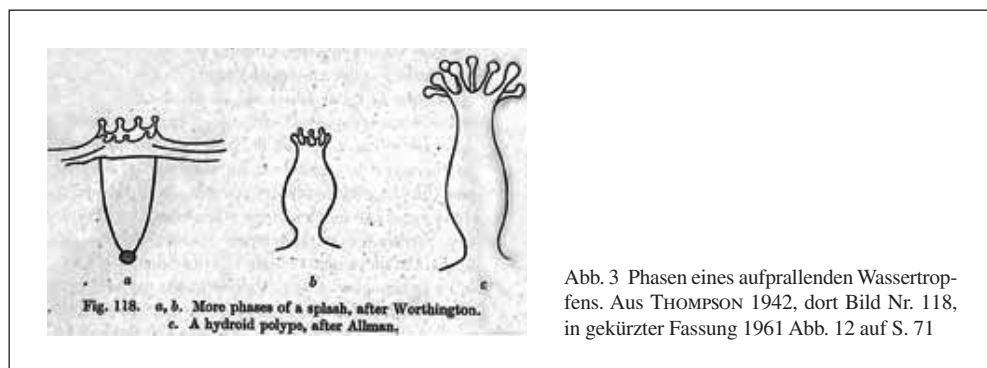


Abb. 3 Phasen eines aufprallenden Wassertropfens. Aus THOMPSON 1942, dort Bild Nr. 118, in gekürzter Fassung 1961 Abb. 12 auf S. 71

Andere, nicht minder berühmte Beispiele für frappante visuelle Analogien finden sich unter den Zeichnungen LEONARDO DA VINCIS (1452–1519). LEONARDO verglich Wirbel im Wasser mit geflochtenen Haarsträhnen, verzweigte innere Gefäße und Treppenhäuser, Wasseradern im Gestein und Adern im Körper, Aufhängungen von Maschinen mit der Nackenmuskulatur des Menschen usw. usf. Sein zeichnerisches Werk, verstreut über viele *Codices*, ist voller

⁷⁹ d'Arcy THOMPSON 1942, S. 397; vgl. für eine noch weitergehende Kritik SCHMIDT 2008, S. 10: „Fast möchte man meinen, THOMPSON folge der kritisch-paranoiden Methode eines Salvador DALI, der in jeder runden Form ein Rhinozeroshorn ausmacht.“

⁸⁰ Vgl. hier erneut den Beitrag von Heinz SCHOTT in diesem Band und dessen aussagekräftiges Bildmaterial.

wechselseitiger Querverweise, voller Zuordnungen des von ihm Gesehenen zu natürlichen Mustern. Der Kunsthistoriker und Leonardo-Kenner Martin KEMP hat LEONARDO als “lateral thinker of the most extreme kind” ausgewiesen,⁸¹ als einen visuell Denkenden und assoziativ Sehenden. Bei aller Bewunderung: Auch hier zeigt sich wieder die Gefahr des Ausufers jener In-Beziehung-Setzung von Formen, so etwa bei LEONARDOS Zeichnungen von Wasserwirbeln, denen man die zeichnerische Konstruktion in Analogie zu den von ihm so perfekt beherrschten sich kräuselnden Haarsträhnen noch zu sehr anmerkt, als dass diese unserem heutigen, an modernen Sichtbarkeitsmachungen solcher Verwirbelungen geschulten Sehempfinden nach stimmige Portraits hydrodynamischer Wirbel wären. LEONARDOS Gestaltsehen hat ihn diese Wasserwirbel trotz seiner geschulten Beobachtungskunst zu schnell als analog zu etwas erscheinen lassen, was sie letztendlich nicht waren.



Abb. 4 LEONARDO DA VINCI, Skizzen von Wasserverwirbelungen hinter einem in die Strömung eingebrachten Störkörper (Windsor Castle, 12579gr, ca. 1513). Quasi-automatisch zeichnet LEONARDO die Verwirbelungen als Verdrehung von Zöpfen, so stark, daß sie heutigen Betrachtern ohne Erläuterung kaum als Wasserwirbel kenntlich sind. Der Begleittext von LEONARDO unten verweist ebenfalls explizit auf diese von ihm gesehene visuelle Analogie: “Observe the motion of the surface of the water which resembles that of hair, and has two motions, of which one goes on with the flow of the surface, the other forms the lines of the eddies; thus the water forms eddying whirlpools one part of which are due to the impetus of the principal current and the other to the incidental motion and return flow.”⁸²

81 Siehe KEMP 2006, S. 16; vgl. auch FEHRENBACH 1996.

82 Englisch übersetzt in RICHTER 1888, Nr. 389.

ad (6.) Auch die fünfte Unterscheidung bemüht metaphorische Redewendungen, die expliziert werden müssen. Nicht jede Analogie wird als „tief“ bezeichnet werden können, sondern nur diejenigen, die in einer (anfangs oft ungeahnten) Art und Weise auf B und Z „passen“, so dass der Übertragbarkeit von Relationen aus B auf die entsprechenden Relationen in Z kaum Grenzen gesetzt zu sein scheinen. Letzteres klingt unwahrscheinlich, und es war auch entsprechend selten in der Wissenschaftsgeschichte, dass Analogien diesen Typs gefunden wurden, aber nichts desto trotz gab und gibt es derartige Fälle ab und an, die dann von den Forschern auch so bezeichnet wurden (und werden). Erst wenn man diesen wichtigen Unterschied zweier Analogientypen aus systematischer Sicht verstanden hat, wird man die Begeisterung der Naturforscher nachvollziehen können, die immer dann auftrat, wenn sich eine solche tiefe Analogie abzeichnen begann. Die bis heute recht bekannte Maxwellsche Analogie der elektrischen und magnetischen Felder mit Spannungen und Wirbeln im elektromagnetischen Äther war eine solche tiefe Analogie, von der eine ganze Generation fanatisch begeisterter Maxwellianer gezehrt hat, auch wenn nach EINSTEIN die Begeisterung für solche quasi-mechanischen Äthermodelle dann rapide abgenommen hat.⁸³ Als ebenso tief haben sich Analogien wie z. B. die zwischen dem optischen Mikroskop und dem Elektronenmikroskop oder die zwischen dem Aufbau des Planetensystems und dem des Atoms (siehe unten) herausgestellt. Insofern Wissenschaftsgeschichte auch solche affektiven Momente der Begeisterung und nachfolgenden Enttäuschung von Akteuren verstehen und rekonstruieren können muss, darf auch die Unterscheidung „flacher“ und „tiefer“ Analogien nicht ausgeblendet werden, so sehr sich die Bewertungsmaßstäbe dafür mit den Zeiten auch ändern. Um 1800 wurde beispielsweise von Chemikern in analogischer Übertragung menschlicher Zu- und Abneigung auch von „Affinitäten“ zwischen Stoffen geredet, die tabelliert und miteinander verglichen wurden, um auf diese Weise das Stattfinden oder Nichtstattfinden chemischer Reaktionen zwischen zwei Stoffpaaren AB und CD erklären zu können. Dann (und nur dann), wenn die Affinität zwischen A und D größer ist als die zwischen A und B, werden aus der Zusammenfügung von AB und CD die chemischen Produkte AD und BC entstehen. Als Johann Wolfgang VON GOETHE durch den Chemiker Johann Friedrich August GÖTTLING (1753–1809) mit diesem Thema chemischer Wahlverwandtschaften vertraut gemacht wurde, begeisterte ihn diese Analogie zwischen dem Basisbereich menschlicher Beziehungen und dem Zielbereich chemischer Reaktionen so sehr, dass er kurzerhand Basis- und Zielbereich vertauschte und in seinem Roman *Die Wahlverwandtschaften* 1810 jene Auslösung einer chemischen Umsetzung durch größere „Affinität“ zweier in anderen Paarbindungen „gebundenen“ Elemente beschrieb: AB [Kalkstein, also in heutiger Nomenklatur CaCO_3] + verdünnte Schwefelsäure \rightarrow AD [Gips, also in heutiger Nomenklatur CaS=4] + „zarte luftige Säure“ [heute CO_2].

„Wenn Sie glauben, daß es nicht pedantisch aussieht, versetzte der Hauptmann, so kann ich wohl in der Zeichensprache mich kürzlich [kurz] zusammenfassen. Denken Sie sich ein A, das mit einem B innig verbunden ist, durch viele Mittel und durch manche Gewalt nicht von ihm zu trennen; denken Sie sich ein C, das sich eben so zu einem D verhält; bringen Sie nun die beiden Paare in Berührung: A wird sich zu D, C zu B werfen, ohne daß man sagen kann, wer das andere zuerst verlassen, wer sich mit dem andern zuerst wieder verbunden habe.“⁸⁴

83 Zur Geschichte dieser Äthermodelle des späten 19. Jahrhunderts siehe z. B. CANTOR und HODGE 1981.

84 J.W. VON GOETHE: *Wahlverwandtschaften*, zitiert nach der Weimarer Ausgabe 1887–1919, Abt. I, Bd. 20, S. 56; zum ideengeschichtlichen und wissenschaftshistorischen Hintergrund dieser Affinitäts-Analogie KLEIN 1994.

Diese damals so eingefahrene Redeweise von chemischen Affinitäten, durch die der Ausdruck „Affinität“ schon zu einer toten Metapher geworden war, hat die chemische Revolution jedoch nicht überlebt und kommt uns heute antiquiert und kurios vor. Dass einige lange für „tief“ gehaltene Analogien sich später als weniger tief denn erwartet herausstellen, impliziert übrigens nicht, dass alle diese Einschätzungen historisch so stark veränderlich sind. Im Gegenteil finden sich auch im naturwissenschaftlichen und technischen Bereich viele Analogien, von denen schon zum Zeitpunkt ihrer Formulierung klar war, dass sie „nur“ als „flache“ Analogien z. B. für Zwecke der Illustration und Popularisierung funktionieren können. Ein gutes Beispiel dafür wäre etwa Hans REICHENBACHS (1891–1953) hübscher Einfall, in seinem auf große Breitenwirkung hin konzipierten Buch über den Aufstieg der wissenschaftlichen Philosophie HEISENBERGS berühmt-berüchtigte Unschärferelation mit folgendem Analogon zu illustrieren: So wie ein Polizeiauto schon durch sein bloßes Auftauchen bereits Einfluss auf den Verkehrsfluss hat, den zu regulieren es die Aufgabe hat (z. B. dadurch, dass alle plötzlich ganz besonders langsam fahren, auch wenn das eigentlich vielleicht gar nicht erwünscht ist), so würde auch der Experimentator schon durch den Akt des experimentellen Eingreifens unwillkürlich Einfluss auf das untersuchte Objekt nehmen: “In our intercourse with electrons we cannot don civilian clothes; when we watch them we always disturb their traffic.”⁸⁵ Sehr schön erfasst wird durch diese illustrative Analogie die Unwillkürlichkeit, ja Unvermeidbarkeit einer Beeinflussung schon durch das bloße Da-Sein; über diesen einen Aspekt hinaus kann diese flache Analogie nicht ausgereizt werden, da sie dies und nur dies zu illustrieren beabsichtigt. Eine große Fülle ähnlicher „flacher“, aber dennoch illustrativ eingängiger Analogien findet sich beispielsweise auch in dem gelungenen Versuch einer Popularisierung der Ansätze und Ergebnisse neuester Stringtheorien durch die US-Physikerin Lisa RANDALL, darunter so einfallsreiche wie die zwischen der Kräfteverteilung in der gekrümmten Raumzeit und Sprinkler-Anlagen zur Bewässerung des Gartens oder die zwischen Strings einerseits und Gartenschläuchen aus dem Hubschrauber beobachtet, die dann ebenso eindimensional wirken wie die kompaktifizierten Zusatzdimensionen des Raumes bei niedrigerer Energieauflösung.⁸⁶

Waren alle bisherigen Unterscheidungen verschiedener Analogietypen deskriptiver Art, so schwingen im fünften Gegensatzpaar auch normative Töne mit, welche die eine Sorte von Analogien, nämlich die „flachen“, verdammen und die anderen, die „tiefen“, entsprechend in den Himmel zu loben scheinen. Auch wenn es zutrifft, dass erstere nur mit Vorsicht zu genießen und letztere anzustreben sind – es wird im allgemeinen keineswegs von vornherein klar sein, ob eine neu vorgeschlagene Analogie nun „tief“ oder „flach“ ist, da sich dieses oft erst nach einiger Zeit praktischen Umgangs mit jener Analogie erweisen wird.

ad (7.) Der Mathematiker John Maynard KEYNES (1883–1946) hat im Kontext seiner Diskussion des Induktionsproblems einen weiteren Unterschied benannt, nämlich den zwischen **positiven und negativen Analogien**.⁸⁷ Er meinte mit „positiven Analogien“ denjenigen Teil der Relationen, die beim Vergleich von Basis auf Zieldomäne übertragen werden kann, während „negative“ Analogien den bei diesem Vergleich nicht übertragbaren Anteil umfassen. Diese Redeweise ist insofern verwirrend, als streng genommen bei jeder Analogiebildung positive und negative Anteile vorhanden sein werden, so dass nicht die Analogie selbst, sondern nur

85 Siehe REICHENBACH 1957, S. 182.

86 Siehe RANDALL 2006, insbesondere S. 17, 35, 57, 66, 279, 282, ..., 444, 449 et passim.

87 Siehe KEYNES 1921, part iii, S. 217ff.

deren Anteile mit dem Gegensatz-Prädikat belegt werden. Die „tiefen“ Analogien der vorigen Unterscheidung sind somit solche, deren „positiver“ Anteil besonders hoch ist, während die „flachen“ demgegenüber einen hohen „negativen“ Anteil aufweisen. Ich schlage vor, diese Unterscheidung durch die auch umgangssprachlich besser eingefahrene und unmittelbar verständliche zwischen „Analogien“ und „Disanalogien“ abzulösen. Einen interessanten und an zahlreichen Beispielen illustrierten Vorschlag für eine graphische Notation, in der je drei verschiedene Grade der Güte von Analogien (von vollständig über unvollständig bis schwach) bzw. von Disanalogien (von geringer und mittlerer Unähnlichkeit bis hin zu extremer Unähnlichkeit) durch unterschiedlich lange und relativ zueinander parallel oder versetzt angeordnete Schlangenlinien symbolisiert werden, hat der Ingenieur Hermann DE WITT vorgelegt.⁸⁸

ad (8.) und (9.). Bezüglich der wissenschaftlichen Verwendung von Analogien wird jenseits aller Meinungsverschiedenheiten über deren Funktionieren von den allermeisten Autoren, und zwar Naturforschern wie Wissenschaftstheoretikern, die große faktische Bedeutung von Analogien bei der Findung neuen Wissens anerkannt. Der Verhaltensbiologe Konrad LORENZ (1903–1989) etwa machte die Bedeutung von Analogien als Quelle von Wissen Ende 1973 sogar zum Thema seines Nobelpreisvortrages.⁸⁹ Auch der für die wissenschaftliche Organisation des Manhattan-Projekts verantwortliche Vater der Atombombe Robert OPPENHEIMER (1904–1967), der ungarische Mathematiker Georg POLYA (1887–1985) oder die Chemiker August KEKULÉ (1829–1886) und J. H. VAN’T HOFF (1852–1911) haben diese kreative Rolle von Analogien bei der Findung von Neuem betont. Diese Hauptrolle von Analogien wird hier als **heuristische Funktion** bezeichnet. Eher selten sind Untersuchungen zum Einsatz von Analogien bei der **Illustration** bzw. **nachträglichen Rechtfertigung** von möglicherweise auf ganz anderem Wege gefundenem Wissen. Am Beispiel von Charles DARWIN (1809–1882) hat Michael RUSE aufgezeigt, dass DARWIN die Analogie zwischen künstlicher Zucht und natürlicher Selektion erst in der Phase des Ausbaus seiner Evolutionstheorie und ihrer Verteidigung gegen deren hartnäckige Kritiker weiter ausgeführt hat. Zwar sei diese Analogie bei der Genese der Evolutionstheorie latent immer schon vorhanden gewesen, doch sei sie erst in dieser späteren Phase voll aufgeblüht.⁹⁰ Eng verwandt mit diesem Rechtfertigungskontext, in dem DARWIN und seine Anhänger nach 1859 standen, ist auch der Vermittlungskontext der späteren Verbreitung von Wissen z. B. im Schul- und Universitätsunterricht. Auch dazu liegen bereits etliche Studien von Pädagogen und Entwicklungspsychologen vor, die u. a. untersucht haben, welche Bedingungen und Altersstufen vorliegen müssen, damit Analogien verschiedener Abstraktionsgrade von Lernenden verstanden werden können⁹¹ und in welchem Sinn Analogien als Lern- und Verständnishilfe fungieren können.⁹²

88 Siehe DE WITT 1972, insbesondere S. 36–39, sowie dort, S. 45–55, zu Ähnlichkeitsketten, -ringen u. a. Mustern; leider sind viele seiner Beispiele (z. B. dort, S. 111ff., zur „sozialen Gravitation“) nur mit Vorsicht zu genießen!

89 LORENZ 1973/74. Inhaltlich ist in diesem Vortrag besonders die Unterscheidung von Homologie und Analogie interessant; vgl. zu letzterem z. B. SCHARRER 1946 sowie hier den Beitrag von Olaf BREIDBACH.

90 Für Details siehe RUSE 1973; weitere Beispiele aus der Biologie bringt CANGUILHEM 1963. Schon PLATON und ARISTOTELES haben die Stärke der Analogie besonders in ihrer Überzeugungskraft gesehen: siehe dazu LLOYD 1966, S. 402, 408, und die dort angeführte Primärliteratur.

91 Siehe dazu z. B. HOLYOAK et al. 1984, TREAGUST 1992, KIPNIS 2005 sowie abstrakter ZEITOUN 1984.

92 Siehe z. B. WELLER 1970, HALPERN 1987, 1996, S. 83f., 374f., HALPERN et al. 1990, DUIT und GLYNN 1995, HERRMANN 2006, SCHMÄLZLE 2009 sowie hier den Beitrag von Lutz KASPER.

Allmähliche Erschließung von Analogien in der Ontogenese

Auf diesen Ergebnissen aufbauend haben die Kognitions- und Entwicklungspsychologen dann auch den Gebrauch von Metaphern als Funktion des Lebensalters untersucht, wobei sie feststellten, dass Kleinkinder Metaphern fast ausschließlich auf äußerliche Attribute beziehen, während mit fortschreitendem Alter ein *relational shift* zu immer stärker relationsbezogenen Metaphern stattfindet.⁹³ Ein Beispiel für ersteres wäre: “He had a pickle for a nose” oder die Bezeichnung eines Schreibstifts als “big needle”; demgegenüber wäre die Aussage: “The sun wakes the seeds” ein Beispiel für letzteres, da die Metapher des Aufweckens ein schon recht komplexes Wirkungsgefüge von Verborgensein des Samens in der Erde und seinem erst durch das Sonnenlicht hervorgerufenen Sprießen voraussetzt, welches Kleinkinder so nicht erfassen.⁹⁴ Die Fähigkeit, zwischen direkten (nicht-metaphorischen) und metaphorischen Vergleichen zu unterscheiden, zeigt sich in experimentellen Untersuchungen zur frühkindlichen Entwicklung etwa ab dem Alter von 4 – 5 Jahren, was auch so interpretiert werden kann, dass auf Analogiebildung fußende Klassifizierung von Objekten in etwa diesem Alter einsetzt.⁹⁵ Diese neueren Befunde rücken zwar Metaphern und Analogien wieder etwas enger zusammen,⁹⁶ sollten aber das oben zum Unterschied zwischen Metapher und Analogie Gesagte nicht vergessen lassen.

Aber nicht nur für Entwicklungspsychologen, sondern auch für Ethnologen, Literaturwissenschaftler und Wissenschaftshistoriker ist die Frage interessant, welche Typen von Analogien von welcher Gruppe als interessant oder berechtigt akzeptiert bzw. als unberechtigt zurückgewiesen werden. Gerade aus Disanalogien kann sehr wohl auch ergänzendes zu einer Theorie der Analogie entnommen werden, wie unlängst insbesondere Cameron SHELLEY durch Analyse einiger interessanter Beispiele gezeigt hat.⁹⁷ So zeigt sich auch hier wieder, *ex negativo*, dass diejenigen „flachen“ Analogien, deren Relationsnetz zu eng gespannt ist, in der Wissenschaftspraxis sehr schnell als „unbrauchbar“ weggeschoben werden, während viele andere denkbare Kandidaten von vornherein als Disanalogien wahrgenommen und als offensichtlich missbräuchliche Analogien gar nicht erst ernsthaft diskutiert werden.⁹⁸ Einen starken Kontrast zwischen **illustrativen und komparativen Analogien** baut die Anthropologin Ann Brower STAHL auf. Wenn zum Beispiel aus der äußerlichen Ähnlichkeit bestimmter Handwerkszeuge einer ausgestorbenen Kultur mit einer noch lebenden ohne weiteres auf eine Ähnlichkeit des Lebensstils oder bestimmter handwerklicher Praktiken geschlossen wird,⁹⁹ handelt es sich ihr zufolge um eine illustrative Analogie, mit der Ethnographie in die weit zu-

93 Siehe z. B. GENTNER und TOUPIN 1986, GENTNER 1988, HOLYOAK und THAGARD 1995, Kap. 4.

94 Für dieses Beispiel sowie etliche andere *relational shifts* im Laufe frühkindlicher Entwicklung siehe GENTNER 1988. Diese kindlichen Analogien erinnern an solche der frühen Neuzeit, etwa in FLUDD 1659, so dass sich hier eine gewisse Parallele zwischen Ontogenese und Phylogenese andeutet.

95 Siehe VOSNIADOU und ORTONY 1983, insbesondere S. 157; schon ab dem Alter von 3 Jahren waren Kinder in der Lage, sinnlose (anomale)Vergleiche zu erkennen, nicht aber, zwischen *literal* und *metaphorical* zu unterscheiden. Dieses spätere Aufkommen metaphorischen Verstehens wird auch bestätigt von WINNER et al. 1976.

96 In diesem Sinne etwa GENTNER und BOWDLE 2002, 2005 sowie der programmatische Beitrag von Dedre GENTNER u. a.: *Metaphor Is Like Analogy*. In GENTNER et al. (Eds.) 2001, S. 199–254.

97 Siehe SHELLEY 2002a und b.

98 Gute Beispiele für den Missbrauch von Metaphern und Analogien bei Henry ADAMS finden sich in MINDEL 1965, weitere Beispiele falscher oder irreführender Analogien in historischen Schriften bei FISCHER 1970, Kap. 9. Aber auch FISCHER zweifelt nicht daran: richtig eingesetzte “analogies are very useful explanatory tools” (S. 243).

99 Siehe zum folgenden STAHL 1993, S. 236–238 und 251, sowie ferner WYLIE 1988.

rückliegende Vergangenheit zurückgeschrieben würde. Demgegenüber würde ein bewusster Einsatz von Analogien, insbesondere auch eine vergleichende Betrachtung und Abwägung zwischen mehreren in die Vergangenheit ziehbarer Analogien sowie ein systematischerer Einsatz von in Zeitreihen gestuften Analogien die größten Fehler früherer Archäologie und Anthropologie verhindern. Auch sie plädiert für eine bewusste Einbeziehung von Disanalogien in diese vergleichende Bewertung der Plausibilität und Relevanz verschiedener denkbarer Analogien. Dass Analogien nicht nur in der Vergangenheit, sondern auch in der heutigen Naturwissenschaft und Technik intensiv eingesetzt werden, zeigen u. a. auch Untersuchungen von Wissenschaftssoziologen, die sich als Laborbeobachter in biochemische, molekularbiologische und hochenergiephysikalische Forschungslaboratorien begaben und dort den aktiven Gebrauch von Analogien in Gesprächen zwischen den Mitarbeitern und in den entstehenden Aufsätzen nachwiesen.¹⁰⁰

Kognitive Teilprozesse von Analogien

Von den Kognitionswissenschaftlern können wir als Wissenschafts-, Medizin- und Technikhistoriker/innen auch lernen, in welche zumindest psychologisch identifizierbaren Teilprozesse sich Analogiebildung gedanklich zerlegen lässt,¹⁰¹ wenngleich diese weitere Ausdifferenzierung bei historischen Analysen aufgrund der ohnehin schon schwierigen Quellenlage für diesen oft im verborgenen sich abspielenden Prozess vielleicht schwierig sein wird:

- (a.) Auffindung (*retrieval*) eines zu einer gegebenen Situation bzw. zu einem gegebenen Objekt ähnlichen bzw. „analogen“ im „Vorrat“ des im Gedächtnis gespeicherten Wissens;
- (b.) der eigentliche Transferprozess (*mapping*), in dem die Relationen dieses Vergleichsbereichs (*basis*) auf den Zielbereich (*target*) abgebildet werden;
- (c.) die Bewertung (*evaluation*) dieser nun gezogenen Analogie und ihrer Folgerungen;
- (d.) die Abstraktion der Basis- und Zielbereich zugrundeliegenden Struktur sowie deren Abspeicherung in der Wissensbasis (u. a. für spätere Analogiefindungen nach (a.)); das Ergebnis jener Abstraktion wird zuweilen auch Schema genannt, weil jene extrahierte Struktur „schematisch“ auf weitere Problemfälle angewendet werden kann;
- (e.) eventuell eine weitere Ausarbeitung, Verbesserung oder Modifikation jener Analogie, um einen noch besseren Fit zwischen den Strukturen von Basis- und Zielbereich zu erreichen, gefolgt von deren erneuter Abspeicherung, Bewertung, Abstraktion usw.

Dieses fünfstufige Schema ist iterativ hintereinanderschaltbar, und eine solche mehrfache Verbesserung von Analogien nach erfolgter Bewertung ist in vielen historischen Fallbeispielen auch erkennbar (vgl. hier u. a. die Beiträge von KRAFFT zu KEPLER sowie von HEIDELBERGER zu MAXWELL und HELMHOLTZ).

Gerade dieses ausdauernde Feilen, diese nachhaltige Denkarbeit an und mit Analogien ist meines Erachtens sogar eines ihrer Markenzeichen, auch im Unterschied zu den kurzlebigeren Metaphern und zu den diffuseren konzeptuellen Metaphern. Historisch besonders schlecht nachweisbar sind die Stadien (a.) und (d.): (a.), da diese Auffindung einer passenden Analogie oft sehr schnell und unerwartet vor sich geht und von den Akteuren wie eine plötz-

¹⁰⁰ Siehe etwa KNORR-CETINA 1980 und ähnliche Arbeiten von Klaus AMANN, Michael LYNCH u. a.

¹⁰¹ Zum Folgenden: GENTNER 1989, GENTNER et al. 2001b, GENTNER und COLHOUN 2009, preprint S. 3.

liche Eingebung beschrieben wird, während (*d.*), also die Abstraktion einer Struktur, umgekehrt sehr langsam abläuft und vielleicht sogar eher unbewusst erfolgt. Hingegen kann Phase (*b.*) anhand der von Akteuren vorgebrachten Begründungen für eine Analogie unmittelbar nachvollzogen werden, während die Stadien (*c.*) und (*e.*) in den Debatten, Kontroversen u. a. Auseinandersetzungen über vorgebrachte Analogien zwischen ihren Anhängern und Gegnern nachweisbar sind.

Dass Phase (*a.*) notwendig ist, bevor (*b.*) erfolgen kann, folgt jedoch schon aus rein logischen Gründen, denn nur wenn bereits ein Basisbereich ausgemacht wurde, kann ein Transfer von Strukturen aus diesem in den Zielbereich erfolgen. Doch experimentalphysikalischen Untersuchungen ist auch Phase (*a.*) durchaus zugänglich, wie die bereits oben erwähnten Studien von GICK und HOLYOAK an Probanden zeigen, bei denen die Wahrscheinlichkeit für die Auffindung einer Problemlösung von etwa 10 % bei völlig unvorbelasteten Probanden auf etwa 30 – 41 % stieg, wenn diese zuvor eine Lösung eines zum gegebenen Problem analogen Problems vorgelesen bekommen hatten. Die Wahrscheinlichkeit einer Auffindung jener Analogie stieg sogar auf rund 75 %, wenn die Probanden nach der Problemstellung auch noch einen Hinweis darauf bekamen, sich an die Lösung des vorigen Problems zu erinnern.¹⁰² Das zeigt, dass die Auffindung von passenden Analogien durch einen entsprechend großen Vorrat von strukturellen Schemata stark gefördert wird, was u. a. die Virtuosität mancher Naturforscher, Techniker und Mediziner in der Findung solcher Analogien erklären könnte.

Modelle in Abgrenzung zu Analogien

War bislang vorwiegend von dem Unterschied zwischen Metapher und Analogie die Rede, so möchte ich nunmehr noch kurz auf den Terminus „Modell“ zu sprechen kommen, wobei ich mich dabei im wesentlichen auf die Abgrenzung zur Analogie beschränken möchte.¹⁰³ In vielen Texten wird nur eine Unterscheidung zweier Grundtypen von Modellen gemacht, je nachdem, ob sie physisch-materiell vorliegen (*model_2*) oder nicht (*model_1*).¹⁰⁴ Diese Grundunterscheidung ist zwar unverzichtbar, reicht aber meines Erachtens noch nicht aus, denn ähnlich wie die Ausdrücke Metapher und Analogie changiert auch der Gebrauch des Wortes „Modell“ zwischen mindestens **fünf voneinander abgrenzbaren Bedeutungsebenen** hin und her:

- (*a.*) als umgangssprachliches Synonym für einen maßstäblich verkleinerten, häufig auch leicht vereinfachten Nachbau eines größeren Objekts (etwa das „Modell“ eines Gebäudes oder einer Maschine im Maßstab 1:100 in einem Museum); im Englischen sogenannte *scale models*;
- (*b.*) als Bezeichnung für physische Modelle, z. B. auseinandernehmbare Skelettmodelle der Anatomen, betastbare Silikon-Modelle der Mediziner zur Schulung der Früherkennung von Brustkrebs, oder chemische Modelle von Molekülen, in denen durch materielle Entsprechungen wie etwa Kügelchen für Atome und Stöckchen für chemische Bindungen

102 Siehe GICK und HOLYOAK 1980, 1983 sowie GENTNER und COLHOUN 2009, preprint S. 11.

103 Für ausführlichere Darlegungen siehe insbesondere HESSE 1954, 1959/60, 1966, 1967, LEATHERDALE 1974, Kap. 2, REDHEAD 1980, MÜLLER 1983, sowie zur Begriffsgeschichte KAULBACH 1984.

104 In diesem Sinne z. B. HESSE 1966, während LEATHERDALE 1974, S. 42ff., stärker differenziert; speziell zu meist verkleinerten *scale-models* in der Technik siehe WRIGHT 1992 sowie HOFFMANN und BERZ 2001, S. 265ff.

- räumliche Konfigurationen sowie Unterschiede erlaubter und nicht-erlaubter Anordnungen sicht- und tastbar erfahrbar gemacht werden können;¹⁰⁵
- (c.) dem Funktions-„Modell“ beispielsweise einer Dampfmaschine, aufgestellt etwa in einem technischen Museum oder auch als animiertes gif in einer Internetseite;
 - (d.) die mechanischen Modellvorstellungen zu nicht-mechanischen Prozessen beispielsweise in der Elektrodynamik des ausgehenden 19. Jahrhunderts,¹⁰⁶ bis hin zu
 - (e.) einer formal-strengen „Modelltheorie“ im Sinne von Alfred TARSKIS Metamathematik oder der mengentheoretischen Wissenschaftstheorie von Patrick COLONEL SUPPES (*1922), Wolfgang STEGMÜLLER (1923–1991) und Konsorten.¹⁰⁷

Zur klareren Abgrenzung dieser Ebenen sollte der unqualifizierte Modellbegriff nur im Sinn der formalisierten Ebene (e.) verwendet werden. Für die Beispiele unter (a.) sollte man den präziseren Terminus **Skalenmodell** benutzen, die Beispielklasse (b.) wird durch den oben schon eingeführten Begriff des **materiellen Modells** abgedeckt, während die Beispiele unter (c.) und (d.) demgegenüber **Funktionsmodelle** verschiedener Abstraktionsstufe darstellen – bei (c.) noch unter erkennbarer Beimengung einer Skalierungsebene, die auf Ebene (d.) weiter zugunsten der Abbildung von Funktionsrelationen zurückgedrängt wird. Aufgabe der physisch-herstellbaren mechanischen Funktionsmodelle des 19. Jahrhunderts war in erster Linie die Veranschaulichung abstrakter Prozesse wie etwa der Entstehung und Ausbreitung elektromagnetischer Felder oder hydrodynamischer Wirbel; Veranschaulichung dabei keineswegs nur im Sinne einer populär-verkürzten Darstellungshilfe für den Schul- und Hochschulunterricht, sondern durchaus auch als eigene Verständnishilfe der Forscher bei der tieferen Durchdringung ihres Gegenstandes. William THOMSON (1824–1907) hat einmal gesagt, er verstünde einen physikalischen Prozess erst, wenn er sich davon ein mechanisches Modell gemacht habe.¹⁰⁸ Umgekehrt hat der theoretische Physiker, Wissenschaftshistoriker und -theoretiker Pierre DUHEM (1861–1916) als erklärter Gegner mechanischer Modelle diese abwertend als eine besonders krude Form der Analogie abklassifiziert.¹⁰⁹ Funktion abstrakt-mathematischer Modelle in den Naturwissenschaften des 20. Jahrhunderts war (und ist) hingegen die Eingrenzung eines komplexen Problems durch künstliche Beschränkung des Gegenstandsbereiches auf eine geeignete Unterklasse, an der ein zu studierender Prozess klarer untersucht und genauer mathematisch „modelliert“ werden kann. Diese Modellierung erfolgt übrigens fast immer im Hinblick auf übergeordnete Theorien, mit denen Modelle jedoch nicht

105 Siehe dazu nochmals FRANCOEUR 1997 sowie hier das unter Anm. 76 angeführte Zitat.

106 Siehe dazu z. B. KLEIN 1972, MOYER 1977 sowie die folgenden Fußnoten für weitere Hinweise; noch Ludwig BOLTZMANN hat um die Jahrhundertwende Modell nur im Sinne einer physischen Repräsentation verwendet: siehe BOLTZMANN 1902/11 sowie BOLTZMANN 1892, S. 309, 360ff., 405ff., für einige eigene Modellkonstruktionen; allgemeiner zur Funktion mechanischer Modelle und zur Verschiebung des Modellbegriffs im 20. Jahrhundert: HUTTEN 1953/54, JAMMER 1965 und BAILER-JONES 2005.

107 Siehe dazu z. B. WOLTERS 1995 und dortige Literaturhinweise. STEGMÜLLER 1986, S. 46ff. definiert Theorien T mengentheoretisch als geordnetes Paar eines Theoriekerns K und intendierter Anwendungen I, wobei in diesen Theoriekern K wiederum unter anderem Modelle M der Theorie eingehen, definiert als diejenigen potentiellen Modelle M_p der Theorie, die die Fundamentalgesetze der Theorie T erfüllen. Theorien beinhalten in diesem strukturalistischen Theorienkonzept also *per definitionem* stets Modelle als Teilmengen ihrer selbst.

108 Siehe THOMSON 1884/1987, S. 206: “I never satisfy myself until I can make a mechanical model of a thing. If I can make a mechanical model, I can understand it. As long as I cannot make a mechanical model all the way through I cannot understand.”

109 Siehe DUHEM 1906/78 S. 93ff. sowie dazu ferner kritisch BERGGREN 1962/63, S. 454f., MELLOR 1968.

verwechselt werden sollten.¹¹⁰ Eine mir sinnvoll und wichtig erscheinende Form der Abgrenzung zwischen Modell und Theorie läuft darauf hinaus, Modelle (hier im Sinne von (e.)) als partielle Interpretationen von Theorien aufzufassen. So kann man z. B. Atome im Verband eines Gitters, was ihre Schwingungseigenschaften angeht, als harmonischen Oszillator modellieren, womit freilich nur ein Teil ihrer Eigenschaften erfasst wird, so dass alternativ dazu z. B. auch die Modellierung als Rotator möglich ist, womit ein anderer Freiheitsgrad erfasst wird. Die übergeordnete Bezugstheorie dabei ist entweder die klassische Mechanik oder, falls genauere Betrachtungen gemacht werden sollen, für die die Quantisierung der Energie u. a. nichtklassische Quanteneigenschaften wichtig werden, die Quantenmechanik. Im Rahmen einer Theorie sind fast immer mehrere verschiedene Modelle ein und des gleichen Systems möglich, die sich untereinander in ihrer Akzentuierung bzw. Auswahl relevanter Eigenschaften, aber auch in ihrer Genauigkeit oder in anderen pragmatischen Kriterien unterscheiden werden. Nach oben hin, in Richtung immer weiter zunehmender Abstraktion, kann sich dieses zwiebelförmige Ineinander von Modell und Theorie fortsetzen:

“Each model provides a partial interpretation of atomic theory and represents, so to speak, a certain viewpoint; we have multiple interpretations of a higher theory in terms of a simpler theory. Similarly, we may have many auxiliary models within a single theory; usually, they overlap and are mutually compatible though, on occasion, the models are alternatives.”¹¹¹

Sucht man nach **Gemeinsamkeiten zwischen diesen verschiedenen Typen von Modellen** der Klassen (a.) – (e.), so stößt man auf folgende Punkte:

- (1.) die hohe Komplexität all dieser „Modelle“ (im Unterschied zu Analogien und Metaphern);
- (2.) die bewusste Auswahl eines Teilaspekts des Zielbereiches, der in dem Modell erfasst werden soll (nur für diesen Teilbereich wird die Isomorphie des Modells und seines Gegenstands behauptet); sowie damit zusammenhängend dann auch
- (3.) die Zweckgerichtetheit all dieser Modelle (sie alle werden für einen bestimmten Zweck hergestellt bzw. entwickelt, und sie sind sinnvoll auch nur dafür verwendbar);
- (4.) die Uneindeutigkeit jedes Modells (andere „Modelle“ des gleichen Gegenstands sind „denkbar“ und meist gibt es auch etliche solche miteinander konkurrierenden Modelle).

Der Punkt (1.) grenzt Modelle bereits klar ab gegenüber Metaphern, die im Unterschied dazu eher einfache Form haben. Ferner zielen letztere auch nie auf die Behauptung einer Isomorphie, sondern verbleiben auf der Ebene vager Ähnlichkeitsbehauptungen in einem sehr eingeschränkten Bereich übertragbarer Attribute. Demgegenüber ist die möglichst weitgehende Übertragung ganzer Relationsnetze eine Gemeinsamkeit von Analogien und Modellen. Trotzdem bleibt es irreführend, von „Analogiemodellen“ zu reden, wie dies leider selbst in der *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie* der Fall ist. Was mit diesem Ausdruck gemeint ist, sind tangible oder zumindest doch visualisierbare Modelle, in denen Analogien zwischen Basis und Target ausgenutzt werden, um (vgl. Punkt 3.) den Zielbereich damit besser zu verstehen, also etwa, um die damals noch unvertrauten Prozesse der Elektrodyna-

110 Zur Abgrenzung von Modell und Theorie siehe die in Anm. 105f. genannten Texte sowie BRAITHWAITE 1962/70, REDHEAD 1980, S. 146: “The model is proposed in the framework of some more basic theory or theories.” Historische Beispiele aus der Geschichte der Optik gibt PSILLOS 1995, während CARTWRIGHT et al. 1995 mit der Supraleitung ein Beispiel behandeln, in dem eine übergeordnete Theorie für die Modellierung lange Zeit fehlte.

111 Siehe HUTTEN 1953/54, Zitat S. 298 sowie die in Anm. 107 genannte formalisierte Wissenschaftstheorie.

mik durch das Ineinandergreifen verschiedener Typen von Zahnrädern und anderer *gadgets* quasi-mechanisch zu veranschaulichen. Dies war weit mehr als nur eine nachträgliche „Illustration“ oder Popularisierung – es war ein heuristisches Hilfsmittel beim „Durchdenken“ dieser Prozesse, das z. B. in Gestalt des berühmten Verschiebungsstroms von James Clark MAXWELL (1831–1879)¹¹² auch ganz konkrete Früchte getragen hat.¹¹³ Die dem Modell zugrundeliegende Analogie – bei MAXWELL z. B. die zwischen der Kopplung elektrischer und magnetischer Felder einerseits und dem mechanischen Ineinandergreifen verschieden großer Zahnräder andererseits – ist dabei eine nur partielle: es wird nicht nur von der mechanischen Reibungskraft abstrahiert, sondern auch von einem dreidimensionalen Prozess elektromagnetischer Feldausbreitung auf ein nur zweidimensional modellierbares Modell reduziert, aber dieser Nachteil wird kompensiert durch das plötzlich durch das mechanische Modell eintretende Verständnis dafür, warum diese Ausbreitung magnetischer Felder in Materie mit dem Auftreten von elektrischen Strömen gekoppelt ist und umgekehrt.¹¹⁴ Ludwig BOLTZMANN hat die eigentliche Pointe dieser Äthermodelle von MAXWELL u. v. a. (darunter auch ein von ihm selbst vorgeschlagenes) wunderbar auf den Punkt gebracht: „Sie alle zeigen, wie die neue Richtung den Verzicht auf vollständige Congruenz mit der Natur durch um so schlagenderes Hervortreten der Ähnlichkeitspunkte wettmacht.“¹¹⁵ Damit bestätigt BOLTZMANN auch klar den zweiten meiner obigen Punkte. MAXWELLS und LODGES Äthermodelle waren nicht materielle Modelle im Sinne der obigen Ebene (*b.*), auch wenn vielleicht vereinzelt tatsächliche materielle Modelle dieser Art zur Veranschaulichung für Unterrichtszwecke gebaut wurden, sondern Funktionsmodelle *à la* Ebene (*d.*) und die hervortretenden „Ähnlichkeiten“ waren solche des funktionalen Ineinandergreifens und Miteinander-Verkettet-Seins von Feldern, nicht irgendwelche materiellen oder äußerlichen Ähnlichkeiten.

Model Building um die Jahrhundertwende

Unter Wissenschaftshistorikern ist es anerkannt, dass die Viktorianische Physik insgesamt und die Maxwellsche Physik im besonderen eine Hochphase des konstruktiven Einsatzes von ausgefeilten mechanischen Modellen dargestellt hat.¹¹⁶ Gerade weil damals diese Methode der Analogiebildung und der darauf aufbauenden Modelle so beliebt war, entstanden eine Fülle verschiedener und vielfach auch direkt miteinander konkurrierender Modelle. Es wäre vermessen gewesen, von irgend einem dieser Modelle zu behaupten, dass dieses in Gänze alle Eigenschaften des jeweiligen Zielbereiches, also z. B. der Hydro- oder Elektrodynamik,

112 Siehe MAXWELL 1855 und 1862, CHALMERS 1986, CAT 2001 und die in den folgenden Anmerkungen genannten Texte, ferner den Beitrag von Michael HEIDELBERGER in diesem Band.

113 Siehe BOLTZMANN (1892; zitiert bereits oben in Anm. 63), dort insbesondere S. 96 darüber, dass MAXWELLS Formeln lediglich „Consequenzen seiner mechanischen Modelle waren“ und sich erst 1865 „von seinem Modelle los“ schälten.

114 Zu MAXWELLS berühmten Äthermodell im einzelnen siehe u. a. SIEGEL 1991, WISE 1979, HARMAN 1982, Kap. IV, CAT 2001, dort jeweils gegebene weiterführende Literaturhinweise.

115 BOLTZMANN 1892, S. 97f.; ein anderes schönes Beispiel, das Seifenhaut-Modell zur Darstellung von Torsionsspannungen in festen Körpern, das physisch nachbaubar, aber auch mathematisierbar ist, gibt PRANDTL 1904; zur optisch-mechanischen Analogie bei William Rowan HAMILTON: HANKINS 1980, Kap. 14.

116 Siehe neben den in den vorigen Anmerkungen erwähnten Texten u. a. KARGON 1969 sowie NERSESSIAN 2002 und hier den Beitrag von Michael HEIDELBERGER (notabene: Einsatz von Analogien in Modellen, nicht „Analogiemodelle“).

abzubilden vermöge, und keiner der Akteure hat diesen Anspruch erhoben. Durch diese Pluralität, ja diese Proliferation von Modellen wurden umgekehrt diejenigen Strömungen der damaligen Erkenntnistheorie gestärkt, die von einer Korrespondenztheorie der Wahrheit abzugehen bereit waren und eine Konventionalität menschlicher Erkenntnismittel betonten, also z. B. Heinrich HERTZ' Bildtheorie, Henri POINCARÉ'S Konventionalismus, Charles Sanders PEIRCES Pragmatismus und Percy W. BRIDGMANS Operationalismus. Der von Gregor SCHIEMANN 1997 vorgeschlagene Terminus „Wahrheitsgewißheitsverlust“ trifft diese Tendenz genau, auch wenn er diese Entwicklung eher am Beispiel von Hermann VON HELMHOLTZ und seiner Schüler nachzeichnet. Einer dieser Schüler war Heinrich HERTZ (1857–1894), der zwar im Unterschied zu seinen Zeitgenossen auf den Modellbegriff verzichtete, dafür aber den Begriff des „Bildes“ einführte, der als in etwa äquivalent zu „mentalem Modell“ interpretiert werden sollte und von HERTZ folgende Rolle zugesprochen bekam:

„Wir machen uns innere Scheinbilder oder Symbole der äußeren Gegenstände, und zwar machen wir sie von solcher Art, daß die denotwendigen Folgen der Bilder stets wieder die Bilder seien von den naturnotwendigen Folgen der abgebildeten Gegenstände. [...] Die Bilder, von denen 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.“¹¹⁷

Auch hier also, wie schon bei MAXWELL, FITZGERALD und BOLTZMANN, der Verzicht auf vollständige Kongruenz und die Reduktion der Abbildungs- oder Ähnlichkeitsrelation zwischen Bild und Abgebildeten (bzw. zwischen mentalem Modell und Modelliertem) auf eine selektive Gruppe von Relationen, hier bei HERTZ speziell die Kausalrelation. Nur in der denotwendigen Abfolge zweier Bilder aufeinander sollen diese mit der *qua* natürlicher Kausalität garantierten Abfolge zweier abgebildeter Gegenstände oder Prozesse aufeinander übereinstimmen. Dann und nur dann ist ein Bild (im Sinne von HERTZ) bzw. ein mentales Modell (im Sinne unseres Verständnisses) zulässig, wenn diese Übereinstimmung der Kausalrelation gegeben ist; neben diese semantische Minimalbedingung treten dann noch syntaktische und pragmatische Kriterien der Widerspruchsfreiheit und Einfachheit, mit denen *verschiedene* Bilder (bzw. Modelle) miteinander verglichen und gegebenenfalls Präferenzen begründet werden können.¹¹⁸

Insgesamt ergibt sich somit aus systematischen Überlegungen ebenso wie auch nach Analyse erster historischer Beispiele eine klare Stufenabfolge Metapher – Analogie – Modell – Theorie: Analogien unterscheiden sich von Metaphern durch die Symmetrie der durch die Analogierelation ausgedrückten Beziehung zwischen Basis und Zielbereich, während Metaphern eine einseitig gerichtete und verkürzte Form eines *similes* sind. Analogien unterscheiden sich auch von Modellen darin, dass letztere wiederum stärker asymmetrisch angelegt sind: sowohl mechanische wie auch mentale Modelle repräsentieren und „modellieren“ einen Gegenstand des eigentlichen Interesses, das *target*, durch partielle Abbildung einiger durch die jeweilige Fragestellung ausgezeichneten Relationen, um dadurch etwas über dieses *target* zu lernen. Integraler Bestandteil vieler Modelle sind Analogien; obwohl letztere keineswegs

117 HERTZ 1894, S. 1; zum Bildbegriff ferner „Bild“ in Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie, Stuttgart: Metzler, Bd. 1, 1995, S. 312, sowie D'AGOSTINO 1990.

118 Vgl. dazu HENTSCHEL 1998 und die dort angeführte Literatur.

zwingender Bestandteil von Modellen sind, gaben vielfach doch erkannte Analogien zweier Objekte oder Prozesse den Ausschlag für die Entwicklung komplexer Modelle von einem dieser Gegenstandsbereiche. Entwicklungspsychologisch wie auch wissenschaftshistorisch lassen sich Erweiterungen von Metaphern zu Analogien, von Analogien zu Modellen sowie schließlich auch von Modellen zu Theorien nachweisen, ferner auch eine Tendenz zur schrittweisen Erhöhung des Abstraktionsgrades von Analogien und Modellen mit fortschreitendem Entwicklungsgrad. Im Folgenden werden wir diese Unterscheidungen an einigen wissenschaftshistorischen Beispielen weiter vertiefen.

Analogien verschiedener Güte

Um zu zeigen, wie differenziert Unterscheidungen wie die im vorigen referierte zwischen „flach“ und „tief“ mitunter auch von den Akteuren selbst getroffen wurden, sei hier der Maxwellianer George Francis FITZGERALD (1851–1901) angeführt, dessen gesamtes Werk von Analogien und Modellen durchzogen ist.¹¹⁹ In einem Aufsatz über „models and likenesses“¹²⁰ unterschied FITZGERALD systematisch zwischen der ungeheuren Fülle denkbarer Modelle des Äthers, wie er selbst und viele seiner Zeitgenossen sie in dieser Zeit erdacht hatten,¹²¹ und einigen wenigen Modellen, die weitergehenden, portraitähnlichen Anspruch auf Übereinstimmung mit der Wirklichkeit hätten. Erstere waren für ihn „nur“ Modelle, während letztere von ihm emphatisch als *likeness* bezeichnet wurden, dem englischen Ausdruck für Portrait. Nur *likenesses* verfügen über das, was er selbst als *verisimilitude* bezeichnete, also wörtlich übersetzt „Wahrheitsähnlichkeit“, und zwar deswegen, weil nur diese tiefen Analogien in so überraschend vielen Punkten Entsprechungen miteinander haben, dass eine Art „unvollständiger“ Induktion von dem Übereinstimmen aller bisherigen Relationen auf das zukünftige Übereinstimmen aller weiteren, erst noch zu bestimmenden Relationen zu erwarten wäre. Selbstverständlich war sich auch FITZGERALD bewusst, dass diese Extrapolation vom Bekannten auf das Unbekannte riskant blieb, darum spricht er auch nicht von „Wahrheit“, sondern von „Wahrheitsähnlichkeit“, also etwas der Wahrheit nur nahekommendem. Damit zeigt sich bei FITZGERALD genau die oben bereits aus systematischen Erwägungen heraus geforderte Differenzierung zwischen Analogien und Modellen. Auch die folgende Passage aus seinem postum veröffentlichten Aufsatz zur Funktion von Modellen zeigt, wie er zwischen Modell und Analogie differenziert: Analogien werden in Modellen aktiviert.

“In the case of a mechanical model of the ether, we have before us a structure which we may easily conceive, and with the method of whose working we are familiar; and so we can reason about it and discover what it should do without being troubled at every turn

119 Siehe z. B. FITZGERALD 1884.

120 FITZGERALD ca.1888/1902, S. 142ff.

121 1885 hatte FITZGERALD selbst u. a. ein Modell konstruiert, dass aus einem System von Messingrädern mit massivem Rand bestand, die auf festen Achsen drehbar und durch Gummibänder gekuppelt sind, während sein Zeitgenosse Oliver LODGE eine doppelte Serie von direkt in einander greifenden Rädern vorgeschlagen hatte; siehe Oliver LODGE 1896, S. 324f., vgl. DYCK 1892, S. 400f., sowie zahlreiche Abbildungen dazu in STACHOWIAK 1983, Kap. X und XI über „mechanische Modelle“, S. 224–270. Auch MAXWELL selbst hatte sich mit ähnlichen Vorschlägen für ein „System von Zahnrädern“ bereits 1862 beteiligt: „Von unserem gegenwärtigen Gesichtspunkte aus erscheint also die Beziehung eines elektrischen Stromes zu seinen Krafterlinien analog der eines Zahnrades oder einer Zahnstange zu den Rädern, in welche sie eingreift.“

to realize our analysis, for the realization is so easy and familiar that it gives our minds no trouble. [...] A model of the ether is like a complicated algebraic formula that can be interpreted in terms of a known analogy so as to represent the laws of a surface; it is not like the surface, but we may deduce the laws of one from the other if we attend to the laws of the analogy.”¹²²

Auch, wenn einige Leser dieses Aufsatzes FITZGERALDS Korrespondenztheorie der Wahrheit nicht teilen sollten, die seinem Ansatz implizit zugrunde liegt, bleibt festzuhalten, dass es systematisch gesehen einen erkennbaren Unterschied zwischen „flachen“ und „tiefen“ Analogien gibt, wobei letztere sich dadurch auszeichnen, dass in ihnen sehr viel mehr „drin steckt“ als anfänglich zu vermuten war, oft sogar, ohne dass zu dem Zeitpunkt, in dem eine Analogie als „tief“ empfunden wird, ein Ende dieser Ausreizbarkeit erkennbar wäre. Allerdings warnt FITZGERALD auch davor, eine Analogie, und sei sie noch so tief, zu überdehnen:

“We must not press analogies too far. To suppose that the ether is at all *like* the model I am about to describe would be as bad a mistake as to suppose a sphere at all like $x^2 + y^2 + z^2 = r^2$ and to think that it must in consequence be made of paper and ink.”¹²³

Als Beispiel dafür, wie ein und derselbe Gegenstand nacheinander Basis „flacher“ und „tiefer“ Analogien darstellen kann, sei hier nochmals das Planetensystem angeführt. Bei einem populären Autor der Aufklärungszeit wie Francesco ALGAROTTI (1712–1765) wird z. B. das Planetensystem in Analogie zur Monarchie gebracht.¹²⁴ Die Sonne solle man sich als *Souverain* eines immens großen Reiches vorstellen, dessen *Seigneurs* und Barons die Hauptplaneten darstellen. Einige von ihnen würden eigene Domänen verwalten, auf denen im Kleinen die gleiche Jurisdiktion gelte, wie der *Souverain* sie im großen Reich auch walten lasse, denn in beiden würden kleinere die größeren umrunden, um ihnen den Hof zu machen. Unsere Erde sei nur ein kleines Reich, in dem lediglich ein Mond sich die Mühe dieser Umrundung mache, gar nicht zu vergleichen mit den viel größeren Reichen eines Jupiter oder Saturn, die beide sehr viel mehr Vasallen hätten.

Trotz des gefälligen Bildes einer Umkreisung des Königs durch seinen Hofstaat, das an höfische Schreittänze und anderes Zeremoniell denken lässt und wie angegossen auf den von ALGAROTTI primär avisierten Leserkreis der gebildeten Hofdamen passte, bleibt seine Analogie doch „flach“, denn es gibt nur eine recht kleine Zahl wirklich übertragbarer Relationen. *In puncto* Kurzatmigkeit handelt es sich eher um eine Art rhetorisch ausgeschmückter Metapher, wie diese nur für den Augenblick, den Effekt konzipiert. Entsprechend kurzlebig war die Wirkung dieser Analogie, die ebenso schnell wie ALGAROTTIS Traktat der Vergessenheit anheimfiel. ALGAROTTIS Analogie hatte keinerlei Systematizität, sondern verblieb auf der Ebene bloßer Illustration, wie dies übrigens für viele Analogien im populärwissenschaftlich-vermittelnden Kontext gilt.

122 FITZGERALD 1888/1902, S. 168.

123 Ebenda, S. 169 (Hervorhebung Orig.).

124 ALGAROTTI 1738 (Orig. ital.), hier Bd. 2, S. 192f.; weitere dort behandelte Analogien betreffen z. B. die Ausbreitung von Licht und Schall in der Physik von Nicolas MALEBRANCHE (1638–1715) (ebenda, S. 259) oder die zwischen der Erzeugung von Farben und anderen Körpern (ALGAROTTI 1738, Bd. 1, S. 152).

Die Analogie als Argument und rhetorische Waffe

Dass dies keineswegs so sein muss, zeigt u. a. das Beispiel von Galileo GALILEI (1564–1642), der in seinen Texten für eine breite Öffentlichkeit wie etwa dem *Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme*, in dem er sich für das kopernikanische und gegen das hergebrachte ptolemäische Weltbild einsetzte, eine Vielzahl von z. T. sehr raffinierten Analogien nutzte, stets mit dem übergeordneten Ziel, seine Leser von der Überlegenheit des Heliozentrismus zu überzeugen, also ganz eindeutig im Kontext der Überzeugung noch unentschlüsselter Leser, nicht im heuristischen Kontext einer eigenen Suche nach Neuem.¹²⁵ Integraler Teil dieses heliozentrischen Weltbildes von Nikolaus KOPERNIKUS (1473–1543) war die aus der Annahme, dass die Sonne im Mittelpunkt des Sonnensystems liegt, folgende Implikation, dass auch die Erde ein Planet analog anderen damals bekannte Planeten wie etwa dem Mars, der Venus oder dem Jupiter ist. Um dieses argumentative Ziel zu erreichen, nutzte GALILEI im *Dialogo* u. a. den von ihm neuentdeckten Umstand der Existenz von Jupitermonden und machte daraus folgendes Analogieargument:¹²⁶

Analog zur Erde, die vom Mond umkreist wird, wird auch der Jupiter von Monden umkreist, sogar von vier verschiedenen Monden.

Der Jupiter ist ein Planet. ~> Auch die Erde ist ein Planet wie der Jupiter.

Eine andere Form der Analogiebildung war folgende:

Die Erde wird vom Mond umkreist ~> also ist der Mond ein Planet der Erde.

Tatsächlich wurde der Mond in der antiken und mittelalterlichen Taxonomie aus genau diesem Grund stets unter die Gruppe der Planeten gezählt. Analog dazu gilt folgendes:

Die Sonne wird von der Erde umkreist ~> also ist die Erde ein Planet der Sonne.

Freilich: keines dieser Analogieargumente war zwingend. Viele Relationen von Objekten sind partiell aufeinander abbildbar, ohne dass aus diesen partiellen Analogien zwingend folgt, dass diese Objekte wirklich von ein und der selben Art sind, wie GALILEI es hier behauptet. Doch er hatte noch weitere Analogien zu verbuchen, die sein Argument unterstützten:

Der Mond zeigt auf seiner Bahn um die Erde Phasen, die von der partiellen Beschattung des Mondes durch die Erde herrühren.

Analog dazu hatte er nun mit seinem Teleskop beobachtet:

Die Venus zeigt auf ihrer Bahn um die Sonne Phasen. Woraus er dann folgerte:

~> also kreist die Venus um die Sonne (und nicht Venus und Sonne um die Erde).

Während alle bisherigen Analogieargumente nur die Kinematik des Sonnensystems betreffen, also die Frage, wer wen umkreist, fanden Analogieargumente bei GALILEI auch noch tiefer

125 Mit dieser Anspielung auf die oft angegriffene Unterscheidung Hans REICHENBACHS zwischen Entdeckungs- und Rechtfertigungskontext soll nicht behauptet werden, dass hier eine analytische Dichotomie vorliegt, wohl aber, dass es einen Unterschied macht, ob Analogien zur Erkenntnisfindung oder zur Verteidigung bereits gefundener Erkenntnisse eingesetzt werden.

126 Zum nachfolgenden siehe GALILEI 1632/1891/1982, hier insbesondere erster Tag. Zur Theorie der Analogie als Argumentation siehe hier den Haupttext weiter unten.

gehenden Einsatz als Mittel zur Aufbrechung der Aristotelischen Ontologie, die rigide zwischen supra- und sublunaren Objekten unterschied:

Erstere, ~> also alle Himmelsobjekte, waren ewig, unzerstörbar und vollkommen.

Letztere, ~> also alles Irdische, war vergänglich, unvollkommen und mit Reibung behaftet.

GALILEI beobachtete nun aber Folgendes:¹²⁷

Die Erde hat Krater, Berge, Vulkane und andere Unebenheiten der Oberfläche. Mit dem Teleskop hatte er ebensolche Krater und Berge auf dem Mond beobachtet; ~> also sind Erde und Mond analog zueinander.

Auch die Sonne hatte periodisch auf- und abschwellende dunkle Flecken; ~> also ist nicht nur der Mond (Krater, siehe oben), sondern auch die Sonne unvollkommen.

Mit diesen zuletzt angesprochenen Analogien eröffneten sich für GALILEI und KEPLER völlig neue Möglichkeiten in Richtung einer vereinheitlichten Mechanik von Himmel und Erde, die ihren Vorgängern schon aus ontologischen Gründen verwehrt geblieben waren, da sie kategorisch außerhalb des ihnen Denkmöglichen lagen.¹²⁸ Analogien vermögen also, ontologische Schranken zu durchbrechen. Dadurch schaffen sie die Option für neue Wissensorganisation.

Bohrs Analogie der Atomstruktur mit dem Planetensystem

Kontrastieren wir das Beispiel einer „schlechten“ Analogie bei ALGAROTTI noch mit der Verwendung des Planetensystems als Basis einer „guten“ Analogie beim dänischen Physiker Niels BOHR (1885–1962). Schon während seiner Ausbildung an der Universität Kopenhagen kam er in Kontakt mit dem dänischen Philosophen Harald HØFFDING (1843–1931), einem der tiefstinnigsten Wissenschaftstheoretiker der Analogie aller Zeiten. Inwieweit BOHR durch diese Grundausbildung im Rahmen des in Dänemark damals noch vorgeschriebenen Philosophikums für Naturwissenschaftler mit HØFFDINGS speziellen Ausführungen über Analogien in Kontakt kam, ist in der Historiographie bis heute umstritten.¹²⁹ Sicher ist allerdings, dass BOHR ein Lehrbuch von HØFFDING über Logik gründlich durcharbeitete und ihn auf einen Fehler hinwies, so dass von einer Kenntnis zumindest der Grundlinien von HØFFDINGS Philosophie auszugehen ist. Der Umstand, dass HØFFDING in mehreren Schriften die entscheidende Rolle von Analogien bei Denkvorgängen in der Wissenschaft ebenso wie im Alltagsdenken betonte¹³⁰ und Analogien 1924 sogar ein eigenes Buch widmete, dürfte auch seinen Studenten BOHR für den sinnvollen Gebrauch von Analogien sensibilisiert haben. Von seinem Mentor während eines *Postdoc*-Aufenthalts in Manchester, Ernest RUTHERFORD (1871–1937), übernahm BOHR die Idee, dass das Atom anders als damals allgemein angenommen in einem

127 Über GALILEIS Beobachtungen von 1609 und 1610 siehe GALILEIS *Sidereus Nuncius* (1610) in dt. Übersetzung (1980).

128 Tatsächlich finden sich erste Indizien für das Aufbrechen der Aristotelischen Grundunterscheidung zwischen supra- und sublunar schon bei den Impetustheoretikern des 14. Jahrhunderts und bei PHILOPONOS im 6. Jahrhundert n. Chr. siehe dazu HENTSCHEL 2009 und dort angeführte Primär- und Sekundärliteratur. Zu KEPLER siehe hier den Beitrag von Fritz KRAFFT und dort genannte weiterführende Literatur.

129 Siehe dazu die Debatte zwischen FAVRHOLDT 1992 und FAYE 1991 sowie HENTSCHEL 1994.

130 Siehe z. B. HØFFDING 1905: “All our knowledge, the spontaneous as well as the scientific, is therefore full of analogies” (S. 201) und “every formation of a general concept proceeds through analogy” (S. 202).

sehr kleinen und positiv geladenen Atomkern besteht, dessen Ladung durch negativ geladene Elektronen kompensiert wird. An diesem Punkt setzt nun die Modellierung eines solchen Systems durch BOHR an: Wie konnten diese negativ geladenen Elektronen um den positiven Kern verteilt sein, ohne durch elektrostatische Anziehung in den Kern hinein gezogen zu werden? Eine altbekannte Analogie der elektrostatischen Anziehung mit der Gravitation half ihm weiter: denn wodurch wurde ein analoges Hineinstürzen der Planeten auf die Sonne verhindert? Nur durch deren Bewegung, konkret: durch deren Umlauf um die Sonne, der eine Zentrifugalkraft erzeugt, die der anziehenden Gravitationskraft zwischen Planet und Sonne entgegenwirkt. Alle Bahnen der Planeten um die Sonne ergaben sich aus genau dieser Gleichsetzung zweier Kräfte. Diese harmlose Analogie zwischen Elektrizität und Gravitation leitete BOHR also auf ein Modell des Atoms, demzufolge die Elektronen auf ebensolchen Bahnen um den Atomkern kreisen. Schon jetzt sehen wir eine ganze Reihe von Ähnlichkeitsrelationen,¹³¹ wie dies für „gute“ Analogien im Unterschied zu Metaphern ja typisch ist:

Atomstruktur	~	Sonnensystem
Atomkern	~	Sonne
Elektronen	~	Planeten
Elektronenbahnen	~	Planetenbahnen
elektrostatische Anziehung	~	Anziehung zweier Massen
Elektrizität	~	Gravitation
Coulombkraft	~	Gravitationskraft

Soweit so gut. Es gab allerdings ein Problem mit dieser Analogie. Nach der klassischen Elektrodynamik muss nämlich jedes beschleunigte elektrisch geladene Teilchen Energie abstrahlen, wobei die Änderung seiner Energie mit der Zeit proportional zum Quadrat der jeweiligen Beschleunigung anwächst (das sogenannte Larmor-Theorem). Da physikalisch gesehen auch Kreisbahnen eine beschleunigte Bewegung darstellen (nicht die Größe, aber die Richtung der Geschwindigkeit des umlaufenden Teilchens ändert sich ständig) würde dies bedeuten, dass die umlaufenden Elektronen ständig an Energie verlieren und dadurch in ihrem Umlauf um den Atomkern immer langsamer werden. Irgendwann würde dann die Zentrifugalkraft nicht mehr ausreichen, um die Anziehungskraft zu kompensieren, und sie würden früher oder später auf einer immer stärker spiralförmigen Bahn in den Atomkern hineinstürzen. Damit wären diese elektrostatisch modellierten Atome instabil, ganz entgegen der bemerkenswerten Stabilität chemischer Atome.

Was wir an diesem Beispiel somit kennenlernen, ist die Eigendynamik einer solchen Analogie, die sehr häufig auf solche **Probleme mit Disanalogien** stößt, die sich früher oder später einstellen, wenn man die Analogie immer weiter ausbaut, also das Relationsnetz von Ähnlichkeitsbeziehungen immer weiter zu spannen versucht. Dem Larmor-Theorem der Elektrodynamik entspricht kein analoges Theorem der Gravitationstheorie, auch wenn man versuchen könnte, die spiralförmigen Bahnen eines solchen abstrahlungsgebremsten Elektrons durch Reibungskräfte zu modellieren: elektrostatisch gibt es keine „Reibung“.

Larmor-Theorem ($\dot{E} \sim a^2$) ~ ?

131 Für eine strengere Analyse dieser Analogien im Formalismus von GENTNERS *structure-mapping approach* siehe GENTNER 1983 (siehe oben Anm. 47), dort insbesondere das Diagramm S. 160; zur Genese des Bohrschen Atommodells ausführlicher: HEILBRON und KUHN 1969, MILANT'EV 2004.

Diese **Disanalogie zwischen Gravitation und Elektrizität** hatte alle Physiker vor BOHR (mit Ausnahme eines Japaners namens Hantaro NAGAOKA [1865–1950]) davon abgeschreckt, diese zunächst so naheliegende Analogie Ernst zu nehmen. Der junge Niels BOHR hingegen war wagemutig genug, sich über dieses Problem hinwegzusetzen. Da er die Voraussage einer solchen Larmor-Abstrahlung nicht umgehen konnte, blieb ihm nur ein Ausweg: Er musste die klassische Elektrodynamik aushebeln, d. h. für Anwendung auf die Physik von Atomen einfach für ungültig erklären. Er postulierte die Existenz bestimmter, stabiler Elektronenbahnen fester, quantisierter Energie, die von dieser Larmor-Abstrahlung angeblich nicht betroffen waren. Mit dieser *Ad-hoc*-Anpassung seines Modells erregte er zunächst den Unwillen und heftigen Widerspruch eines Großteils der *scientific community*, aber der Erfolg sollte ihm Recht geben. Wie war dieses Modell weiter auszubauen? Es lag nahe, noch eine weitere analogische Übersetzung vorzunehmen:

Umlaufszeit der Elektronen ~ Umlaufszeit der Planeten

Wie konnte diese Annahme nun mit beobachtbaren Größen in Verbindung gebracht werden? Anders als bei den Planeten „sah“ man ja die Elektronen nicht, konnte ihre Umlaufszeit und ihre sonstigen Bahnparameter nicht direkt messen. Was man beobachten konnte, waren lediglich Spektrallinien bestimmter Frequenzen ν , und zwar für jedes chemische Atom andere.¹³²

Etlche Naturforscher vor BOHR hatten sich auch schon diese Frage gestellt und immer vermutet, dass diese Spektrallinien direkt mit den Umlaufzeiten T (allgemeiner gesprochen mit den Anregungszuständen) der Elektronen im Atom zu tun haben müssten, also $\nu \sim 1/T$. BOHR machte nun aber einen zweiten, ebenso gewagten Schritt und postulierte 1913, dass die beobachteten Spektrallinien der Frequenz ν *nicht* wie $\nu \sim 1/T$ mit den Umlaufzeiten T der Elektronen korreliert waren, sondern dass diese Frequenzen das Ergebnis eines „Quantensprungs“ der Elektronen zwischen zwei Energieniveaus E_1 und E_2 waren: $\nu \sim (E_1 - E_2)$. Die Postulierung solcher „Quantensprünge“ – übrigens eine „bildschöne“ Metapher, von BOHR verwendet zur Unterfütterung eines auf einer Analogie basierenden Modells – war wiederum revolutionär, denn weder BOHR noch sonst irgendwer konnten begründen, warum ein solcher Quantensprung stattfinden sollte, was ihn auslöst und warum gerade jetzt und nicht früher oder später. Aber dieses dreiste Postulat bewährte sich, denn aus diesem Atommodell konnte BOHR nun z. B. die Serienformeln der Spektrallinien des Wasserstoffs u. a. Wasserstoffähnlicher Atome sowie etliche weitere empirisch testbare Voraussagen ableiten, die in den Folgejahren allesamt experimentell bestätigt wurden.¹³³

Die für BOHR so grundlegende Analogie zwischen Gravitation und Elektrizität erzwingt eigentlich von vornherein, nicht mit Kreisbahnen, sondern mit Ellipsenbahnen zu rechnen, wie KEPLER diese für die Planetenbewegung ja schon im 17. Jahrhundert berechnet hatte und wie NEWTON sie dann aus seiner Gravitationstheorie auch wieder ableiten konnte. Da es in BOHRs Atommodell nur auf die Energieniveaus der jeweiligen Elektronenbahnen ankam, hatte er zunächst aber nur mit Kreisbahnen gerechnet und kritische Nachfragen damit wegzubügeln versucht, dass er sagte, ellipsoidere Bahnen würden sich durch Larmor-Abstrahlung in den nicht-kreisförmigen Bahnteilen in Kreisbahnen zurückverwandeln. Das war eigent-

132 Zur visuellen Kultur der Spektroskopie des 19. Jahrhunderts und zum Aufschwung der Spektralanalyse, die diese Spektrallinien der Atome als eine Art Fingerabdruck jedes Atoms betrachtete, siehe HENTSCHEL 2002, insbesondere Kap. 2.4; ferner ebenda S. 438ff. zu dem durch BOHRs Atommodell im 20. Jahrhundert ausgelösten Umschwung der Repräsentationstechniken von Spektralkarten hin zu Termdiagrammen.

133 Für detailliertere Analysen siehe z. B. JAMMER 1966, Abschnitt 2.2; HOYER 1974, BENZ 1975.

lich unlogisch, da er ja selbst die klassische Elektrodynamik außer Kraft gesetzt hatte, aber es zeigt, wie stark er selbst noch in den alten Denkstrukturen befangen war. Nun schien es energetisch zunächst irrelevant, ob man Kreis- oder Ellipsenbahnen annimmt, aber nur, solange man im Rahmen der klassischen Mechanik und Gravitationstheorie verbleibt. Albert EINSTEIN hatte in seiner Relativitätstheorie allerdings gezeigt, dass sich normalerweise quantitativ äußerst geringfügige, aber für größer werdende Geschwindigkeiten und Massen immer erheblicher werdende Abweichungen zur klassischen Mechanik ergeben. Die Geschwindigkeiten der Elektronen auf ihren Bahnen um die Sonne waren, anders als die der Planeten bei ihrem Umlauf um die Sonne, bereits nicht mehr vernachlässigbar gering im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit, weshalb solche relativistischen Korrekturen in der Atomphysik auch nicht mehr vernachlässigbar waren. Darauf wies zuerst Arnold SOMMERFELD (1868–1951) hin, der BOHRS Atommodell daraufhin in zweifacher Weise ausbaute:

- (1.) durch Einführung ellipsoider Bahnen, wobei der Grad der Ellipsoidität ebenfalls nicht kontinuierlich variierte, sondern wie die Energieniveaus selbst auch quantisiert war;
- (2.) durch Berechnung relativistischer Korrekturen für die Energien derjenigen Bahnen, die besonders stark ellipsoid von der Kreisform abwichen.

Diese zweite Korrektur erklärt sich wiederum aus der basalen Analogie des Bohrschen Atommodells: Wie bei den Keplerbahnen der Planeten um die Sonne so befolgten auch die Elektronenbahnen um den Atomkern das zweite Keplersche Gesetz, demzufolge der Radiusvektor in gleichen Zeiten gleiche Flächen überschreitet. Planeten wie auch Elektronen bewegten sich also auf ellipsoiden Bahnen nahe dem anziehenden Zentralkörper schneller als weiter weg davon, und dieser Geschwindigkeitsunterschied war bei den Elektronen (anders als bei den Planeten) so beträchtlich, dass die dadurch entstehenden Energiedifferenzen nicht mehr vernachlässigt werden konnten. SOMMERFELDS Berechnungen zu dieser sogenannten relativistischen Feinstruktur der Bahnen konnten anhand spektroskopischer Präzisionsmessungen aus Tübingen experimentell bestätigt werden und stärkten das Vertrauen der *scientific community* in BOHRS Atommodell erheblich (wie übrigens auch in die damals noch bei weitem nicht allgemein akzeptierte Relativitätstheorie EINSTEINS).¹³⁴

Was uns diese hier etwas ausführlicher dargestellte Episode zu Niels BOHRS Atommodell zeigt, ist der sukzessive Ausbau einer Analogie (zwischen Planetensystem und Atomstruktur) und eines auf einer solchen Analogie basierenden Modells. Die recht lange Liste der durch die Ausgangsanalogie bereits übertragbaren Relationen zeigt, dass der Gedanke eines Aufbaus der Atome analog zum Aufbau unseres Sonnensystems einiges für sich hatte, also Anfangsplausibilität aufwies, in diesem Sinne also eine „vielversprechende“ Analogie war. Doch dann zeigte sich mit der Larmor-Formel eine erste Disanalogie, da es in der Gravitationsphysik nun mal keinen der Abstrahlung durch Beschleunigung analogen Energieverlust gibt. Erst nach BOHRS Überwindung dieser Disanalogie, die alle anderen Theoretiker abgeschreckt hatte, durch zwei äußerst radikale und gewagte Postulate, mit denen BOHR Teile der klassischen Physik für die Atomphysik „außer Kraft“ setzte, konnte BOHR sich daran machen, sein Modell weiter auszubauen, was dann ohne zusätzliche *Ad-hoc*-Annahmen durch natürliche Erweiterung des in der Fundamentalanalogie angelegten Relationsnetzes geschah und bis zur Ablösung dieses Bohr-Sommerfeldschen Atommodells durch die spätere Quantenmechanik etwa 10 Jahre lang viele wichtige Ergebnisse brachte. Dass dieses noch „semiklassische“ Atommodell aus heuti-

¹³⁴ Siehe dazu KRAGH 1984/85.

ger Perspektive unhaltbar ist, weil es z. B. noch das klassische Konzept von Bahnen benutzt, die nach der Unschärferelation HEISENBERGS so nicht nur nicht beobachtbar, sondern nicht existent sind, ändert nichts an der damaligen heuristischen Fruchtbarkeit dieses Modells.

Visuell-schematische Repräsentation dieser Analogie

Eines der von mir im mündlichen Vortrag auf der Stuttgarter Tagung sehr betonten Anliegen war das der klaren Wiedergabe von Analogien in Form von Diagrammen oder anderen visuell erfassbaren Schemata. Die vorwiegend diskursiv operierende Analyseform, wie sie in allen Geschichtswissenschaften bis heute üblich ist, hat das große Problem, die Komplexität der Relationsnetze, die in Analogien vom Basis auf den Zielbereich abgebildet werden, nicht adäquat wiedergeben zu können. Viel klarer als 1000 Worte ist da ein Diagramm, aus dem die in der Analogie zueinander in Beziehung gesetzten Relata, die Knotenpunkte und Seitenstränge der Netze von Relationen in dem Grad ihrer Übereinstimmung, aber auch in den verbleibenden Disanalogien, auf einen Blick überschaut werden können. Die vorhandene Literatur, insbesondere aus dem Bereich der Kognitionspsychologie, hat hierzu brauchbare Angebote und Methoden vorgelegt, mit denen diese Darstellung in Form von Diagrammen auf einfachem Wege erfolgen kann. Am Beispiel des Bohr-Sommerfeldschen Atommodells in Analogie zum Sonnensystem sollen diese Darstellungsformen hier kurz vorgestellt werden.

In dem folgenden Diagramm (Abb. 5) aus Dedre GENTNERS Pionieraufsatz von 1983 sehen wir zwei Netzwerke von zweistelligen Relationen (jeweils umkreist) zwischen Objekten (jeweils die nicht-umkreisten Worte), wobei die richtige Lesart der Relation durch die Markierung von S (Subjekt) und O (Objekt) an den Pfeilen angedeutet ist, also z. B. der Planet dreht sich um die Erde (zweite Relation von rechts) bzw. die Sonne ist heißer als der Planet (rechts außen).

Oben abgebildet wurde der für die Analogie wesentliche Ausschnitt des Relationswissens über das Sonnensystem, unten der entsprechende Ausschnitt zum Bohr-Sommerfeldschen Atommodell. Schon der flüchtige Vergleich dieser beiden Relationsnetze zeigt auffällige Ähnlichkeiten, insofern als vier der fünf Relationen des obigen Netzes sich auch im unteren zwischen den „analogen“ Relata wiederfinden. Die für die Analogie notwendige Ersetzung von „Sonne“ durch „Atomkern“ und von „Planet“ durch „Elektron“ wird im obigen Diagramm zusätzlich noch durch die gestrichelten Linien angedeutet, welche mit „M“ für *mapping*, also für die Abbildungsrelation als dem Hauptmerkmal von Analogien überschrieben sind. Man beachte, dass diese schematische Darstellung nicht nur die Güte der Analogie zu beurteilen erlaubt (wieviele Elemente des Relationsnetzes sind übertragbar?), sondern auch einige der Disanalogien beider Bereiche mit beinhaltet: Die fünfte (rechte) Relation ist nicht sinnvoll übertragbar und auch ganz oben ergibt sich eine Abweichung, denn der gravitativen Anziehung zwischen den Planeten untereinander steht eine elektrostatische Abstoßung der Elektronen voneinander gegenüber. Ein solches Diagramm erfasst genau den wesentlichen Strukturkern von Analogien und vermeidet überflüssigen verbalen Ballast.

Wenn man von den in Sprache gefassten Formulierungen von Analogien auszugehen hat, wie dies z. B. Linguisten und Kognitionspsychologen tun, wird der Schritt zu einer solchen schematischen Darlegung des Relationsnetzes nicht gleich gelingen, sondern man wird mit der Aufzeichnung einzelner von den Akteuren konstaterter Aussagen beginnen und aus diesen langsam ein solches Relationsnetz konstruieren. Dabei wird man zwischen einstelligen, zweistelligen und mehrstelligen Relationen unterscheiden müssen. „Der Planet dreht

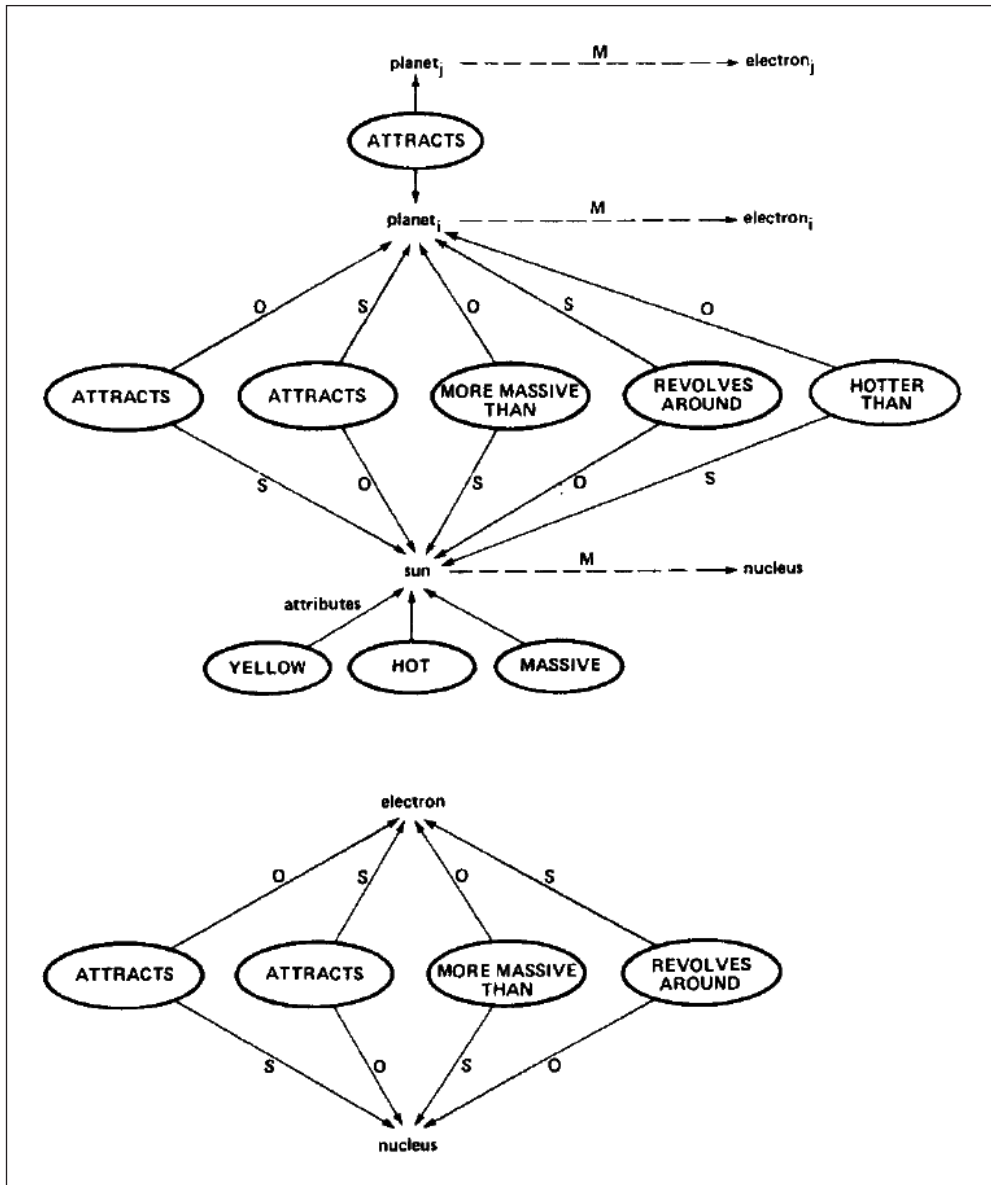


Abb. 5 Die Analogie zwischen dem Sonnensystem (oben) und dem Bohr-Sommerfeldschen Atommodell (unten). Aus GENTNER 1983, S. 160. Um diese Diagramme nicht mit Beschriftungselementen zu überlasten, schlage ich vor, die Pfeile nicht bijektiv auszulegen, sondern mit Richtungen zu versehen und dafür die S- und O-Beschriftungen wegzulassen.

sich um die Sonne“ ist beispielsweise eine zweistellige, geordnete Relation, die von Brian FALKENHAINER, Kenneth D. FORBUS und GENTNER in ihrer Strukturabbildungsmaschine (SME – *structure mapping engine*) als “REVOLVE (electron, nucleus)” wiedergegeben wurde.

“ATTRACTS (nucleus, electron)” bezeichnet eine zweite solche zweistellige Relation zwischen Elektron und Atomkern, während “AND” und “CAUSE” Relationen höherer Ordnung wiedergeben, die von links nach rechts gelesen werden sollen, also z. B. “OPPOSITE SIGN [of CHARGE as first-order relation] CAUSES ATTRACT[ion]”, usw. Durch Eingabe vieler, aber endlich vieler solcher Relationen in eine Datenbank wird ein umfangreiches Relationsnetz aufgespannt, das dann von Computersprachen der künstlichen Intelligenz gespeichert und auf Ähnlichkeiten zu anderen Relationsnetzen hin „abgeklopft“ werden kann. Dadurch wird, zumindest im Prinzip, die automatische maschinelle Erkennung von Analogien möglich.

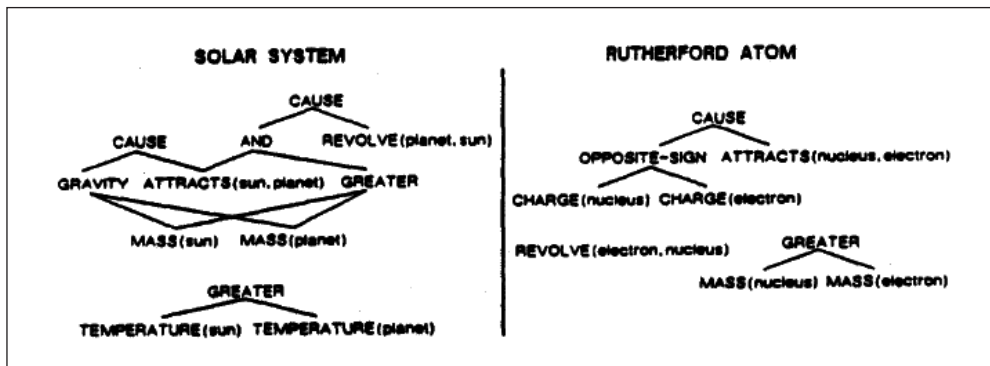


Abb. 6 Strukturanalogie Sonnensystem–Atom. Aus FALKENHAINER et al. 1990, S. 31f.

In den 1980er und 1990er Jahren war die Hoffnung groß, auf diese Art und Weise mit „künstlicher Intelligenz“ (KI) die Kreativität des Menschen bei der spontanen Formierung solcher Analogien modellieren und damit endgültig „verstehen“ zu können. Auch die große Zahl der im KI-Sektor sowie in der damit verzahnten Kognitionsforschung über Analogien publizierten Arbeiten hängt eng mit diesem Enthusiasmus zusammen. Inzwischen hat sich diese Euphorie gelegt, da sich gezeigt hat, dass es sehr viel schwieriger als erwartet ist:

- (1.) diese Datenbanken von Relationswissen so aufzubauen, dass sie dem „natürlichen“, gewachsenen Wissens eines Menschen auch nur annähernd entspricht;
- (2.) die Formalisierung der Datenbank von dem Erkenntnisinteresse bzw. dem Hinblick auf die damit dann zu formulierende Analogie unabhängig zu gestalten, denn eine Relation wie die obige “CAUSE (OPPOSITE SIGN ATTRACTS)” ist alles andere als „natürlich“ oder „intuitiv“, sondern schon stark auf die Analogie hin „getrimmt“;
- (3.) die Datenbanken hinreichend groß zu machen und in diesen großen Datenmengen dann gleichzeitig prioritäre Suchstrategien zu modellieren, die unsere unbewusste Auswahl im gegebenen Wissenshorizont leitet.

Status von Analogie-Argumenten und Analogie-basierten Modellen in der Naturforschung

Wie jetzt nicht zuletzt aufgrund des letzten historischen Beispiels des Bohr-Sommerfeldschen Atommodells klar geworden sein dürfte, haben auf Analogien basierende Modellvorstellungen

in der Naturwissenschaft stets nur eine begrenzte Geltungsdauer. Selbst in der Phase größten Enthusiasmus (etwa für das Bohr-Sommerfeldsche Atommodell zwischen 1913 und 1922 oder für die vereinheitlichten Fluidamodelle des ausgehenden 18. Jahrhunderts) konnte keiner der Akteure sich wirklich „sicher“ wähnen, dass dieses Modell weiterer Kritik standhalten würde. Wie Mario BUNGE es in polemischer Schärfe formulierte: “[...] arguments from analogy may be fertile but they are all invalid: their success, if any, does not depend on their form but on the nature of the case – whence there can be no logic of analogy. Analogies are bound to break down even if initially fertile.”¹³⁵ Trotz dieser eingebauten Zeitbombe, die Analogien und Modelle übrigens mit allen anderen Formen wissenschaftlicher Theoriebildung gemein haben, waren und sind Analogieargumente eine der verbreitetsten Formen wissenschaftlichen Argumentierens. Zu den eher bescheidenen Ansätzen einer Theorie der Analogie als Argumentationsform steht dies in einem krassen Missverhältnis.¹³⁶ In einer soeben publizierten Analyse verschiedener Typen wissenschaftlicher Argumente für und gegen die Einführung neuer Entitätsklassen am Beispiel der Klassifikation von Strahlungsformen zwischen 1700 und 1925 konnte ich zeigen, dass Analogieargumente in diesem Zeitraum nach Heterogenitätsargumenten sogar der zweithäufigst verwendete Typus von insgesamt 16 verschiedenen Argumentationstypen waren, den ich in diesem exemplarischen Themenfeld zwischen 1704 und 1922 nachweisen konnte.¹³⁷ Überhaupt dürfte der ganze Bereich der Klassifikationstätigkeit in der Wissenschaftspraxis einer der wichtigsten Sektoren für die Anwendung von Analogieargumenten sein – man denke nur an die großen Klassifikationssysteme der Naturgeschichte des 18. Jahrhunderts oder auch an die Klassifikation im Periodensystem der Elemente um 1869, die Lothar MEYER (1830–1895) und Dmitri Iwanowitsch MENDELEJEV (1834–1907) aufgrund der auffälligen Analogien in den chemischen und physikalischen Eigenschaften verschiedener Stoffklassen auf die Idee einer periodischen Anordnung in acht Hauptgruppen führten. Die an knappen, aber instruktiven wissenschaftshistorischen Beispielen ganz anderer Art reichen Studien etwa von Hélène METZGER oder Paul THAGARD lassen für andere Themenbereiche, die einer analogen Analyse noch unterzogen werden müssten, kein anderes Ergebnis erwarten. Diese Ubiquität analogischen Denkens sollte jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass es historische Epochen und lokale Kontexte gab, in denen Analogien besonders geschätzt und gesucht waren, während sie in anderen, zumindest was das Selbstverständnis von Naturforschern betraf, weniger stark im Vordergrund standen. Neben der Antike und dem Mittelalter mit analogisch hochgradig angereicherten Praktiken wie etwa der Alchemie waren z. B. die Keplerzeit¹³⁸ um 1600 sowie die Sattelzeit der Jahre 1780–1820, während der insbesondere im deutschen Sprachraum die romantische Naturphilosophie blühte, solche Hochphasen ana-

135 BUNGE 1967, S. 267f.; für einen wenig ausgereiften Versuch, die Sicherheit analogen Schließens über den Isomorphiegrad zwischen Basis- u. Targetdomäne abzuschätzen, siehe WEITZENFELD 1984; in der Logik von SALMON 1983, S. 199, wächst der Reiz einer Analogie sogar mit der Verschiedenheit beider Bereiche!

136 Den Mangel guter systematischer Studien zu Analogieargumenten beklagt auch MENGEL 1995, S. 12ff., der leider in seiner eigenen Dissertation zum Thema an der Universität Hamburg außer einer Sichtung und Zusammenfassung der Literatur nichts wirklich weiterführendes beigetragen hat. Unter den von ihm genannten Publikationen noch am präzisesten DOROLLE 1949, COENEN 1982 über den Prädikatorenzusammenhang und Designatorserien, BURBIDGE 1991 über Analogien in Induktion und Deduktion sowie SCHMIDT 1995 für eine Beispielanalyse von GALILEIS Analogieargumenten. Für detailliertere Bibliographien siehe DAIBER 1991 sowie nach Perioden geordnet Manuel BACHMANN in GLOY und BACHMANN 2000, S. 24–34.

137 Siehe HENTSCHEL 2007a, insbesondere Kap. 8 und Anhang.

138 Speziell zu KEPLER siehe z. B. FIELD 1986, insbesondere S. 452f., GENTNER 2002, hier den Beitrag von Fritz KRAFFT und die dort zitierte weiterführende Literatur.

logischen Denkens.¹³⁹ Nach solchen „Blütephasen“ (eine wunderbare Metapher) gab es immer wieder aber auch Perioden, in denen die vormals so beliebten Analogien ausgesprochen verpönt waren. Besonders deutlich ist dies in zwei Epochen abzulesen:

- (1.) der betonten Nüchternheit der Mitglieder der 1660 gegründeten *Royal Society*, die sich – zumindest in ihrer Programmatik¹⁴⁰ – ganz klar abzusetzen versuchten von der von Analogien u. a. rhetorischen Redefiguren nur so strotzenden Renaissance-Periode; und
- (2.) im zweiten Drittel des 19. Jahrhunderts, als Vertreter eines neuen Ideals quantifizierender Naturforschung den vorangegangenen Blühträumen der romantischen Naturphilosophie eine herbe, ja polemische Absage erteilten.

So glaubte der selbst in seiner Jugend von den Denkfiguren der Romantik beeinflusste, sich davon dann aber in seiner weiteren Entwicklung schroff absetzende Chemiker Justus LIEBIG (1803–1873) in seinem Lehrbuch über organische Chemie 1840 Analogien sogar gleich für *alle* Fehler der bisherigen Naturforschung verantwortlich machen zu können, wobei er sich selbst dabei einer sehr gewagten Metapher bediente:

„Die Analogie hat die unglückliche Vergleichung der Lebensfunktionen der Pflanzen mit denen der Tiere in dem Bette des Procrustes erzeugt, sie ist die Mutter, die Gebärerin aller Irrtümer.“¹⁴¹

De facto haben allerdings weder LIEBIG noch der schwedische Chemiker Jöns Jakob BERZELIUS (1779–1848) als weiterer scharfer Kritiker der romantischen Naturphilosophie im frühen 19. Jahrhundert den Gebrauch von Analogien in ihrer eigenen Arbeit vermeiden können. Seit 1817 versuchte BERZELIUS beispielsweise, seine im Bereich der anorganischen Chemie so erfolgreiche elektrochemische Bindungstheorie auf die organische Chemie zu übertragen. Analog zum zusammengesetzten Ammoniumradikal NH_4 müsse es, so folgerte er in einem Analogieargument, auch bei organischen Verbindungen ein positiv geladenes, sauerstofffreies, zusammengesetztes Radikal C_xH_y geben.¹⁴² Der faktische Gebrauch von Analogien ist also nur bis zu gewissem Grade reduzierbar, aber die Einstellung zu Analogien, die Bewusstheit ihres Gebrauchs und die Begeisterung bzw. die verbleibenden Zweifel dabei sind starken Schwankungen unterworfen.

Eine offene Frage

Abgesehen von dieser ungleichen Zeitverteilung, die auf Konjunkturen oder gar Moden von Analogien mit wellenförmigen An- und Abflauen der Begeisterung¹⁴³ bei ihrem Gebrauch schließen lassen, kann man sich fragen, ob es darüber hinaus auch säkuläre Verschiebungen in der Art und Weise des Gebrauchs von Analogien gibt.¹⁴⁴ Nach Auffassung von Dedre GENT-

139 Zur Bedeutung der Analogie in der romantischen Naturbetrachtung und insbesondere in der Konzeption SCHELLINGS siehe z. B. BREIDBACH 1987, Kap. IV und dortige weiterführende Hinweise.

140 Deutlich z. B. in SPRAT 1667, kritisch analysiert und kontextualisiert in DEAR 1985; vgl. LEATHERDALE 1974, Kap. 6

141 Siehe LIEBIG 1840, S. 24; zu LIEBIGS Verhältnis zur romantischen Naturphilosophie vgl. z. B. CANEVA 1993.

142 Siehe dazu und zu weiteren Beispielen aus der Chemie des 18. und 19. Jahrhunderts SNELDERS 1994, S. 66ff.

143 Wie im vorigen ausführlich gezeigt wurde.

144 Siehe z. B. ARBER 1946; zum folgenden GENTNER und JEZIORSKI 1989.

NER und Michael JEZIORSKI sind die frühesten historischen Vorkommnisse etwa bei frühneuzeitlichen Alchemisten oder in der Antike durch weniger strenge Anwendung von Regeln gekennzeichnet, die die Beliebigkeit von Analogien einschränken und dem analogen Schließen zu mehr Stringenz verhelfen. Daraus könnte man ableiten, dass es der inflationäre Gebrauch von Analogien etwa in der frühneuzeitlichen Alchemie war, der in der Folge bei BACON, BOYLE u. a. Protagonisten der *novae scientiae* allererst zur Verfestigung dieser Regeln des Gebrauchs von Analogien geführt hat. Da in der gleichen Zeit GALILEI und KEPLER diese Regeln bereits implizit befolgt haben, können GENTNER und JEZIORSKI jenen "historical shift from metaphor to analogy" lediglich *innerhalb* von Wissensgebieten (*domain-specific*) verzeichnen, wobei die von ihnen nicht behandelte romantische Naturphilosophie dann eine Art „Rückfall“ in das vormoderne Ausufern des Analogisierens darstellen würde. Mit dieser Perspektive würden sich die Exegeten jener romantischen Denkform wie etwa Olaf BREIDBACH¹⁴⁵ allerdings wohl kaum einverstanden erklären, und auch ich finde die in ihr durchscheinende Whig-Historiographie auf die Wissenschaftsgeschichte als lineare Fortschrittsgeschichte zu stark simplifizierend. Viel hilfreicher als quasi-hegelianische Makroperspektiven auf hypostasierte säkulare Tendenzen sind genauere Analysen der mittleren Aggregationsstufe, z. B. zur Resonanz von konkretem Gebrauch von Analogieargumenten in konkreten Wissens- und Wissenschaftskontexten oder zur Funktion und „Logik“ von Analogieargumenten in wissenschaftstheoretischer, epistemologischer und systemtheoretischer Sicht. Und genau solche historischen oder/und systematischen Perspektiven sollen in den nun folgenden Einzelbeiträgen dieses Bandes eröffnet werden. Es handelt sich um den ersten Versuch einer interdisziplinären Zusammenschau von so vielen verschiedenen Wissens- und Technikfeldern, hervorgegangen aus einer vom Herausgeber organisierten wissenschaftlichen Tagung der Deutschen Akademie Leopoldina im März 2008 im Internationalen Begegnungszentrum (IBZ) der Universität Stuttgart stattgefunden hat.

Literatur

- ACHINSTEIN, Peter: Models, analogies and theories. *Philosophy of Science* 31, 328–350 (1964)
- ACHINSTEIN, Peter: *Concepts of Science: A Philosophical Analysis*. Baltimore: Johns Hopkins Univ. Press 1967
- D'AGOSTINO, Salvo: Boltzmann and Hertz on the *Bild*-conception of physical theory. *History of Science* 28, 380–398 (1990)
- ALGAROTTI, Francesco: *Le Newtonianisme pour les Dames*. Paris: Montalant 1738
- ALLERS, Rudolf: *Microcosmos. From Anaximander to Paracelsus*. *Traditio* 2, 319–407 (1944). Wiederabdruck New York: Cosmopolitan Science & Art Service 1994
- ARBER, Agnes Robertson: *Analogy in the history of science*. In: MONTAGU, Francis Ashley (Ed.): *Studies and Essays in the History of Science and Learning*; pp. 219–233. New York 1946
- BACON, Francis: *Novum organon* (1620). In engl. Übers.: *The New Organon and Related Writings*. Indianapolis: Bobbs-Merill 1979 (auch online verfügbar)
- BAILER-JONES, Daniela: *Mechanism past and present*. *Philosophia Naturalis* 42, 1–14 (2005)
- BENDEGEM, Jean Paul van: *Analogy and metaphor as essential tools for the working mathematician*. In: HALLYN, Fernand (Ed.): *Metaphor and Analogy in the Sciences*; pp. 105–124. Dordrecht: Kluwer 2000
- BENZ, Ulrich: *Arnold Sommerfeld*. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft 1975
- BERGGREN, Douglas: *The use and abuse of metaphor*. *Review of Metaphysics* 16, 236–258, 450–472 (1962/63)
- BLACK, Max: *Metaphor*. *Proceedings of the Aristotelian Society* 55, 273–294 (1954). Wiederabgedruckt in: BLACK (1962), S. 22–47, 259
- BLACK, Max: *Models and Metaphor*. Ithaca: Cornell Univ. Press 1962

145 Siehe insbesondere BREIDBACH 1987 sowie seinen Beitrag in diesem Band.

- BLACK, Max: More about metaphor. In: ORTONY, Andrew (Ed.): *Metaphor and Thought*; pp. 19–43. Cambridge Univ. Press 1979
- BODDE, Derk: *Chinese Thought, Society, and Science*. Honolulu: Univ. of Hawaii Press 1991
- BÖHME, Gernot: Der offene Leib. Eine Interpretation der Mikrokosmos-Makrokosmos-Beziehung bei Paracelsus. In: WULF, Christoph, und KAMPER, Dietmar (Hrsg.): *Logik und Leidenschaft. Erträge historischer Anthropologie*. S. 228–238. Berlin: Reimer 2002
- BOLTZMANN, Ludwig: Über die Methoden der theoretischen Physik. In: DYCK, Walther (Hrsg.): *Katalog mathematischer und mathematisch-physikalischer Modelle, Apparate und Instrumente*. Bd. 1, S. 89–98. München 1892
- BOLTZMANN, Ludwig: Model. In: *Encyclopedia Britannica*. 11. Aufl., Bd. 18, S. 638–640 (1902/1911)
- BONNER, John Tyler: Analogies in Biology. *Synthese* 5, 275–279 (1963)
- BRADLEY, James: A letter from the reverend Mr. James Bradley Savilian professor of astronomy at Oxford, and F. R. S. to Dr. Edmond Halley astronom. reg. &c. giving an account of a new discovered motion of the fix'd stars [1725]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 35, 637–661 (1727)
- BRAITHWAITE, Richard B.: Models in the empirical sciences. In: NAGEL, Ernest, SUPPES, Patrick C., and TARSKI, Alfred (Eds.): *Logic, Methodology and Philosophy of Science*. Stanford Univ. Press, 1962. Wiederabgedruckt in: BRODY, Baruch A. (Ed.): *Readings in the Philosophy of Science*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1970
- BREIDBACH, Olaf: *Der Analogieschluß in den Naturwissenschaften oder die Fiktion des Realen*. Frankfurt: Athenäum 1987
- BUCHANAN, Scott Milross: *Symbolic Distance in Relation to Analogy and Fiction*. London: Kegan Paul 1932
- BUNGE, Mario: Analogy in quantum theory: From insight to nonsense. *British Journal for the Philosophy of Science* 18, 265–286 (1967)
- BURBIDGE, John W.: On arguments from analogy. In: *Proceedings of the Second International Congress on Argumentation*; pp. 416–421. Amsterdam 1991
- CANEVA, Kenneth: *Robert Mayer and the Conservation of Energy*. Princeton Univ. Press 1993
- CANGUILHEM, Georges: The role of analogies and models in biological discovery. In: CROMBIE, Alistaire C. (Ed.): *Scientific Change*; pp. 507–520. London: Heinemann 1963
- CANTOR, Geoffrey N., and HODGE, Michael Jonathan S. (Eds.): *Conceptions of Ether. Studies in the History of Ether Theories 1740–1900*. Cambridge Univ. Press 1981
- CARTWRIGHT, Nancy, SHOMAR, Towfic, and SUÁREZ, Mauricio: The tool box of science. Tools for the building of models with superconductivity examples. *Poznan Studies in the Philosophy of the Sciences and Humanities* 44, 137–149 (1995)
- CAT, Jordi: On understanding Maxwell on the methods of illustration and scientific metaphor. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 32, 396–441 (2001)
- CHADAREVIAN, Soraya DE, and HOPWOOD, Nick (Eds.): *Models: The Third Dimension of Science*. Stanford Univ. Press 2004
- CHALMERS, Alan F.: The heuristic role of Maxwell's mechanical model of electromagnetic phenomena. *Studies in the History and Philosophy of Science* 17, 415–427 (1986)
- COENEN, Hans Georg: Die Rationalität des Analogie-Begriffs. *Grazer Linguistische Studien* 17/18, 31–46 (1982)
- DAIBER, Dietrich Lorenz: Actualid bibliografica de la analogia. *Analogia* 5, 169–203 (1991)
- DARDEN, Lindley, and RADA, Roy: Hypothesis formation using part-whole interrelations. In: HELMAN, David H. (Ed.): *Analogical Reasoning*; pp. 341–375. Dordrecht: Kluwer 1988
- DARRIGOL, Olivier: The analogy between light and sound in the history of optics from the ancient Greeks to Isaac Newton, Part I. *Centaurus* 52, 117–155 (2010)
- DARWIN, Charles Robert: *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*. London: John Murray 1859. Wiederabdruck: London: Penguin Books 1962
- DASTON, Lorraine: Galilean analogies: Imagination at the bounds of sense. *Isis* 75, 302–310 (1984)
- DASTON, Lorraine: Analogies and the migration of scientific ideas. The strange career of the normal curve. *Nova Acta Leopoldina NF Bd. 97, Nr. 358*, 169–185 (2008)
- DEAR, Peter: Totius in verba: Rhetoric and authority in the early Royal Society. *Isis* 76/2 145–161 (1985)
- DIRKS, Ulrich, und KNOBLOCH, Eberhard (Hrsg.): *Modelle*. Frankfurt: Lang 2008
- DOROLLE, Maurice: *La Raisonnement par Analogie*. Paris: Presses Universitaires de France 1949
- DUHEM, Pierre: *Ziel und Struktur physikalischer Theorien*. Dt. Übersetzung von Friedrich ADLER. Hrsg. von Lothar SCHÄFER. Hamburg 1978 (orig. franz. 1906)
- DUIT, Reinders, und GLYNN, Shawn: Analogien – Brücken zum Verständnis. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik* 6. Heft 27, 4–10 (1995)
- DURAND-RICHARD, Marie-José (Ed.): *L'analogie dans la démarche scientifique. Perspective historique*. Paris: L'Harmattan 2008

- DYCK, Walther (Hrsg.): Katalog mathematischer und mathematisch-physikalischer Modelle, Apparate und Instrumente. Bd. 1. München 1892
- FALKENHAINER, Brian, FORBUS, Kenneth D., and GENTNER, Dedre: The structure-mapping engine. *Artificial Intelligence* 41, 1–63 (1990)
- FARBER, Eduard: Chemical discoveries by means of analogies. *Isis* 41, 20–26 (1950)
- FAUCONNIER, Gilles, and TURNER, Mark: Rethinking metaphor. In: GIBBS, Raymond W. (Ed.): *Cambridge Handbook of Metaphor and Thought*. Cambridge Univ. Press 2008
- FAVRHOLDT, David: Niels Bohr's Philosophical Background. Copenhagen: Munksgaard 1992
- FAYE, Jan: Niels Bohr – His Heritage and Legacy. Dordrecht: Kluwer 1991
- FEHRENBACH, Frank: ‚Mikrokosmos‘ und ‚zweite Natur‘ – Krise einer naturphilosophischen Analogie. In: INGENSIEP, Hans-Werner, und HOPPE-SAILER, Richard (Hrsg.): *Naturstücke. Zur Kulturgeschichte der Natur*. S. 42–68. Ostfildern 1996
- FELLMETH, Ulrich, und KOTHEDE, Andreas (Hrsg.): *Paracelsus – Theophrast von Hohenheim. Naturforscher, Arzt und Theologe*. Stuttgart: Wiss. Verlagsgesellschaft 1993
- FIELD, Judith Veronica: Two mathematical inventions in Kepler's ad Vitellionem paralipomena. *Studies in the History and Philosophy of Science* 17, 449–468 (1986)
- FISCHER, David Hackett: *Historians' Fallacies. Toward a Logic of Historical Thought*. New York: Harper Torchbooks 1970
- FITZGERALD, George Francis: On an analogy between electric and thermal phenomena. *Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society* iv, part III, 439–442 (1884)
- FITZGERALD, George Francis: On a model illustrating some properties of the ether. *Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society* iv, part VIII, 407–419 (1885)
- FITZGERALD, George Francis: [Foundations of Physical Theory; Function of Models]. (Zu Lebzeiten unpubl. Mss, nicht nach 1888 verfaßt.) Publ. in: FITZGERALD 1902
- FITZGERALD, George Francis: *Scientific Writings*. Ed. by Joseph LARMOR. London, Dublin 1902
- FLUDD, Robert: *Mosaical Philosophy*. London: Moseley, 1659
- FRÄNKEL, Hermann: Eine Heraklitische Denkform. In: FRÄNKEL, Hermann: *Wege und Formen frühgriechischen Denkens. Literaturwissenschaftliche und philosophiegeschichtliche Studien*. S. 253–283. München: Beck 1955
- FRANCOEUR, Eric: The forgotten tool: The design and use of molecular models. *Social Studies of Science* 27, 7–40 (1997)
- GALILEI, Galileo: *Sidereus Nuncius* (1610). In dt. Übersetzung mit Einführung herausgegeben von Hans BLUMENBERG. Frankfurt (Main): Suhrkamp 1980
- GALILEI, Galileo: *Dialogo sopra il duemassimi sistemi* (1632). In dt. Übers. als: *Dialoge über die beiden hauptsächlichen Weltssysteme*. Leipzig 1891 bzw. Wiederabdruck Darmstadt 1982
- GALISON, Peter: Descartes's comparisons from the invisible to the visible. *Isis* 75, 311–326 (1984)
- GENTNER, Dedre: Structure-mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science* 7, 155–170 (1983)
- GENTNER, Dedre: Metaphor as structure mapping: The relational shift. *Child Development* 59, 47–59 (1988)
- GENTNER, Dedre: Mechanisms of analogical learning. In: VOSNIADOU, Stella, and ORTONY, Andrew (Eds.): *Similarity and Analogical Reasoning*; pp. 199–241. Cambridge Univ. Press 1989
- GENTNER, Dedre: Analogy in scientific discovery: The case of Johannes Kepler. In: MAGNANI, Lorenzo, and NERSESIAN, Nancy J. (Eds.): *Model-based Reasoning: Science, Technology, Values*; pp. 21–39. New York 2002
- GENTNER, Dedre, and BOWDLE, Brian: Metaphor processing, psychology of. In: *International Encyclopedia of the Social and Behavioural Sciences*; pp. 18–21. Amsterdam: Elsevier 2002
- GENTNER, Dedre, and BOWDLE, Brian: The career of metaphor. *Psychological Review* 112, 193–216 (2005)
- GENTNER, Dedre, and COLHOUN, Julie: Analogical processes in human thinking and learning. In: GLATZEDER, Britt M., GOEL, Vinod, and MÜLLER, Albrecht VON: *On Thinking*. Bd. 2: *Towards a Theory of Thinking*. Berlin: Springer 2009 (im Erscheinen, als preprint online downloadbar unter http://www.psych.northwestern.edu/psych/people/faculty/gentner/papers/Gentner-Colhoun_in_press.pdf)
- GENTNER, Dedre, BOWDLE, Brian F., WOLFF, Phillip, and BORONAT, Consuela: Metaphor is like analogy. In: GENTNER, Dedre, HOLYOAK, Keith J., and KOKINOV, Boicho N. (Eds.): *The Analogical Mind: Perspectives from Cognitive Science*; pp. 199–254. Cambridge, Mass: MIT Press 2001a
- GENTNER, Dedre, HOLYOAK, Keith J., and KOKINOV, Boicho N. (Eds.): *The Analogical Mind: Perspectives from Cognitive Science*. Cambridge, Mass: MIT Press 2001b
- GENTNER, Dedre, and JEZIORSKI, Michael: Historical shifts in the use of analogies in science. In: *Psychology of Science: Contributions to Metascience*; pp. 296–325. Cambridge Univ. Press 1989; sowie wiederabgedruckt in: ORTONY, Andrew (Ed.): *Metaphor and Thought*; Kap. 20, pp. 447–480. 2. erweiterte Aufl. 1993
- GENTNER, Dedre, and TOUPIN, Cecile: Systematicity and surface similarity in the development of analogy. *Cognitive Science* 10, 277–300 (1986)

- GICK, Mary L., and HOLYOAK, Keith J.: Analogical problem solving. *Cognitive Psychology* 12, 306–355 (1980)
- GICK, Mary L., and HOLYOAK, Keith J.: Schema induction and analogical transfer. *Cognitive Psychology* 15, 1–38 (1983)
- GLOY, Karen, und BACHMANN, Manuel (Hrsg.): Das Analogiedenken. Vorstöße in ein neues Gebiet der Rationalitätstheorie. Freiburg; München: Alber 2000
- GROTE, Andreas (Hrsg.): Macrocosmos in microcosmos: die Welt in der Stube; zur Geschichte des Sammelns 1450 bis 1800. Opladen: Leske & Budrich 1994
- GRUBER, Howard E.: Creativity: An evolving systems approach. In: NICKLES, Thomas (Ed.): *Scientific Discovery: Case Studies*; pp. 113–130. Dordrecht: Reidel 1980
- GUARINI, Marcello, BUTCHART, Amy, SMITH, Paul Simard, and MOLDOVAN, Andrei: Resources for research on analogy: A multi-disciplinary guide. *Informal Logic* 29/2, 84–197 (2009)
- HALFORD, Graeme S.: A structure-mapping approach to cognitive development. *International Journal of Psychology* 22, 609–642 (1987)
- HALPERN, Diane F.: Analogies as a critical thinking skill. In: BERGER, Dale E., PEZDEK, Kathy, and BANKS, William P. (Eds.): *Applications of Cognitive Psychology. Computing and Education*; pp. 75–86. Hillsdale N. J.: Erlbaum 1987
- HALPERN, Diane F.: *Thought and Knowledge: An Introduction to Critical Thinking*. Mahwa, N. J.: Lawrence Erlbaum 3. Aufl. 1996
- HALPERN, Diane F., HANSEN, Carol, and RIEFER, David: Analogies as an aid to understanding and memory. *Journal of Educational Psychology* 82, 298–305 (1990)
- HANKINS, Thomas L.: *Sir William Rowan Hamilton*. Baltimore, London: Johns Hopkins University Press 1980
- HANSON, Norwood Russell: *Patterns of Discovery. An Inquiry into the Conceptual Foundations of Science*. Cambridge Univ. Press 1958 (u. öfter)
- HARMAN, Peter: *Energy, Force, and Matter*. Cambridge Univ. Press, 1982
- HARRÉ, Rom: Models, metaphors and analogies in science. *International Studies in the Philosophy of Science* 2/2, 118–136 (1988)
- HARRINGTON, Anne: Metaphoric connections: Holistic science in the shadow of the Third Reich. *Social Research* 62/2, 357–385 (1995)
- HEILBRON, John: Weighing imponderables and other quantitative science around 1800. *Historical Studies in the Physical Sciences* 24, Suppl. (1993)
- HEILBRON, John, and KUHN, Thomas S.: The genesis of the Bohr atom. *Historical Studies in the Physical Sciences* 1, 211–290 (1969)
- HENTSCHEL, Klaus: Rezension von Jan Faye: Niels Bohr – his heritage and legacy. *Archives Internationales d'Histoire des Sciences* 44, 429–431 (1994)
- HENTSCHEL, Klaus: Heinrich Hertz's mechanics: A model for Werner Heisenberg's April 1925 paper on the anomalous Zeeman effect. In: BAIRD, Davis, HUGHES, R. I. G., and NORDMANN, Alfred (Eds.): *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*; pp. 183–223. Dordrecht: Reidel 1998
- HENTSCHEL, Klaus: *Mapping the Spectrum. Techniques of Visual Representation in Research and Teaching*. Oxford Univ. Press 2002
- HENTSCHEL, Klaus: Unsichtbares Licht? Dunkle Wärme? Chemische Strahlen? Eine wissenschaftshistorische und -theoretische Analyse von Argumenten für das Klassifizieren von Strahlungssorten 1650 – 1925 mit Schwerpunkt auf den Jahren 1779 – 1850. Stuttgart: GNT-Verlag 2007a
- HENTSCHEL, Klaus: Zur Bedeutung von Analogien in Naturwissenschaften. *Scientia Poetica* 11, 241–275 (2007b)
- HENTSCHEL, Klaus: Zur Begriffs- und Problemgeschichte von „Impetus“. In: YOUSEFI, Hamid Reza (Hrsg.): *Das Wagnis des Neuen. (Festschrift für Prof. Dr. Klaus Fischer.) Trier 2009*
- HERRMANN, Friedrich: Eine Analogie zwischen Mechanik, Elektrizitätslehre, Wärmelehre und Stofflehre. *PdN PhiS* 55/2, 2–5 (2006)
- HERTZ, Heinrich: *Die Prinzipien der Mechanik*. Leipzig: Barth 1894
- HESSE, Mary B.: Models in physics. *British Journal for the Philosophy of Science* 4, 198–214 (1954)
- HESSE, Mary B.: On defining analogies. *Proceedings of the Aristotelian Society* 60, 79–100 (1959/60)
- HESSE, Mary B.: Analogy and confirmation theory. *Philosophy of Science* 31, 319–327 (1964)
- HESSE, Mary B.: The explanatory function of metaphor. In: BAR-HILLEL, Yehoshua (Ed.): *Logic, Methodology and Philosophy of Science. Proceedings of the 1964 International Congress*; pp. 249–259. Amsterdam: North Holland Publ. 1965a
- HESSE, Mary B.: Aristotle's logic of analogy. *Philosophical Quarterly* 15, 328–340 (1965b)
- HESSE, Mary B.: *Models and Analogies in Science*. Notre Dame Univ. Press 1966
- HESSE, Mary B.: Models and analogy in science. *Encyclopedia of Philosophy* 4, 354–359 (1967)

- HOBBS, Thomas: *Leviathan*. Crawford B. MACPHERSON (Ed.). London: Penguin Books 1968
- HØFFDING, Harald: On analogy and its philosophical importance. *Mind* 14, 199–209 (1905)
- HØFFDING, Harald: *Der Begriff der Analogie*. Leipzig: O. R. Reisland 1924
- HOFFMANN, Christoph, and BERZ, Peter (Hrsg.): *Über Schall*. Ernst Machs und Peter Salchers Geschoßfotografien. Göttingen: Wallstein-Verlag 2001
- HOLYOAK, Keith J.: The pragmatics of analogical transfer. In: BOWER, Gordon H. (Ed.): *The Psychology of Learning and Motivation* 19, 59–87 (1985)
- HOLYOAK, Keith J.: *Mental Leaps: Analogy in Creative Thought*. Cambridge, Mass.: MIT Press 1995
- HOLYOAK, Keith J., JUNN, Ellen N., and BILLMAN, Dorrit O.: Development of analogical problem-solving skill. *Child Development* 55, 2042–2055 (1984)
- HOLYOAK, Keith J., and THAGARD, Paul: Analogical mapping by constraint satisfaction. *Cognitive Science* 13, 295–355 (1989)
- HOYER, Ulrich: *Die Geschichte der Bohrschen Atomtheorie*. Weinheim: VCH 1974
- HUTTEN, Ernest Hirschclaff: The role of models in physics. *British Journal for the Philosophy of Science* 4, 284–301 (1953/54)
- HUTTEN, Ernest Hirschclaff: *The Language of Modern Physics*. New York: Macmillan 1956
- IRMSCHER, Johannes: *Die Analogie. Versuch einer Wortgeschichte*. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Rostock, geisteswiss. Reihe* 37, 4–6 (1988)
- JAMES, William: *Principles of Psychology*. 2 Vol. New York: Holt 1890
- JAMMER, Max: *Die Entwicklung des Modellbegriffs in den physikalischen Wissenschaften*. *Studium Generale* 18, 166–173 (1965)
- JAMMER, Max: *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York: McGraw-Hill 1966
- JEVONS, William Stanley: *The Principles of Science*. (1. Aufl. 1874) London: MacMillan 1920
- JONES, Roger S.: *Physics as Metaphor*. Minneapolis: Univ. of Minnesota Press 1982
- KARGON, Robert: Model & analogy in Victorian science. Maxwell's critique of the french physicists. *Journal for the History of Ideas* 30, 423–436 (1969)
- KAULBACH, Friedrich: *Modell*. In: RITTER, Joachim, und GRÜNDER, Karlfried (Hrsg.): *Historisches Wörterbuch der Philosophie*. Bd. 6, Sp. 45–47. Basel: Schwabe 1984
- KEANE, Mark T., LEDGEWAY, Tim, and DUFF, Stuart: Constraints on analogical mapping. A comparison of three models. *Cognitive Science* 18, 387–438 (1994)
- KEMP, Martin: *Leonardo da Vinci: Experience, Experiment and Design*. London: Victoria and Albert Museum, 2006
- KEYNES, John Maynard: *A Treatise on Probability*. London: Macmillan 1921
- KIPNIS, Nahum: Scientific analogies and their use in teaching science. *Science and Education* 14, 199–233 (2005)
- KITTAY, Eva, and LEHRER, Adrienne: Semantic fields and the structure of metaphor. *Studies in Language* 5, 31–63 (1981)
- KLEIN, Martin: Mechanical explanation at the end of the 19th century. *Centaurus* 19, 58–82 (1972)
- KLEIN, Ursula: *Verbindung und Affinität: die Grundlegung der neuzeitlichen Chemie an der Wende vom 17. zum 18. Jahrhundert*. Basel: Birkhäuser 1994
- KLOTTER, Karl: Die Analogie zwischen elektrischen und mechanischen Schwingungen. *Ingenieurarchiv* 18, 291–301 (1950)
- KLUXEN, Wolfgang: *Analogie I*. In: RITTER, Joachim (Hrsg.): *Historisches Wörterbuch der Philosophie*. Bd. 1, Sp. 214–227. Darmstadt 1971
- KNORR-CETINA, Karin: The scientist as an analogical reasoner: A critique of the metaphor theory of innovation. *Communication & Cognition* 13, 183–208 (1980)
- KOPPE, Franz: *Metapher*. In: *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie* 2, 867–870 (1995)
- KRAGH, Helge: The fine structure of hydrogen and the gross structure of the physics community. *Historical Studies in the Physical Sciences* 15, 67–125 (1984/85)
- KROES, Peter A.: Structural analogies between physical systems. *British Journal for the Philosophy of Science* 40, 145–154 (1989)
- LAKOFF, George, and JOHNSON, Mark: *Metaphors We Live by*. University of Chicago Press 1980. In dt. Übers.: *Leben in Metaphern. Konstruktion und Gebrauch von Sprachbildern*. Heidelberg: Auer, 4. Aufl. 2004
- LAKOFF, George, and JOHNSON, Mark: Conceptual metaphor in everyday language. *The Journal of Philosophy* 77, 453–487 (1980)
- LAUDAN, Larry: The clock metaphor and probabilism: The impact of Descartes on english methodological thought, 1650 – 1665. *Annals of Science* 22, 73–104 (1966)
- LEATHERDALE, William Hilton: *The Role of Analogy, Model and Metaphor in Science*. Amsterdam: North Holland Publ. 1974

- LEVIN, Samuel R.: *The Semantics of Metaphor*. Baltimore: Johns Hopkins 1977
- LIEBIG, Justus: *Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie*. Braunschweig: Vieweg 1840
- LLOYD, Geoffrey E. R.: *Polarity and Analogy. Two Types of Argumentation in Early Greek Thought. Teil II*. Cambridge Univ. Press 1966
- LLOYD, Geoffrey E. R.: *Analogy in early Greek thought*. In: WIENER, Philip P. (Ed.): *Dictionary of the History of Ideas. Vol. 1*, pp. 60–63. New York: Scribners 1968
- LO, Yuet Keung: *From analogy to proof. An inquiry into the Chinese mode of knowledge*. *Monumenta Serica* 43, 141–158 (1995)
- LODGE, Sir Oliver J.: *Neueste Anschauungen über Elektrizität*. Hrsg. von Richard WACHSMUTH, übersetzt von Anna von MOHL von HELMHOLTZ und Estelle DU BOIS-REYMOND. Leipzig: Barth 1896
- LORENZ, Konrad Z.: *Analogy as a source of knowledge. Nobel Lecture, Dec. 12, 1973*. In: *Les Prix Nobel en 1973*, Stockholm, 1974 (bzw. unter nobelprize.org online im Internet verfügbar)
- MAASEN, Sabine, and WEINGART, Peter: *Metaphors and the Dynamics of Knowledge*. London: Routledge 2000
- MACH, Ernst: *Die Ähnlichkeit und Analogie als Leitmotiv der Forschung*. In: MACH, Ernst: *Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zu einer Psychologie der Forschung*. Leipzig: Barth, 1. Aufl. 1905, 5. Aufl. 1926
- MAXWELL, James Clerk: *On Faraday's lines of force (1855)*. Wiederabdruck in: MAXWELL, James Clerk: *Scientific Papers*. Ed. by W. D. NIVEN. Vol. 1, pp. 158–229. Cambridge Univ. Press 1890 (bzw. Reprint New York: Dover)
- MAXWELL, James Clerk: *On physical lines of force (1862)*. Wiederabdruck in: MAXWELL, James Clerk: *Scientific Papers*. Ed. by W. D. NIVEN. Vol. 1, pp. 451–513. Cambridge Univ. Press 1890 (bzw. Reprint New York: Dover)
- MAXWELL, James Clerk: *Scientific Papers*. Ed. by William Davidson NIVEN. Cambridge Univ. Press 1890 (bzw. Reprint New York: Dover)
- McREYNOLDS, Paul: *The clock metaphor in the history of psychology*. In: NICKLES, Thomas (Ed.): *Scientific Discovery: Case Studies*; pp. 97–112. Dordrecht: Reidel 1978
- MELLOR, David Hugh: *Models and analogies in science: Duhem versus Campbell*. *Isis* 59, 282–290 (1968)
- MENGEL, Peter: *Analogien als Argumente*. Frankfurt, Bern, New York: Lang 1995
- METZGER, Hélène: *Les conceptions scientifiques*. Paris: Alcan 1926
- MILANT'EV, V. P.: *Creation and development of Bohr's theory*. *Physics Uspekhi* 47, 197–203 (2004)
- MILL, John Stuart: *A System of Logic Ratiocinative and Inductive, Being a Connected View of the Principles of Evidence, and the Methods of Scientific Investigation (1. Ed. London 1843), hier zitiert nach der 8. Aufl. New York: Harper & Brothers 1887*
- MINDEL, Joseph: *The use of metaphor: Henry Adams and the symbols of science*. *Journal for History of Ideas* 26, 89–102 (1965)
- MOYER, Donald F.: *Energy, dynamics, hidden machinery: Rankine, Thomson and Tait, Maxwell*. *Studies in the History and Philosophy of Science* 8, 251–269 (1977)
- MÜLLER, Roland: *Zur Geschichte des Modelldenkens und des Modellbegriffs*. In: STACHOWIAK Herbert (Hrsg.): *Modelle – Konstruktion der Wirklichkeit*. S. 17–86. München: Wilhelm Fink Verlag 1983 (bzw. online, Zugriff 2.8.2007): <http://www.muellerscience.com/MODELL/Begriffsgeschichte/GeschichtedesModelldenkens1978-79.htm>
- NAGEL, Ernest: *The Structure of Science*. New York: Harcourt, Brace & World 1961
- NERSESSIAN, Nancy J.: *Reasoning from imagery and analogy in scientific concept formation*. *PSA I*, 41–47 (1988)
- NERSESSIAN, Nancy J.: *Maxwell and the 'Method of physical Analogy'. Model-based reasoning, generic abstraction, and conceptual change*. In: MALEMENT, David B. (Ed.): *Reading Natural Philosophy. Essays in the History and Philosophy of Science and Mathematics*; pp. 129–166 Chicago; La Salle: Open Court 2002
- OPPENHEIMER, Robert: *Analogy in science*. *American Psychologist* 11, 127–135 (1956)
- PARK, Katherine: *Bacon's enchanted glass*. *Isis* 75, 290–302 (1984)
- PARK, Katherine, DASTON, Lorraine, and GALISON, Peter: *Bacon, Galileo, and Descartes on imagination and analogy*. *Isis* 75, 278–290 (1984)
- PERELMAN, Charles: *Analogie et métaphore en science, poésie et philosophie*. *Revue Internationale de Philosophie*. 23. Année (Sonderheft 87: L'Analogie), 3–15 (1969)
- PERELMAN, Charles, and OLBRECHTS-TYTECA, Lucie: *The New Rhetoric. A Treatise on Argumentation*. Notre Dame Univ. Press 1969, erweiterte Neuauflage 2000 (franz. Orig.: *Traité de l'argumentation*. Paris 1958)
- POUILLET, Claude Servais Matthias: *Note sur un moyen de mesurer des intervalles de temps extrêmement courts, ... Comptes Rendus hebdomadaires de l'Académie des Sciences, Paris* 19, 1384–1389 (1839)
- PRANDTL, Ludwig: *Eine neue Darstellung der Torsionsspannungen bei prismatischen Stäben von beliebigem Querschnitt*. *Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung* 13, 31–36 (1904)
- PSILLOS, Stathis: *The cognitive interplay between theories and models: The case of 19th century optics*. *Poznan Studies in the Philosophy of the Sciences and Humanities* 44, 105–133 (1995)

- RADMAN, Zdravko: The multidimensionality of metaphor. *Synthesis Philosophica* 11, 3–8 (1991)
- RANDALL, Lisa: *Verborgene Universen. Eine Reise in den extradimensionalen Raum*. Frankfurt: Fischer 2006 (engl. Orig.: *Warped Passages. Unravelling the Mysteries of the Universe*. New York: Harper Collins 2005)
- REDHEAD, Michael: Models in physics. *British Journal for the Philosophy of Science* 31, 145–163 (1980)
- REGENBOGEN, Otto: Eine Forschungsmethode antiker Naturwissenschaft. *Quellen und Studien zur Geschichte der Mathematik, Astronomie und Physik, Abt. B, I*, 131–182 (1931)
- REICHENBACH, Hans: *The Rise of Scientific Philosophy*. Berkeley: Univ. of California Press 1957
- RICHTER, Jean Paul: *The Notebooks of Leonardo da Vinci*. London 1888
- ROTHBART, Daniel: The semantics of metaphor and the structure of science. *Philosophy of Science* 51, 595–615 (1984)
- RUSE, Michael: The value of analogical models in science. *Dialogue* 12, 246–253 (1973)
- SALMON, Wesley C.: *Logik*. Stuttgart: Reclam 1983
- SARLEMIJN, Andries: Analogy, analysis and transistor research. *Methodology and Science* 20/1, 40–61 (1987)
- SARLEMIJN, Andries, and KROES, Peter A.: Technological analogies and their logical nature. In: DURBIN, Paul T. (Ed.): *Technology and Contemporary Life*; pp. 237–255. Dordrecht: Reidel 1988
- SCHADEWALDT, Wolfgang: *Die Anfänge der Philosophie bei den Griechen. Die Vorsokratiker und ihre Voraussetzungen*. Frankfurt: Suhrkamp 1978
- SCHARRER, Ernst: Anatomy and the concept of analogy. *Science New Series* 103, 578–579 (1946)
- SCHIEMANN, Gregor: *Wahrheitsgewißheitsverlust*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1997
- SCHLEINER, Winfried: *The Imagery of John Donne's Sermons*. Providence: Brown Univ. 1970
- SCHLIMM, Dirk: Two ways of analogy: Extending the study of analogies to mathematical domains. *Philosophy of Science* 75, 178–200 (2008)
- SCHMÄLZLE, Peter: Intelligentes Wissen aufbauen. *Physik-Journal* 8/4, 41–44 (2009)
- SCHMIDT, Gunnar: *Medienästhetik. Splashes & Flashes*. online unter <http://www.medien.aesthetik.de/medien/high-speed.html> (Zugriff zuletzt am 7.9.2008).
- SCHMIDT, Ursula: Argumentation in der Wissenschaft. Galileis Entwicklung des ‚Trägheitsprinzips‘ als ein Beispiel nicht-deduktiven Argumentierens. In: WOHLRAPP, Harald (Hrsg.): *Wege der Argumentationsforschung*. S. 306–338. Stuttgart: Frommann-Holzboog 1995
- SCHNEIDER, Thomas: Die Waffe der Analogie. Altägyptische Magie als System. In: GLOY, Karen, und BACHMANN, Manuel (Hrsg.): *Das Analogiedenken. Vorstöße in ein neues Gebiet der Rationalitätstheorie*. S. 37–85. Freiburg; München: Alber 2000
- SEELIGER, Rudolf: Analogien und Modelle in der Physik. *Studium Generale* 1, 125–137 (1947/48)
- SHELLEY, Cameron: Analogy counterarguments and the acceptability of analogical hypotheses. *British Journal for the Philosophy of Science* 53, 477–496 (2002a)
- SHELLEY, Cameron: The analogy theory of disanalogy: When conclusions collide. *Metaphor and Symbol* 17/2, 81–97 (2002b)
- SIEGEL, Daniel: *Innovation in Maxwell's Electromagnetic Theory: Molecular Vortices, Displacement Currents, and Light*. Cambridge 1991
- SNELDERS, Henricus A. M.: Analogieschlüsse in der chemischen Vergangenheit: Irrwege und Wegweiser. *NTM, N.F.* 2, 65–75 (1994)
- SPRAT, Thomas: *History of the Royal Society*. London: Martyn, 1667 (bzw. als komm. Reprint von COPE, Jackson I., and JONES, Harold Whitmore (Eds.). Saint Louis: Washington Univ. Studies 1958)
- SPURGEON, Caroline F. E.: *Shakespeare's Imagery and What It Tells Us*. Cambridge Univ. Press 1935 (u. div. Reprints)
- STACHOWIAK, Herbert (Hrsg.): *Modelle – Konstruktion der Wirklichkeit*. München: Wilhelm Fink Verlag 1983
- STAHL, Ann Brower: Concepts of time and approaches to analogical reasoning in historical perspective. *American Antiquity* 58/2, 235–260 (1993)
- STEGMÜLLER, Wolfgang: *Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie. Bd. II: Theorie und Erfahrung. Studienausgabe Bd. F: Neuer intuitiver Zugang zum strukturalistischen Theorienkonzept, Theorie-Elemente, Theoriennetze, Theorieevolutionen*. Berlin: Springer 1986
- STEPAN, Nancy L.: Race and gender: The role of analogy in science. *Isis* 77, 261–277 (1986)
- STICKER, Bernhard: *naturam cognosci per analogiam. Das Prinzip der Analogie in der Naturforschung bei Leibniz*. In: *Akten des Internationalen Leibniz-Kongresses 1966, Bd. II*. Wiesbaden: Steiner 1969
- STITES, Raymond S.: *The Sublimations of Leonardo da Vinci*. Washington: Smithsonian Institution Press 1970
- STRUB, Christian: *Kalkulierte Absurditäten. Versuch einer historisch reflektierten sprachanalytischen Metaphorologie*. Freiburg, München: Alber 1991
- SZABÓ, Árpád: *Anfänge der griechischen Mathematik*. München, Wien: Oldenbourg 1969

- THIEL, Christian: Analogie. Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie 1, 98–99 (1995)
- THOMPSON, d'Arcy Wentworth: On Growth and Form. Cambridge Univ. Press, 1942 (orig. 1917, bzw. in gekürzter Fassung ebenda 1961)
- THOMSON, Lord William: Notes of Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light. Baltimore: Johns Hopkins 1884. Wiederabdruck in: KARGON, Robert, and ACHINSTEIN, Peter (Eds.): Kelvin's Baltimore Lectures and Modern Theoretical Physics 1884. Cambridge, Mass: MIT Press 1987
- TIEMANN, Axel: Analogie. Analyse einer grundlegenden Denkweise in der Physik. Frankfurt: Harri Deutsch 1993
- TOURANGEAU, Roger, and STEINBERG, Robert J.: Aptness in Metaphor. *Cognition* 13, 27–55 (1981)
- TREAGUST, David F.: Science teachers' use of analogies: Observations from classroom practice. *International Journal for Science Education* 14, 413–422 (1992)
- ULLMANN, Stephen: The Image in the Modern French Novel: Gide, Alain-Fournier, Proust and Camus. London: Cambridge Univ. Press 1960
- VAN'T HOFF, Jacobus Henricus: Etudes de dynamique chimique (1884). In deutscher Übersetzung von COHEN, Ernst: Studien zur chemischen Dynamik. Amsterdam: Muller 1896
- VAN'T HOFF, Jacobus Henricus: Lois de l'équilibre chimique (1885). In dt. Übers.: Die Gesetze des chemischen Gleichgewichtes für den verdünnten, gasförmigen oder gelösten Zustand. Leipzig: Engelmann 1900
- VOSNIADOU, Stella, and ORTONY, Andrew: The emergence of the literal-metaphorical-anomalous distinction in young children. *Child Development* 54, 154–161 (1983)
- WEINRICH, Harald: Metapher. *Historisches Wörterbuch der Philosophie*. Bd. 5, Sp. 1179–1186. Basel: Schwabe 1983
- WEITZENFELD, Julian S.: Valid reasoning by analogy. *Philosophy of Science* 51, 137–149 (1984)
- WELLER, Charles M.: The role of analogy in teaching science. *Journal of Research in Science Teaching* 7, 113–119 (1970)
- WINNER, Ellen, ROSENSTIEL, Anne K., and GARDENER, Howard: The development of metaphoric understanding. *Developmental Psychology* 12, 289–297 (1976)
- WISE, M. Norton: The mutual embrace of electricity and magnetism. *Science* 203, 1310–1318 (1979)
- WITT, Hermann DE: Analogik. Grundlagen einer Wissenschaft der Analogien, ihre Gesetze und Anwendungen. Luzern, Winterthur: Divine Light Zentrum 1972
- WOLTERS, Gereon: ‚Modell‘ bzw. ‚Modelltheorie‘. In: MITTELSTRASS, Jürgen (Hrsg.): Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie. Bd. 2, S. 911–913. Stuttgart: Metzler (1995)
- WRIGHT, Thomas: Scale models, similitude and dimensions: Aspects of mid-19th century engineering science. *Annals of Science* 49, 239–254 (1992)
- WYLIE, Alison: 'Simple' analogy and the role of relevance assumptions: Implications of archaeological practice. *International Studies in the Philosophy of Science* 2/2, 137–150 (1988)
- YOUNG, Robert Maxwell: Malthus and the evolutionists: The common context of biological and social theory. *Past and Present* 43, 109–145 (1969)
- YUKAWA, Hideki: Tabibito – ein Wanderer. Stuttgart: Wissenschaftl. Verlagsgesellschaft 1985
- ZEITOUN, Hassan Hussein: Teaching scientific analogies: A proposed model. *Research in Science & Technological Education* 2, 107–125 (1984)

Prof. Dr. rer. nat. habil. Dipl.-Phys. Klaus HENTSCHEL M.A.
Leiter der Abteilung für Geschichte der Naturwissenschaften und Technik und
Geschäftsführender Direktor des Historischen Instituts
Universität Stuttgart
Keplerstraße 17
70174 Stuttgart
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 711 685 82312
Fax: +49 711 685 82767
E-Mail: klaus.hentschel@po.hi.uni-stuttgart.de