

Modell - idealisierende Nachbildung eines konkreten Objektes oder Systems. Diese Nachbildung kann material oder abstrakt-theoretisch sein.

1. Begriffsbestimmung

Der Begriff 'Modell' leitet sich vom Lateinischen 'modulus' (das Maß) ab, im Italienischen existiert seit dem 16. Jh. 'modello' und R. Descartes verwendet im 17. Jh. 'modèle'. Während der Begriff in Architektur und Kunst schon seit der Renaissance gängig ist, wird er in den Naturwissenschaften erst im 19. Jh. verwendet.¹ Dort greifen wissenschaftliche Modelle die für eine gegebene Problemstellung als wesentlich erachteten Charakteristika (Eigenschaften, Beziehungen, etc.) eines Untersuchungsgegenstandes heraus und machen diesen so einem Verständnis bzw. einer weiterführenden Untersuchung zugänglich. Es ist üblich, zwischen Skalenmodellen, Analogmodellen und theoretischen Modellen zu unterscheiden.²

Skalenmodelle sind vergrößerte oder verkleinerte Nachahmungen des (realen oder imaginären) Untersuchungsgegenstandes. Beispiele für Skalenmodelle sind miniaturisierte Flugzeugmodelle, Modelleisenbahnen und dreidimensionale Darstellungen eines DNA-Stranges. Skalenmodelle bilden die *geometrische Form* möglichst getreu nach, während andere Aspekte, wie etwa der Motor in einem Spielauto, nicht bzw. nur unzureichend berücksichtigt werden. Im Vergleich dazu imitieren *Analogmodelle* die *Struktur* des Untersuchungsgegenstandes. Beispiele für Analogmodelle sind hydraulische Modelle in der Ökonomie, mechanische Modelle in der Elektrodynamik, das Planetenmodell des Atoms und das Computermodell des menschlichen Gehirns. Im Gegensatz zu Skalenmodellen schlagen Analogmodelle eine Strukturähnlichkeit (Homomorphie) zwischen einem bereits bekannten und dem zu untersuchenden Gegenstand vor mit der Absicht, neue Hypothesen über letzteren zu generieren. Während es sich bei Skalenmodellen und Analogmodellen gewöhnlich um materiale Modelle handelt, werden die als wesentlich erachteten Eigenschaften eines Objektes oder Systems in einem *theoretischen Modell* in einem (möglichst minimalen) Bündel von Annahmen und Gleichungen erfaßt. Viele theoretische Modelle, wie das

Billardkugelmodell kinetischer Gase, das Urknallmodell der Kosmologie und das Bohrsche Atommodell, haben eine anschauliche Komponente; das Modell läßt sich visualisieren, was zum Verständnis des Untersuchungsgegenstandes beiträgt. Häufig gehen theoretische Modelle auch aus einer Analogierelation zu einem bereits bekannten Modell hervor oder entwickeln sich aus der Abstraktion eines materialen Analogmodells. Dies zeigt, daß sich viele Modelle einer klaren kategorialen Einordnung entziehen.

Der Modellbegriff tritt auch in der Metamathematik an zentraler Stelle auf. In der mathematischen Modelltheorie versteht man unter dem Modell einer Theorie eine Struktur, die die Axiome der betreffenden Theorie erfüllt.³ So handelt es sich beispielsweise bei der Kleinschen Vierergruppe um das (konkrete) Modell für die (abstrakte) Struktur einer Gruppe, die durch ein Axiomensystem vollständig definiert ist. Einige Philosophen bestehen darauf, daß alle anderen Modellbegriffe unter den Modellbegriff der mathematischen Modelltheorie subsummiert werden können.⁴ Diese Behauptung ist jedoch umstritten.⁵

2. Problemgeschichte

Die wissenschaftsphilosophische Literatur konzentriert sich vorrangig auf theoretische Modelle.⁶ Dabei können vier zeitlich aufeinanderfolgende Phasen unterschieden werden. Die *erste Phase* beginnt Anfang dieses Jahrhunderts mit Analysen des französischen Physikers und Wissenschaftsphilosophen P. Duhem (1908), der Rolle und Bedeutung von (anschaulichen) mechanischen Modellen und (formalen) fundamentalen Theorien gegeneinander abwägt. Obwohl Duhem eine Physik, die sich v.a. auf die Verwendung von Modellen stützt, als minderwertig und vorläufig erachtet, gelingt ihm doch eine richtungsweisende Charakterisierung von wissenschaftlichen Modellen. Ziel der Modellbildung ist es demzufolge, Eigenschaften und Verhalten materieller Objekte oder Systeme zu erfassen, indem ein Mechanismus vorgeschlagen wird, der sie *imitiert*. Das Modell *repräsentiert* dabei den betrachteten Untersuchungsgegenstand. Duhem gesteht außerdem zu, daß auf Analogien beruhenden Modellen eine Leitfunktion im Forschungsprozeß zukommen

kann. Dennoch zielt die Physik seiner Meinung nach letztlich nur auf allgemeine und abstrakt formulierte Prinzipien und Theorien ab.⁷ Im Gegensatz dazu betont Duhems britischer Gegenspieler N. Campbell (1920) gerade die Notwendigkeit von Analogien als wesentlichen Bestandteilen von Theorien, ohne dabei jedoch den Begriff ‘Modell’ explizit zu verwenden.⁸ Es ist interessant festzustellen, daß Duhem und Campbell vor dem Hintergrund der klassischen Physik bereits viele von den Themen diskutieren, die später (in der dritten und vierten Phase) wieder ins Zentrum wissenschaftsphilosophischer Betrachtungen rücken.⁹

In der *zweiten Phase*, dem Logischen Empirismus, werden Modelle zunächst nur als Randphänomene der Wissenschaft wahrgenommen. So schreibt etwa R. Carnap: ”It is important to realize that the discovery of a model has no more than an aesthetic or didactic or at best a heuristic value, but it is not at all essential for a successful application of the physical theory.”¹⁰ Dabei werden Theorien, inspiriert von der reinen Mathematik, syntaktisch als uninterpretierte (oder nur teilweise interpretierte) Kalküle oder Axiomensysteme rekonstruiert. Spätere Autoren, wie R. Braithwaite (1968) und E. Nagel (1961), bemühen sich zwar, der Bedeutung von Modellen in den Wissenschaften im Rahmen der Standardauffassung (‘received view’, ‘statement view’) gerecht zu werden, eine Reduktion des Modellbegriffs auf formal-syntaktische Elemente erweist sich jedoch aufgrund des vielfältigen Gebrauchs von Modellen in der wissenschaftlichen Praxis als problematisch.¹¹

Dieser Problematik nehmen sich in den sechziger Jahren, der *dritten Phase*, zahlreiche Autoren an.¹² Dabei entstehen zum einen Arbeiten, die versuchen, formalistische und modelltheoretische Ansätze stärker mit der Vielfalt wissenschaftlicher Praxis in Einklang zu bringen,¹³ und zum anderen werden Alternativvorschläge zur Sichtweise der Logischen Empiristen entwickelt, die v.a. auf die Verwendung von Modellen in der wissenschaftlichen Praxis und auf deren Funktionen abheben.¹⁴ In diesem Zusammenhang rückt der Entdeckungszusammenhang von Theorien und Modellen ins Zentrum der Betrachtung. Manche Autoren schlagen deshalb vor, Modelle im Sinne von Metaphern zu interpretieren, um das kreative Potential von Modellen zu verdeutlichen (s. 3.3).¹⁵

Die *vierte Phase*, beginnend um 1980, hebt Modelle noch stärker als wesentliche Elemente der wissenschaftlichen Praxis heraus. In vielen detaillierten Untersuchungen und Fallstudien aus verschiedenen Einzelwissenschaften wird versucht zu verstehen, wie Modelle funktionieren und wie sie in der wissenschaftlichen Praxis konstruiert werden. Dabei wird z.T. auf Wissensbereiche außerhalb der Philosophie, insbesondere die kognitive Psychologie, zurückgegriffen.¹⁶ Weiterhin wird herausgearbeitet, welche Konsequenzen die Benutzung von Modellen für andere philosophische Fragen, wie die Realismus- und die Reduktionismusdebatte, hat (s. 3.4 und 3.5). Die grundlegende Bedeutung von Modellen im Forschungsprozeß wird auch von den Vertretern der semantischen Theorieauffassung ('semantic view', 'non-statement view') geteilt, die wissenschaftliche Theorien schlicht als Menge von, allerdings modelltheoretisch verstandenen, Modellen rekonstruieren.¹⁷

3. Die gegenwärtige Diskussion

Wie viele andere gegenwärtige wissenschaftsphilosophische Debatten ist auch die Kontroverse um die wissenschaftliche Modellbildung im Spannungsfeld zwischen präskriptiven und dekritiven Ansätzen angesiedelt. Deskriptive Ansätze orientieren sich am Gebrauch des Begriffes in der wissenschaftlichen Praxis und sehen sich dabei mit einer Vielzahl von Verwendungsweisen konfrontiert, so daß wenig Aussicht auf eine allgemeine (und nicht-leere) Definition von 'Modell' und eine systematische Unterscheidung von 'Modell' und 'Theorie' besteht. Demgegenüber versuchen präskriptive Ansätze gerade *mit* einer solchen Definition eine inflationäre Verwendung des Begriffes zu kritisieren und einzuschränken. Dabei besteht jedoch die Gefahr, an der wissenschaftlichen Praxis 'vorbeizuphilosophieren'.¹⁸

3.1 Zur Typologie wissenschaftlicher Modelle

Um die Vielfalt der wissenschaftlichen Praxis hinreichend zu berücksichtigen, wurden zahlreiche begriffliche Unterscheidungen eingeführt.¹⁹ Es ist allerdings umstritten, ob

eine systematische Typologie überhaupt dazu beitragen kann, den Problembereich zu erhellen. Deshalb soll im folgenden nur die grundsätzliche Unterscheidung zwischen Modellen einer Theorie und phänomenologischen Modellen eingeführt werden. (1) *Modelle einer Theorie* sind konkrete Realisationen einer allgemeinen Theorie. Um z.B. die Bewegung eines Pendels zu beschreiben, muß der Formalismus der Newtonschen Mechanik (=allgemeine Theorie) durch eine Spezifikation des betrachteten Modellobjektes ergänzt werden.²⁰ Diese beinhaltet Annahmen über die räumliche Anordnung und die Festlegung der funktionalen Form der Rückstellkraft des Pendels. Erst dann kann die allgemeine Theorie auf das (nun) konkrete Problem angewendet werden. (2) *Phänomenologische Modelle* sind weitgehend unabhängig von allgemeinen Theorien.²¹ Dies hat oft pragmatische Gründe. Entweder liegt keine allgemeine Theorie vor, oder die Anwendung der Theorie ist aus Komplexitätsgründen aussichtslos. Unter Umständen kann das phänomenologische Modell der allgemeinen Theorie sogar widersprechen.²²

3.2 Die Funktionen von Modellen

Neben der systematischen Unterscheidung verschiedener Modelltypen sind einige Autoren bestrebt, Modelle pragmatisch-deskriptiv nach ihren Funktionen im Forschungsprozeß zu charakterisieren. Es zeigt sich, wie L. Apostel schon 1961 konstatierte, daß sich die verschiedenen Funktionen von Modellen nicht gegenseitig ausschließen müssen. Von den vielen mit Fallstudien aus der Physik und anderen Wissenschaften dokumentierten Funktionen betonen manche den engen Bezug von Modellen und Theorien, während andere die epistemologische Autonomie von Modelle hervorheben.

Modelle werden u.a. zu folgenden Zwecken herangezogen: (1) Modelle ermöglichen die Anwendung und den Test von Theorien.²³ (2) Modelle sind ein Hilfsmittel zur Konstruktion von Theorien.²⁴ (3) Modelle fördern das Verständnis abstrakter Theorien und Formalismen.²⁵ (4) Modelle vermitteln zwischen einer Theorie und der Welt.²⁶ (5) Modelle dienen als pragmatischer Ersatz für Theorien.²⁷ (6) Modelle ermöglichen die Beschreibung und Aufbereitung von Daten.²⁸ (7)

Modelle sind ein Baustein von Computersimulationen.²⁹ (8) Modelle helfen dabei, einen Kausalzusammenhang zwischen Ereignissen zu etablieren.³⁰ (9) Modelle ermöglichen das Verständnis eines konkreten Objektes oder Systems.³¹ (10) Modelle sind Bestandteile von wissenschaftlichen Erklärungen.³² (11) Modelle werden als pädagogisches Hilfsmittel im Unterricht eingesetzt. (12) Modelle helfen bei der Konstruktion und Auswertung von Experimenten.³³

3.3 Die kognitive Rolle von Modellen

Eine Untersuchung der kognitiven Rolle von Modellen muß zwei Aspekte auseinanderhalten. Liegt das Modell bereits vor, so gilt es zu erklären, welche kognitive Rolle es für das Verständnis sowohl von konkreten Objekten und Systemen als auch von abstrakten Theorien spielt und welche Eigenschaften es dazu befähigen.³⁴ Auf der anderen Seite werden diejenigen kognitiven Prozesse studiert, die bei der *Entwicklung* eines Modells auftreten.³⁵ Philosophen haben sich dieser Thematik angenommen, seit in den sechziger Jahren die bis dahin grundlegende Dichotomie von Entdeckungszusammenhang und Begründungszusammenhang ins Wanken geriet. Besondere Beachtung haben in diesem Zusammenhang Analogien und Metaphern gefunden. Anknüpfend an Arbeiten von J.M. Keynes unterscheidet M. Hesse (1966) drei Arten von Analogien, die zwischen dem Untersuchungsgegenstand und einem postulierten Analogieobjekt bestehen können. *Positive Analogien* sind offensichtliche Gemeinsamkeiten zwischen beiden Objekten - Gasmoleküle und Billardkugeln sind z.B. beide massiv. *Negative Analogien* sind entsprechend die offensichtlichen Unterschiede - im Gegensatz zu Billardkugeln haben Gasmoleküle z.B. keine Farbe. *Neutrale Analogien* stellen schließlich den Restbereich der Annahmen dar, bei denen noch nicht geklärt ist, ob die behauptete Analogie trägt oder nicht. So ergibt sich aus dem Billiardkugelmodell die Frage, ob die Newtonschen Stoßgesetze auch für Gasteilchen gelten. Den neutralen Analogien wird wegen dieser Klärungsfunktion ein beträchtliches kreatives Potential zugeschrieben; sie regen zukünftige Untersuchungen an und bilden die Basis für neue Vorhersagen und einen experimentellen Test des Modells.³⁶ Darüber hinaus legen

kognitionswissenschaftliche Studien nahe, daß es sich beim Verwenden von auf Ähnlichkeitsrelationen gründenden Analogien um eine grundsätzliche Kategorie kognitiver Verarbeitungsprozesse handelt.³⁷

Um die kreative Rolle von Modellen zu analysieren, identifizieren manche Autoren Modelle (metaphorisch) mit Metaphern.³⁸ Der Wechselwirkungstheorie von M. Black (1962) zufolge werden in einer Metapher Ideen, Bedeutungen und Begriffe aus zwei vormals unverknüpften Bereichen A und B miteinander identifiziert (A=B). Dabei kommt es zur Bedeutungsverschiebung der Begriffe aus den beiden miteinander wechselwirkenden Bereichen. Die Metapher 'Das Gehirn ist ein Computer' verdeutlicht dies, und aus ihr folgt, daß sich unsere Auffassungen sowohl vom Gehirn als auch vom Computer im Lauf der Zeit gegenseitig beeinflusst haben. Zunächst war das menschliche Gehirn Vorbild für die ersten Computer, später wurde der Computer eine wichtige Inspirationsquelle für Gehirnforscher und Psychologen.³⁹ Der Prozeß der provozierten Bedeutungsverschiebung ermöglicht es gerade, daß sich in einem kognitiven Prozeß neue Einsichten ergeben. Durch die Verwendung von Metaphern, genau wie von Modellen, gelingt es uns so, einen neuen Bereich kognitiv zu erschließen.⁴⁰

Weitgehend unabhängig von diesen philosophischen Betrachtungen beschäftigt sich die kognitive Psychologie mit der Frage, wie wir uns Wissensbereiche zugänglich machen.⁴¹ Das dazu entwickelte Konzept des *mental Models* bezeichnet diejenigen mentalen Strukturen, die uns die Lösung kognitiver Aufgaben ermöglichen. Bei solchen kognitiven Aufgaben, die mit mentalen Modellen angegangen werden, kann es sich z.B. auch um logisches Argumentieren (Deduktion und Induktion) handeln.⁴² Mentale Modelle sollen dabei die mit bestimmten 'Denkaufgaben' verbundenen kognitiven Prozesse nachvollziehbar machen. Eine direkte Identifikation eines mentalen Modells mit *neurophysiologischen* Vorgängen ist jedoch (noch?) nicht möglich. In zahlreichen Fallstudien⁴³ v.a. aus dem naturwissenschaftlichen Bereich wird gezeigt, wie Lernende mentale Modelle konstruieren und zur Interpretation physikalischer Phänomene verwenden. Diese Untersuchungen aufgreifend suggeriert R. Giere (1988), daß sich wissenschaftliche Modelle u.U. mit mentalen Modellen

identifizieren lassen.⁴⁴ Ein solches Vorgehen ist jedoch in methodischer Hinsicht problematisch, weil eine solche Identifikation empirisch nicht nachprüfbar ist.⁴⁵

3.4 Modell und Realität

Neben 'internen' Fragen nach Rolle und Funktion von Modellen wird auch diskutiert, welche Konsequenzen die wissenschaftliche Praxis der Modellbildung für andere philosophische Probleme hat. Ein wichtiger Themenkreis betrifft die Debatte um den wissenschaftlichen Realismus. Lassen sich Modelle realistisch interpretieren und untermauert die Praxis der Modellbildung damit sogar eine realistische Wissenschaftsphilosophie oder handelt es sich bei Modellen nur um theoretische Konstrukte, die sich in einem quasi-darwinistischen Ausleseprozeß gegen Konkurrenten durchgesetzt haben, wie es z.B. B. van Fraassen (1980) vermutet?⁴⁶ Diese Fragen kristallisieren sich schon im Werk von P. Duhem (1908) heraus; später werden sie insbesondere von R. Harré (1970), E. McMullin (1984) und N. Cartwright (1983) wieder aufgegriffen. Eine realistische Interpretation von Modellen betrachtet diese als wahrheitsgetreue *Repräsentationen* von realen Objekten oder Systemen. Dies setzt jedoch voraus, daß Modelle in erster Linie einer (zumindest näherungsweisen) empirisch bestätigbaren Beschreibung dieser Objekte oder Systeme verpflichtet sind. Manche Autoren legen jedoch nahe, daß die Stärke von vielen Modellen darin liegt, daß die Übereinstimmung mit der Empirie gerade nicht zum einzigen Kriterium der Akzeptanz von Modellen erhoben wird. Vertreter einer realistischen Position bezüglich Modellen weisen wiederum darauf hin, daß Modelle durch Zurücknehmen ('Deidealisierung', 'Konkretisierung') idealisierender Annahmen immer besser mit experimentellen Daten übereinstimmen, was als Beleg für die Annäherung der Folge von Modellen an die Wahrheit gewertet wird.⁴⁷ Demgegenüber verweisen Antirealisten (bzw. Instrumentalisten) auf die Vielzahl sich widersprechender Modelle für ein und dasselbe Phänomen (z.B. in der Kernphysik oder der Laserphysik) hin und folgern daraus, daß diese nicht alle zugleich wahr sein können.⁴⁸ Deshalb sind (diese) Modelle allein nützliche Konstrukte des menschlichen Geistes, die nur von vorübergehender Relevanz sind. Antirealisten betonen deshalb oft die

vielfältigen Funktionen von Modellen im Forschungsprozeß, obwohl ein solch funktional-pragmatischer Zugang nicht notwendigerweise im Widerspruch zu einer realistischen Wissenschaftsphilosophie stehen muß. Die Diskussion zur Stärkung der verschiedenen Positionen wird methodisch heute vorwiegend auf der Ebene von Fallstudien ausgetragen,⁴⁹ welche z.T. äußerst detailliert sein können.

3.5 Modelle und Reduktionismus

Eine weitere Kontroverse betrifft die Frage, ob die Praxis der Modellbildung eine pluralistische Ontologie nahelegt. Diese Debatte ist eng mit der um den wissenschaftsphilosophischen Fundamentalismus verwoben. Während Fundamentalisten behaupten, daß Theorien (zumindest hypothetisch) universelle Gültigkeit beanspruchen, sind Theorien für Antifundamentalisten, wie N. Cartwright (1998), nur lokal in ihren bestätigten Modellen wahr. Dies wird mit zahlreichen Beispielen aus der Mechanik, der Elektrodynamik und der Quantenmechanik belegt.⁵⁰ Aus der lokalen Gültigkeit sich zum Teil auch in ontologischer Hinsicht widersprechender Modelle wird schließlich eine 'Flickenteppich-Ontologie' abgeleitet. Demgegenüber vertritt M. Stöckler (1998) die These, daß die wissenschaftliche Praxis *auch* mit der entgegengesetzten fundamentalistisch-reduktionistischen Position vereinbar ist.

3.6 Ausblick

Die aktuelle Modelle-Debatte ist überaus verzweigt und nur schwer in klare Kategorien einzuordnen. Dies zeigt sich z.B. auch am Fehlen einschlägiger Monographien; die Diskussion spielt sich bislang ausschließlich in Fachzeitschriften und Aufsatzsammlungen ab.⁵¹ Die Ausarbeitung einer Wissenschaftsphilosophie, die Modelle als zentrale Bausteine der Wissenschaft identifiziert und sie systematisch charakterisiert, ohne ihre funktionale und strukturelle Pluralität herunterzuspielen, bleibt ein wichtiges Desiderat für künftige Arbeiten. Die derzeit vorliegenden Gesamtkonzeptionen, wie der Logische Empirismus und die semantische

Theorieauffassung, sind schon aufgrund ihrer Theoriezentriertheit⁵² nicht in der Lage, dies zu leisten.

Es zeigt sich, daß die Wissenschaftsphilosophie in immer stärkerem Maße auf detaillierte Anregungen aus den Einzelwissenschaften angewiesen ist. So lassen sich etwa aus Vergleichen von Fallstudien aus verschiedenen Disziplinen allgemeine methodologische Strategien der Modellbildung ableiten⁵³ und die Erkenntnisse aus der kognitiven Psychologie sollten dabei helfen zu verstehen, warum wir diesen Strategien folgen.

Schließlich bleibt noch zu klären, inwiefern die Ergebnisse von induktiv verallgemeinerten Fallstudien als Argumente in Debatten, wie die um den wissenschaftlichen Realismus und Reduktionismus, überhaupt angemessen sind. Diese Frage berührt den Kern der Methodologie der Wissenschaftsphilosophie.

Bibliographie:

- Achinstein, P., 1964, Models, Analogies, and Theories. In: Philosophy of Science, 31.
- Achinstein, P., 1968, Concepts of Science, Baltimore.
- Apostel, L., 1961, Towards the Formal Study of Models in the Non-Formal Sciences. In: Freudenthal 1961.
- Bailer-Jones, D. 1997, Scientific Models: A Cognitive Approach with an Application in Astrophysics, Ph.D. Thesis, Cambridge (unveröffentlicht).
- Balzer, W., C.U. Moulines & J. Sneed, 1987, An Architectonic for Science: The Structuralist Program, Dordrecht.
- Black, M., 1962, Models and Metaphors, Ithaca.
- Bradie, M., 1984, The Metaphorical Character of Science, Philosophia Naturalis, 21.
- Braithwaite, R., 1968, Scientific Explanation, Cambridge.
- Bridge, J., 1977, Beginning Model Theory, Oxford.
- Bunge, M., 1973, Method, Model, and Matter, Dordrecht.
- Campbell, N. R., 1957 [1920], Foundations of Science, New York.
- Carnap, R., 1939, Foundations of Logic and Mathematics, Chicago.
- Cartwright, N., 1983, How the Laws of Physics Lie, Oxford.
- Cartwright, N., 1989, Nature's Capacities and Their Measurement, Oxford.
- Cartwright, N., T. Shomar & M. Suarez, 1995, The Toolbox of Science. In: Herfel 1995.
- Cartwright, N., 1998, How Theories Relate: Takeovers or Partnerships? In: Falkenburg & Muschik 1998.
- Conte, R. et al. (Hg.), 1997, Simulating Social Phenomena, Berlin.
- Duhem, P., 1978 [1908], Ziel und Struktur physikalischer Theorien, Hamburg.
- Falkenburg, B. & S. Hauser (Hg.), 1997, Modelldenken in den Wissenschaften. In: Dialektik 1997/1.
- Falkenburg, B. & W. Muschik (Hg.), 1998, Models, Theories and Disunity in Physics. In: Philosophia Naturalis, 35, Heft 1.

- Freudenthal, H. (Hg.), 1961, *The Concept and the Role of the Model in Mathematics and Natural and Social Sciences*, Dordrecht.
- Gentner, D., 1983, *Structure Mapping: A Theoretical Framework for Analogy*. In: *Cognitive Science*, 7.
- Gentner, D. & A. Markman, 1997, *Structure Mapping in Analogy and Similarity*. In: *American Psychologist*, 52.
- Gentner, D. & A. Stevens, (Hg.), 1983, *Mental Models*, Hillsdale.
- Giere, R., 1988, *Explaining Science: A Cognitive Approach*, Chicago.
- Gigerenzer, G. & D. Todd, 1996, *Mind as Computer: Birth of a Metaphor*. In: *Creativity Research Journal*, 9.
- Harré, R., 1960, *Metaphor, Model and Mechanism*. In: *Proceedings of the Aristotelian Society*, 60.
- Harré, R., 1970, *The Principles of Scientific Thinking*, London.
- Hartmann, S., 1995, *Models as a Tool for Theory Construction: Some Strategies of Preliminary Physics*. In: Herfel 1995.
- Hartmann, S., 1996, *The World as a Process: Simulations in the Natural and Social Sciences*. In: Hegselmann 1996.
- Hartmann, S., 1998, *Models and Stories in Hadron Physics*. In: Morrison & Morgan 1998.
- Hegselmann, R. et al. (Hg.), 1996, *Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View*, Dordrecht.
- Herfel, W., 1995, *Models and Theories in Scientific Processes*, Amsterdam.
- Hesse, M., 1966, *Models and Analogies in Science*, Notre Dame.
- Hesse, M., 1983, *The Cognitive Claims of Metaphor*. In: J. van Noppen (Hg.), *Metaphor and Religion*, Brussels.
- Holyoak, K. & P. Thagard, 1997, *The Analogical Mind*. In: *American Psychologist*, 52.
- Jammer, M., 1965, *Die Entwicklung des Modellbegriffes in den physikalischen Wissenschaften*. In: *Studium Generale*, 18, Heft 3.
- Johnson-Laird, P., 1983, *Mental Models*, Cambridge.
- Leatherdale, W., 1974, *The Role of Analogy, Model, and Metaphor*, Amsterdam.

- McMullin, E., 1968, What Do Physical Models Tell Us? In: B. van Rootselaar & J. Staal (Hg.), *Logic, Methodology and Philosophy of Science III*, Amsterdam.
- McMullin, E., 1976, The Fertility of Theory and the Unit for Appraisal in Science. In: R. Cohen et al. (Hg.), *Essays in Memory of Imre Lakatos*, Dordrecht.
- McMullin, E., 1984, Two Ideals of Explanation in Natural Science. In: P. French et al. (Hg.), *Causation and Causal Theories*, *Midwest Studies in Philosophy*, Bd. IX, Minneapolis.
- McMullin, E., 1985, Galilean Idealization. In: *Studies in History and Philosophy of Science*, 16.
- Morrison, M., 1998, Modelling Nature: Between Physics and the Physical World. In: Falkenburg & Muschik 1998.
- Morrison, M. & M. Morgan (Hg.), 1998, *Models as Mediating Instruments*. Cambridge.
- Nagel, E., 1961, *The Structure of Science*, New York.
- Nercessian, N., 1993, In the Theoretician's Laboratory: Thought Experimenting as Mental Modelling. In: D. Hull et al. (Hg.), *PSA 1992*, Bd. 2, East Lansing.
- Psillos, S., 1995, The Cognitive Interplay Between Theories and Models. In: Herfel 1995.
- Redhead, M., 1980, Models in Physics. In: *British Journal for the Philosophy of Science*, 45.
- Rothbart, D., 1984, The Semantics of Metaphor and the Structure of Science. In: *Philosophy of Science*, 51.
- Stöckler, M., 1998, On the Unity of Physics in a Dappled World: Comment on Nancy Cartwright. In: Falkenburg & Muschik 1998.
- Suppes, P., 1961, A Comparison of the Meaning and Uses of Models in Mathematics and the Empirical Sciences. In: Freudenthal 1961.
- Suppes, P., 1962, Models of Data. In: E. Nagel et al. (Hg.), *Logic, Methodology and Philosophy of Science*, Stanford.
- van Fraassen, B., 1980, *The Scientific Image*, Oxford.

D. Bailer-Jones und S. Hartmann

Anmerkungen:

-
- ¹ Vgl. Jammer 1965.
- ² Vgl. Black 1962, S. 219 ff.
- ³ Vgl. Bridge 1977.
- ⁴ Vgl. Suppes 1961, S. 287, van Fraassen 1980, S.44, und Giere 1988, S. 79.
- ⁵ Vgl. Achinstein 1964, S. 32, McMullin 1968, S. 387, Harré 1970, S. 36, Bunge 1973, S. 111 und Hartmann 1996, S. 81.
- ⁶ Cf. Black 1962, S. 219 ff.
- ⁷ Vgl. Duhem 1978, Kap. 4.
- ⁸ Vgl. Campbell 1957, Kap. 6.
- ⁹ Vgl. Hesse 1966, Kap. 2, van Fraassen 1980, S. 86, Cartwright 1983, Essay 5.
- ¹⁰ Carnap 1939, S. 68.
- ¹¹ Vgl. Psillos 1995, S. 107 f.
- ¹² Vgl. Harré 1960, 1970, Apostel 1961, Suppes 1961, 1962, Black 1962, Hesse 1966, Achinstein 1968, McMullin 1968, Bunge 1973, Leatherdale 1974.
- ¹³ Vgl. Apostel 1961, Braithwaite 1968, Bunge 1973.
- ¹⁴ Vgl. Hesse 1966, Achinstein 1968, Harré 1970.
- ¹⁵ Vgl. Black 1962, Hesse 1966 und Harré 1970.
- ¹⁶ Z.B. Nercessian 1993, S.293-295.
- ¹⁷ Vgl. van Fraassen 1980, Balzer et al. 1987, Giere 1988.
- ¹⁸ Vgl. McMullin 1968, S. 386.
- ¹⁹ Vgl. Harré 1970, Leatherdale 1974.
- ²⁰ Vgl. Bunge 1973.
- ²¹ Vgl. McMullin 1968, S. 391.
- ²² Vgl. Hartmann 1995, S. 55 f.
- ²³ Vgl. Bunge 1973 und Redhead 1980.
- ²⁴ Vgl. Hartmann 1995.
- ²⁵ Vgl. Duhem 1978.
- ²⁶ Vgl. Einleitungskapitel von Morrison & Morgan 1998.
- ²⁷ Vgl. Hartmann 1995.
- ²⁸ Vgl. Suppes 1962.
- ²⁹ Vgl. Hartmann 1996.
- ³⁰ Vgl. McMullin 1984, Cartwright 1983 und 1989.
- ³¹ Vgl. Harré 1970, Hartmann 1998.
- ³² Vgl. Achinstein 1968, Cartwright 1983.
- ³³ Vgl. Hartmann 1996.
- ³⁴ Vgl. Hartmann 1998.
- ³⁵ Vgl. McMullin 1976.
- ³⁶ Vgl. Hesse 1966, S. 8 f.
- ³⁷ Vgl. Gentner 1983, Gentner & Markman 1997, Holyoak & Thagard 1997.
- ³⁸ Vgl. Harré 1960, Hesse 1966, McMullin 1976, Rothbart 1984, Bradie 1984.

³⁹ Vgl. Gigerenzer & Todd 1996.

⁴⁰ Vgl. Hesse 1983.

⁴¹ Vgl. Gentner & Stevens, S. 1.

⁴² Vgl. Johnson-Laird 1983.

⁴³ Vgl. Gentner & Stevens 1983.

⁴⁴ Vgl. Giere 1988, S. 6.

⁴⁵ Vgl. Bailer-Jones 1997, Kap. 4.

⁴⁶ Van Fraassen 1980, S. 40.

⁴⁷ Vgl. McMullin 1984, cf. Morrison 1998, S. 77 f.

⁴⁸ Vgl. Cartwright 1983 und Morrison 1998.

⁴⁹ Vgl. Cartwright et al. 1995; Bailer-Jones 1997, Kap. 5.

⁵⁰ Vgl. Cartwright 1998, S. 24-33.

⁵¹ Vgl. Freudenthal 1961, Herfel 1995, Hegselmann 1996, Conte 1997, Falkenburg & Hauser 1997, Falkenburg & Muschik 1998, Morrison & Morgan 1998.

⁵² Vgl. Cartwright et al. 1995.

⁵³ Vgl. Morrison & Morgan 1998.