

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.<sup>1</sup> 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.<sup>2</sup>

*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. Schließlich erfasst ein *theoretisches Modell* die als wesentlich erachteten Eigenschaften eines Objektes oder Systems in einem (möglichst minimalen) Bündel von Annahmen und Gleichungen. 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 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.<sup>3</sup> 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 argumentieren, dass alle anderen Modellbegriffe unter den Modellbegriff der mathematischen Modelltheorie subsumiert werden können.<sup>4</sup> Diese Behauptung ist jedoch umstritten.<sup>5</sup>

## 2. Problemgeschichte

Die wissenschaftsphilosophische Literatur konzentriert sich vorrangig auf theoretische Modelle.<sup>6</sup> Dabei können vier zeitlich aufeinanderfolgende Phasen unterschieden werden. Die *erste Phase* beginnt Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts mit Analysen des französischen Physikers und Wissenschaftsphilosophen P. Duhem (1908), der Rolle und Bedeutung von (anschaulichen) mechanischen Modellen und (abstrakten) 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.<sup>7</sup> 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.<sup>8</sup> 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.<sup>9</sup>

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."<sup>10</sup> Spätere Autoren, wie R. Braithwaite (1968) und E. Nagel (1961), bemühen sich zwar, der Bedeutung von Modellen im Rahmen der Standardauffassung ('received view', 'statement view') wissenschaftlicher Theorien 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.<sup>11</sup>

Dieser Problematik nehmen sich in den sechziger Jahren, der *dritten Phase*, zahlreiche Autoren an.<sup>12</sup> Dabei entstehen zum einen Arbeiten, die versuchen, formalistische und modelltheoretische Ansätze stärker mit der Vielfalt wissenschaftlicher Praxis in Einklang zu bringen,<sup>13</sup> und zum anderen werden Alternativvorschläge zur Sichtweise der Logischen Empiristen entwickelt, die v.a. auf die Funktion von Modellen in der wissenschaftlichen Praxis abheben.<sup>14</sup> In diesem Zusammenhang wird auch untersucht, welche Rolle Analogien und Metaphern bei der Modellbildung spielen (s. 3.3).

Die *vierte Phase*, beginnend um 1980, hebt Modelle noch stärker als wesentliche Elemente der wissenschaftlichen Praxis heraus. In vielen detaillierten Fallstudien aus verschiedenen Wissenschaften wird versucht zu verstehen, wie Modelle funktionieren und wie sie konstruiert werden. Weiterhin wird herausgearbeitet, welche Konsequenzen die Praxis der Modelbildung 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 als Menge von, allerdings modelltheoretisch verstandenen, Modellen rekonstruieren.<sup>15</sup>

### 3. Die gegenwärtige Diskussion

Wie viele andere wissenschaftsphilosophische Debatten ist auch die Kontroverse um die wissenschaftliche Modellbildung im Spannungsfeld zwischen präskriptiven und deskriptiven Ansätzen angesiedelt. Deskriptive Ansätze orientieren sich am Gebrauch des Modellbegriffes 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'.<sup>16</sup>

### 3.1 Zur Typologie wissenschaftlicher Modelle

Um die Vielfalt der wissenschaftlichen Praxis hinreichend zu berücksichtigen, wurden zahlreiche begriffliche Unterscheidungen eingeführt.<sup>17</sup> 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.<sup>18</sup> Diese beinhaltet Annahmen über die räumliche Anordnung des Pendels und die funktionale Form der Kräfte, die auf das Pendel wirken. Erst dann kann die allgemeine Theorie auf das (nun) konkrete Problem angewendet werden. (2) *Phänomenologische Modelle* sind weitgehend unabhängig von allgemeinen Theorien.<sup>19</sup> 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.<sup>20</sup>

### 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 dokumentierten Funktionen betonen manche den engen Bezug von Modellen und Theorien, während andere die epistemologische Autonomie von Modellen hervorheben.<sup>21</sup>

Modelle werden u.a. zu folgenden Zwecken herangezogen: (1) Modelle ermöglichen die Anwendung und den Test von Theorien.<sup>22</sup> (2) Modelle sind ein Hilfsmittel zur Konstruktion von Theorien.<sup>23</sup> (3) Modelle fördern das Verständnis abstrakter Theorien und Formalismen.<sup>24</sup> (4) Modelle vermitteln zwischen einer Theorie und der Welt.<sup>25</sup> (5) Modelle dienen als pragmatischer Ersatz für Theorien.<sup>26</sup> (6) Modelle ermöglichen die Beschreibung und Aufbereitung von Daten.<sup>27</sup> (7) Modelle sind ein Baustein von Computersimulationen.<sup>28</sup> (8) Modelle helfen dabei, einen Kausalzusammenhang zwischen Ereignissen zu etablieren.<sup>29</sup> (9) Modelle ermöglichen das Verständnis eines konkreten Objektes oder Systems.<sup>30</sup> (10) Modelle sind Bestandteile von wissenschaftlichen Erklärungen.<sup>31</sup> (11) Modelle werden als pädagogisches Hilfsmittel im Unterricht eingesetzt. (12) Modelle helfen bei der Konstruktion und Auswertung von Experimenten.<sup>32</sup>

### 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.<sup>33</sup> Auf der anderen Seite werden diejenigen kognitiven Prozesse studiert, die bei der *Entwicklung* eines Modells auftreten.<sup>34</sup> Auch 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 dabei Analogien und Metaphern gefunden.<sup>35</sup>

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 Billardkugelmodell die Frage, ob die 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.<sup>36</sup> Darüber hinaus legen kognitionswissenschaftliche Studien nahe, dass es sich beim Verwenden von auf Ähnlichkeitsrelationen gründenden Analogien um eine grundsätzliche Kategorie kognitiver Verarbeitungsprozesse handelt.<sup>37</sup>

Um die kreative Rolle von Modellen zu analysieren, identifizieren manche Autoren Modelle mit Metaphern.<sup>38</sup> 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.<sup>39</sup> 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.<sup>40</sup>

Weitgehend unabhängig von diesen philosophischen Betrachtungen beschäftigt sich die Kognitionswissenschaft mit der Frage, wie wir uns neue Wissensbereiche zugänglich machen.<sup>41</sup> Das dazu entwickelte Konzept des *mentalen Modells* bezeichnet diejenigen mentalen Strukturen, die uns die Lösung kognitiver Aufgaben ermöglichen. Bei solchen kognitiven Aufgaben, die mit Hilfe von mentalen Modellen gelöst werden, kann es sich z.B. um logisches Argumentieren (Deduktion und Induktion) handeln.<sup>42</sup> 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 Fallstudien<sup>43</sup> 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.<sup>44</sup> Dies ist jedoch problematisch, weil eine solche Identifikation empirisch nicht nachprüfbar ist.<sup>45</sup>

### 3.4 Modell und Realität

Neben ‘internen’ Fragen nach der Rolle und Funktion von Modellen wird diskutiert, welche Konsequenzen die Praxis der Modellbildung für andere Bereiche der Wissenschaftsphilosophie hat. In der Debatte um den wissenschaftlichen Realismus<sup>46</sup> wird zum Beispiel behauptet, dass die Praxis der Modellbildung eine antirealistische Position stützt. So argumentiert N. Cartwright (1983), dass Wahrheit nicht das alleinige Ziel der Modellbildung ist, und zeigt anhand mehrerer Fallstudien, dass als gut erachtete Modelle oft falsch sind und dass wahre Theorien oftmals wenig dazu beitragen, das betreffende Phänomen zu verstehen.

Dem halten Realisten entgegen, dass die Falschheit von Modellen eine realistische Position keineswegs ausschließt. Freilich sind gute Modelle nicht wortwörtlich wahr. Sie können der Wahrheit aber durchaus nahe kommen. Außerdem stellt sich heraus, dass die Vorhersagen eines Modells besser werden, wenn die gemachten Idealisierungen zurückgenommen werden („Konkretisierung“, „De-Idealisierung“). Da Realisten den Vorhersageerfolg eines Modells durch dessen Wahrheitsnähe erklären (vgl. das bekannte Wunderargument), kann die Praxis der Modellbildung durchaus als Argument für den Realismus angeführt werden.<sup>47</sup>

Antirealisten erwidern, dass es schwierig ist, den Begriff der Wahrheitsnähe genau zu bestimmen.<sup>48</sup> Darüber hinaus wird argumentiert, dass ein Modell durch Hinzufügung konkretisierender Korrekturen nicht automatisch besser wird.<sup>49</sup> Es kann auch bestritten werden, dass das stete Hinzufügung konkretisierender Korrekturen guter wissenschaftlicher Praxis entspricht. In vielen Fällen ist noch nicht einmal klar, wie ein gegebenes Modell überhaupt konkretisiert werden kann.<sup>50</sup> Und so bevorzugen es Wissenschaftler in vielen Fällen, zu einem gänzlich neuen

Modellierungsrahmen zu wechseln, als ein gegebenes Modell durch zusätzliche Konkretisierungen immer komplizierter zu machen.

Ein weiteres antirealistisches Argument beginnt mit der Beobachtung, dass Wissenschaftler oftmals mehrere miteinander inkompatible Modelle eines Untersuchungsgegenstandes erfolgreich zum Zwecke der Vorhersage verwenden (z.B. in der Kernphysik).<sup>51</sup> Die verschiedenen Modelle stehen im Widerspruch zueinander, da sie dem Untersuchungsgegenstand unterschiedliche Eigenschaften zuschreiben. Diese Praxis wird zum Problem für Vertreter einer realistischen Position, da Realisten den Vorhersageerfolg eines Modells bekanntlich durch dessen Wahrheitsnähe erklären. Wenn nun aber mehrere miteinander inkompatible Modelle für ein und denselben Untersuchungsgegenstand erfolgreich Vorhersagen machen, dann kann keines dieser Modelle wahr oder auch nur näherungsweise wahr sein.

Realisten haben mehrere Möglichkeiten, darauf zu erwidern. Erstens können sie bezweifeln, dass die besagten Modelle tatsächlich erfolgreiche Vorhersagen machen. Zweitens können sie eine Version des Perspektivischen Realismus<sup>52</sup> vertreten, nachdem jedes Modell nur einzelne Aspekte eines Untersuchungsgegenstandes erklärt. Erst wenn alle diese Aspekte zusammengenommen werden, ergibt sich ein vollständiges (oder zumindest vollständigeres) Bild des Untersuchungsgegenstandes. Drittens können Realisten verneinen, dass es hier überhaupt ein Problem gibt, da Modelle ohnehin immer Idealisierungen involvieren und daher streng genommen falsch sind. Das trifft jedoch auf alle Repräsentationen zu, die alltäglichen genau so wie die wissenschaftlichen. Etwas über die Welt zu erfahren bedeutet vielleicht gerade zu lernen, mit diesen Idealisierungen umzugehen.<sup>53</sup>

### 3.5 Modelle und Reduktionismus

Das Problem der inkompatiblen Modelle wirft weiterhin die Frage auf, wie sich verschiedene wissenschaftliche Modelle zueinander verhalten. Sicher stehen verschiedene Modelle für ein und denselben Untersuchungsgegenstand im allgemeinen nicht in einer deduktiven Beziehung, da sie sich zuweilen widersprechen. Da die meisten dieser Modelle aber in der wissenschaftlichen Praxis unabdingbar sind, ist klar, dass das hierarchische Bild von der Organisation der Wissenschaft, wie es etwa P. Oppenheim und H. Putnam (1958) formuliert haben, nicht plausibel ist.



Einige Autoren habe dagegen ein Bild der Wissenschaft vorgeschlagen, bei dem es keinerlei systematische Beziehungen zwischen unseren Modellen und Theorien gibt.<sup>54</sup> Dieser Auffassung zufolge sind einige Modelle zwar dadurch miteinander verbunden, dass sie ein und denselben Untersuchungsgegenstand repräsentieren. Das bedeutet jedoch nicht, dass es eine darüber hinausgehende (deduktive oder sonstige) Beziehung zwischen ihnen gibt. Wir sind vielmehr mit einem Flickenteppich von Modellen konfrontiert, wobei jedes dieser Modelle seinen jeweiligen Anwendungsbereich hat.<sup>55</sup>

Andere Autoren argumentieren, dass dieses Bild zumindest teilweise inkorrekt ist, da es verschiedene (auch epistemisch relevante) Beziehungen zwischen Modellen und Theorien gibt. Diese Beziehungen reichen von kontrollierten Näherungen und singulären Grenzwert-Relationen<sup>56</sup> bis hin zu strukturellen<sup>57</sup> Beziehungen und sehr losen Beziehungen, die *stories* genannt werden<sup>58</sup>. Diese Vorschläge basieren auf Fallstudien und es bleibt abzuwarten, ob eine noch zu formulierende allgemeine Theorie intertheoretischer Beziehungen eine epistemische Rechtfertigung dieser Beziehungen liefern kann. Ansätze zu einer solchen Theorie gibt es im Rahmen des Bayesianismus.<sup>59</sup>

### 3.6 Ausblick

Die gegenwärtige Modelle-Debatte ist weit verzweigt und nur schwer in klare Kategorien einzuordnen. Dieser Satz aus der ersten Auflage dieser Enzyklopädie ist auch heute, zehn Jahre später, noch gültig. Auch in der aktuellen Literatur findet sich eine Vielzahl detaillierter Fallstudien aus den verschiedenen Wissenschaften. Diese Studien haben dazu beigetragen, methodologische Probleme der einzelnen Wissenschaften und die Praxis der Modellbildung im Allgemeinen besser zu verstehen.<sup>60</sup> Es fehlt jedoch noch immer eine systematisch ausgearbeitete wissenschaftsphilosophische Gesamtkonzeption, die Modelle als zentrale Elemente der Wissenschaft identifiziert, ohne ihre funktionale und strukturelle Pluralität herunterzuspielen. Bailer-Jones (2009) stellt einen wichtigen Schritt in diese Richtung dar. Darüber hinaus gibt es viele offene Fragen zur Rolle von Modellen in wissenschaftlichen Erklärungen, zum Verhältnis von Modellen und Naturgesetzen<sup>61</sup>, zur Methodologie statistischer Modellbildung, zum Verhältnis von Modellen und Simulationen, und dazu, wie Modelle ihren Untersuchungsgegenstand

repräsentieren.<sup>62</sup> Es ist an der Zeit, wieder stärker systematisch ausgerichtete Fragen wie diese in den Fokus zu rücken.<sup>63</sup> Klar ist aber schon jetzt, dass die Wissenschaftsphilosophie auch in Zukunft durch die Beschäftigung mit wissenschaftlichen Modellen in Atem gehalten wird.

#### Bibliographie:

- 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).
- Bailer-Jones, D. 2008, *Standing Up Against Tradition: Models and Theories in Nancy Cartwright's Philosophy of Science*. In: Hartmann et al. (2008).
- Bailer-Jones, D., 2009, *Scientific Models in Philosophy of Science*, Pittsburgh.
- Batterman, R., 2002, *The Devil in the Details: Asymptotic Reasoning in Explanation, Reduction, and Emergence*, New York.
- Batterman, R., 2009, *Idealization and Modeling*. In: *Synthese*.
- Black, M., 1962, *Models and Metaphors*, Ithaca.
- Bokulich, A., 2003, *Horizontal Models: From Bakers to Cats*. In: *Philosophy of Science*, 70.
- Braithwaite, R., 1968, *Scientific Explanation*, Cambridge.
- Brzezinski, J. & L. Nowak (Hg.), 1992, *Idealization III: Approximation and Truth*, Amsterdam.
- Bunge, M., 1973, *Method, Model, and Matter*, Dordrecht.
- Byrne, R.M.J., 2005, *The Rational Imagination: How People Create Alternatives to Reality*, Cambridge, Mass.
- 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., 1999, The Dappled World. A Study of the Boundaries of Science, Cambridge.
- Conte, R. et al. (Hg.), 1997, Simulating Social Phenomena, Berlin.
- Duhem, P., 1978 [1908], Ziel und Struktur physikalischer Theorien, Hamburg.
- Eck, C., H. Garcke & P. Knabner, 2008, Mathematische Modellierung, Berlin.
- 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.
- French, S. & N. da Costa, 2003, Science and Partial Truth: A Unitary Approach to Models and Reasoning in Science, Oxford.
- Freudenthal, H. (Hg.), 1961, The Concept and the Role of the Model in Mathematics and Natural and Social Sciences, Dordrecht.
- Frigg, R., 2006, Scientific Representation and the Semantic View of Theories, *Theoria*, 55.
- Frigg, R. & S. Hartmann, 2006, Models in Science. In: The Stanford Encyclopedia of Philosophy.
- Frigg, R., S. Hartmann & C. Imbert (Hg.), 2009, Models and Simulations. In: *Synthese*.
- Gähde, U., 1997, Anomalies and the Revision of Theory-Nets. Notes on the Advance of Mercury's Perihelion. In: M. Dalla Chiara et. al (Hg.), Structures and Norms in Science, Dordrecht.
- 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.
- Giere, R., 1999, Science without Laws, Chicago.
- Gigerenzer, G. & D. Todd, 1996, Mind as Computer: Birth of a Metaphor. In: *Creativity Research Journal*, 9.
- Godfrey-Smith, P., 2006, The Strategy of Model-Based Science. In: *Biology and Philosophy*, 21.
- Hacking, I., 1983, Representing and Intervening, Cambridge.

- 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., 1999, *Models and Stories in Hadron Physics*. In: Morgan & Morrison 1999.
- Hartmann, S., 2008, *Modeling High-Temperature Superconductors: Correspondence at Bay?* In: L. Soler, H. Sankey & P. Hoyningen-Huene (Hg.), *Rethinking Scientific Change. Stabilities, Ruptures, Incommensurabilities?* Berlin.
- Hartmann, S. et al. (Hg.), 2008, *Nancy Cartwright's Philosophy of Science*, London.
- Hegselmann, R. et al. (Hg.), 1996, *Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View*, Dordrecht.
- Herfel, W. et al. (Hg.), 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.
- Hodges, W., 2008, *Model Theory*, Cambridge.
- Humphreys, P., 2004, *Extending Ourselves: Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*, New York.
- Jammer, M., 1965, *Die Entwicklung des Modellbegriffes in den physikalischen Wissenschaften*. In: *Studium Generale*, 18, Heft 3.
- Johnson-Laird, P., 1983, *Mental Models*, Cambridge.
- Laudan, L., 1981, *A Confutation of Convergent Realism*. In: *Philosophy of Science*, 48.
- Laymon, R. 1985, *Idealizations and the Testing of Theories by Experimentation*. In: P. Achinstein & O. Hannaway (Hg.), *Observation Experiment and Hypothesis in Modern Physical Science*. Cambridge, Mass.
- 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.
- Morgan, M. & M. Morrison (Hg.), 1999, *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science*, Cambridge.
- Morrison, M., 1998, Modelling Nature: Between Physics and the Physical World. In: Falkenburg & Muschik 1998.
- Morrison, M., 2007, Where Have All the Theories Gone? In: *Philosophy of Science*, 74.
- Moulines, C.U. (Hg.), 2002, Structuralism. In: *Synthese*, 130/1.
- Nagel, E., 1961, *The Structure of Science*, New York.
- Niiniluoto, I., 2000, *Critical Scientific Realism*, Oxford.
- Nowak, L. 1979. *The Structure of Idealization: Towards a Systematic Interpretation of the Marxian Idea of Science*, Dordrecht.
- Oppenheim, P. & H. Putnam, 1958, Unity of Science as a Working Hypothesis. In: H. Feigl, M. Scriven & G. Maxwell (Hg.), *Concepts, Theories, and the Mind-Body Problem*, *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, Volume 2.
- Psillos, S., 1995, The Cognitive Interplay Between Theories and Models. In: Herfel 1995.
- Psillos, S., 1999, *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*, London.
- Redhead, M., 1980, Models in Physics. In: *British Journal for the Philosophy of Science*, 45.
- Rueger, A., 2005, Perspectival Models and Theory Unification. In: *British Journal for the Philosophy of Science*, 56.
- Suárez, M., 2004, An Inferential Conception of Scientific Representation. In: *Philosophy of Science*, 71.
- Suárez, M. (Hg.), 2009, *Fictions in Science: Philosophical Essays on Modeling and Idealization*. London.
- Sugden, R., 2000. Credible Worlds: The Status of Theoretical Models in Economics. In: *Journal of Economic Methodology* 7.
- 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.

Teller, P., 2004, How We Dapple the World. In: Philosophy of Science, 71.

van Fraassen, B., 1980, The Scientific Image, Oxford.

van Fraassen, B., 2008, Scientific Representation: Paradoxes of Perspective, Oxford.

Weisberg, M., 2007, Who is a Modeler? In: British Journal for the Philosophy of Science, 58.

S. Hartmann<sup>64</sup>

#### Anmerkungen:

---

<sup>1</sup> Vgl. Jammer 1965.

<sup>2</sup> Vgl. Black 1962, S. 219 ff.

<sup>3</sup> Vgl. Hodges 2008.

<sup>4</sup> Vgl. van Fraassen 1980, S.44; Giere 1988, S. 79; Suppes 1961, S. 287.

<sup>5</sup> Vgl. Bunge 1973, S. 111; Harré 1970, S. 36; Hartmann 1996, S. 81; McMullin 1968, S. 387.

<sup>6</sup> Vgl. Black 1962, S. 219 ff.

<sup>7</sup> Vgl. Duhem 1978, Kap. 4.

<sup>8</sup> Vgl. Campbell 1957, Kap. 6.

<sup>9</sup> Vgl. van Fraassen 1980, S. 86; Cartwright 1983, Essay 5; Hesse 1966, Kap. 2.

<sup>10</sup> Vgl. Carnap 1939, S. 68.

<sup>11</sup> Vgl. Psillos 1995, S. 107 f.

<sup>12</sup> Vgl. Achinstein 1968; Apostel 1961; Black 1962; Bunge 1973; Harré 1970; Hesse 1966, McMullin 1968, Suppes 1961, 1962.

<sup>13</sup> Vgl. Apostel 1961; Braithwaite 1968; Bunge 1973.

<sup>14</sup> Vgl. Achinstein 1968; Hesse 1966; Harré 1970.

<sup>15</sup> Vgl. van Fraassen 1980; French & da Costa, 2003; Giere 1988, 1999; Moulines 2002.

<sup>16</sup> Vgl. McMullin 1968, S. 386.

<sup>17</sup> Vgl. Harré 1970.

<sup>18</sup> Vgl. Bunge 1973; Giere 1988.

<sup>19</sup> Vgl. Hartmann 1999; McMullin 1968; Weisberg 2007.

<sup>20</sup> Vgl. Hartmann 1995, S. 55 f.

<sup>21</sup> Vgl. Bailer-Jones 2008; Cartwright et al. 1995; Godfrey-Smith 2006; Morrison 2007; Sugden 2000.

<sup>22</sup> Vgl. Bunge 1973; Redhead 1980.

<sup>23</sup> Vgl. Hartmann 1995.

<sup>24</sup> Vgl. Duhem 1978.

<sup>25</sup> Vgl. das Einleitungskapitel von Morgan & Morrison 1999.

<sup>26</sup> Vgl. Hartmann 1995.

<sup>27</sup> Vgl. Suppes 1962.

<sup>28</sup> Vgl. Hartmann 1996; Humphreys 2004.

- 
- <sup>29</sup> Vgl. Cartwright 1983, 1989; McMullin 1984.
- <sup>30</sup> Vgl. Harré 1970; Hartmann 1999; s. auch das Lehrbuch Eck et al. 2008.
- <sup>31</sup> Vgl. Achinstein 1968; Cartwright 1983.
- <sup>32</sup> Vgl. Hartmann 1996.
- <sup>33</sup> Vgl. Hartmann 1999.
- <sup>34</sup> Vgl. Bailer-Jones 2009; McMullin 1976.
- <sup>35</sup> Vgl. Bailer-Jones 1997, 2009, Kap. 3 und 5.
- <sup>36</sup> Vgl. Hesse 1966, S. 8 f.
- <sup>37</sup> Vgl. Gentner & Markman 1997; Holyoak & Thagard 1997; s. auch Bailer-Jones 2009, Kap. 3.
- <sup>38</sup> Vgl. Black 1962; Harré 1970; Hesse 1966; McMullin 1976; s. auch Bailer-Jones 2009, Kap. 5.
- <sup>39</sup> Vgl. Gigerenzer & Todd 1996.
- <sup>40</sup> Vgl. Hesse 1983.
- <sup>41</sup> Vgl. Gentner & Stevens 1983, S. 1; s. auch Bailer-Jones 2009.
- <sup>42</sup> Vgl. Byrne 2005; Johnson-Laird 1983.
- <sup>43</sup> Vgl. Gentner & Stevens 1983.
- <sup>44</sup> Vgl. Giere 1988, S. 6.
- <sup>45</sup> Vgl. Bailer-Jones 1997, Kap. 4.
- <sup>46</sup> Vgl. Psillos 1999.
- <sup>47</sup> Vgl. Laymon 1985; McMullin 1985; Nowak 1979; Brzezinski & Nowak 1992.
- <sup>48</sup> Vgl. Laudan 1981; s. auch Niiniluoto 2000.
- <sup>49</sup> Vgl. Cartwright 1989.
- <sup>50</sup> Vgl. Hartmann 1999.
- <sup>51</sup> Vgl. Morrison 2000.
- <sup>52</sup> Vgl. Giere 2006; Rueger 2005.
- <sup>53</sup> Vgl. Teller 2004.
- <sup>54</sup> Vgl. Cartwright 1999; Hacking 1983.
- <sup>55</sup> Vgl. Falkenburg & Muschik 1998.
- <sup>56</sup> Vgl. Batterman 2002.
- <sup>57</sup> Vgl. Gähde 1997.
- <sup>58</sup> Vgl. Hartmann 1999; s. auch Bokulich 2003.
- <sup>59</sup> Vgl. Hartmann 2008.
- <sup>60</sup> Vgl. Herfel 1995; Hegselmann 1996; Conte 1997; Falkenburg & Hauser 1997; Falkenburg & Muschik 1998; Frigg, Hartmann & Imbert 2009; Morgan & Morrison 1999.
- <sup>61</sup> Vgl. Frigg & Hartmann 2006.
- <sup>62</sup> Vgl. van Fraassen 2008; French & da Costa 2003; Frigg 2006; Suárez 2004.
- <sup>63</sup> Vgl. Frigg, Hartmann & Imbert 2009.
- <sup>64</sup> Dieser Artikel basiert auf dem gemeinsam mit Frau PD Dr. Daniela Bailer-Jones verfassten Artikel für die erste Auflage dieser Enzyklopädie. Daniela Bailer-Jones starb im November 2006. Dieser Artikel ist ihrem Andenken gewidmet.