

# Modell versus Theorie.

## Eine systematische Rekonstruktion der Semantik von Modellen in den Naturwissenschaften

R. Hillerbrand, University of Oxford  
The Future of Humanity Institute, Faculty of Philosophy  
University of Oxford  
Suite 8, Littlegate House  
16/17 St Ebbe's Street  
Oxford, OX1 1PT

### 1 Einleitung

In der philosophischen Reflexion über wissenschaftliches Arbeiten und Begriffsbildung waren wissenschaftliche Modelle lange Zeit von kaum nennenswerter Bedeutung. Die semantische Interpretation von Theorien (Suppes) zeigt dies paradigmatisch — der Modellbildung wird lediglich eine untergeordnete Rolle in der Entwicklung einer Wissenschaft zugestanden und die epistemische Bedeutung von Modellen erschöpft sich in der von Theorien. Diesem Aufsatz liegt dabei ein weiter Modellbegriff zugrunde, der konkrete Modelle wie das Mausmodell in den Biowissenschaften ebenso erfasst wie die abstrakten Modelle, die in der semantischen Theorieninterpretation zum Tragen kommen; jedoch liegt der Schwerpunkt der gegenwärtigen Untersuchung auf abstrakten Modellen, insbesondere auf der Frage, wie sich Modelle von Theorien unterscheiden.

Die semantische Interpretation von Theorien wurde vielfach kritisiert, unter anderem aufgrund der Art und Weise wie wissenschaftliche Modelle die Wirklichkeit, sei es im Labor oder in der realen Lebenswelt, repräsentieren. Die semantische Interpretation von Theorien erkennt nur Homeomorphismen als Abbildungen, welche Phänomen und Modell verbindet, an. Indes scheint in den wenigsten Fällen — und seien es noch so abstrakte und vereinfachte Bedingungen im Laborexperimenten — eine Bijektion zwischen zu beschreibendem Phänomen und Repräsentation zu bestehen.

Der Fokus der Wissenschaftstheorie auf Theorien steht in klarem Gegensatz zu der Rolle, welche Modellen in der wissenschaftlichen Praxis zukommt. Hier sind Modelle nicht nur von zentraler epistemischer Bedeutung, sie sind auch weitgehend unabhängig von Theorien. Dies gilt sowohl für ihre Nutzung in der wissenschaftlichen Praxis, aber auch für ihre Entstehung: Modelle sind oftmals rein phänomenologischen Ursprungs, gerade in Bereichen in denen adäquate Theorien (noch) nicht existieren. Selbst in Fällen, in denen Modelle sich auf etablierte Theorien stützen, bedarf die Ableitung eines konkreten Modells Annahmen, die über die Theorie hinausgehen. Selbst in den einfachsten Anwendungsfällen der mathematischen Wissenschaften wie etwa der theoretischen Physik sind Modelle

immer mehr als konkrete Anwendungen einer Theorie (vgl. z.B. Cartwright 1999).

Dieser Aufsatz führt beide Stränge der Kritik an der semantischen Interpretation von Theorien zusammen, zum einen die Beobachtung, dass die Wissenschaften die Wirklichkeit nicht über Homeomorphismen abbilden, zum anderen die Feststellung dass Modelle von zentraler epistemischer Bedeutung in den Wissenschaften sind. Letzteres wurde in der jüngsten Debatte über Modellbildung in den Wissenschaften vermehrt hervorgehoben.<sup>1</sup> In den Auseinandersetzungen dieser Autoren mit Modellbildung stehen oftmals auch Wissenschaften wie Ökonomie oder Biologie im Vordergrund, welche in der Wissenschaftsphilosophie lange Zeit kaum Beachtung erhielten. Gemeinhin beschäftigte sich die Wissenschaftstheorie mit der Physik, als dasjenige Gebiet welches am stärksten formalisiert und mathematisiert ist, oder auf nur den Teilbereichen der Physik, die anwendungsfern sind — angewandte Bereiche der Physik wie Festkörperphysik, auf denen der weitaus größte Teil der Physiker arbeitet, gerieten ebenso wie die Ökonomie erst kürzlich in das Sichtfeld der Philosophen.

Der vorliegende Aufsatz versucht eine Rekonstruktion der Semantik von Modellen in der Physik, um so aufzuzeigen, wo und wie sich die klassische Wissenschaftsphilosophie auf idealtypische Ideen stützt, denen nicht einmal anwendungsferne Gebiete der Grundlagenphysik genügen vermögen. Dabei kann es nicht um eine vollständige Rekonstruktion des unsystematischen Gebrauchs der Begriffe Theorie und Modell in den Naturwissenschaften gehen. Vielmehr gilt es, durch den Sprachgebrauch gewisse Intuitionen der Wissenschaftler, hier der Physiker, zu erfassen, um so Einsichten in die Arbeit der Wissenschaften zu erlangen, die sich als *tacit knowledge* dem Nicht-Wissenschaftler sonst nur schwer erschließen. Die Philosophie wenn sie sich wie in diesem Aufsatz als Metawissenschaft begreift ist nicht einer getreuen Wiedergabe des Sprachgebrauches der Wissenschaften verpflichtet, vielmehr stehen systematische Aspekte im Vordergrund.

## 2 Modelle und Repräsentation

Der Begriff der ‚Repräsentation‘ wurde in der jüngsten Debatte über die Rolle von Modellen in den Wissenschaften eingeführt um den in sich widersprüchlich erscheinenden Charakter von Modellen zu erläutern: Modelle gehen über rein heuristische Hilfsmittel hinaus, obgleich sie mit zahlreichen epistemischen Defizite behaftet sind. So liefern Modelle oftmals unvollständige Beschreibungen eines Phänomens, ihre Annahmen stehen im Widerspruch zu allgemein akzeptierten Wissen, oder sind gar in sich inkonsistent.

‚Repräsentation‘ stellt dabei eine mindestens dreistellige Relation dar: Ein Modell  $M$  repräsentiert nicht einfach diejenigen Aspekte eines Zielsystems  $S$ , an

---

<sup>1</sup>Vergleiche z.B. Cartwright 1999, Frigg/Hartmann 2006, Giere 1999a, 1999b, Hughes 1997, Suárez 1999.

dem wir interessiert sind, wobei Zielsystem das Zielsystem ein empirisches Phänomen oder ein Datensatz sein kann. Repräsentiert wird vielmehr immer mit einer bestimmten Absicht — sei es, bestmögliche Übereinstimmung mit einer gegebenen Menge an Daten zu erzielen, oder die Übereinstimmung mit anderen kognitiven oder epistemischen Werten. Wenn es sich bei den Daten um empirische Daten handelt, wird ersteres Ziel oftmals auch als Kriterium empirischer Adäquatheit oder Wahrheitskriterium bezeichnet. Wie von R. Giere (1999b) hervorgehoben, richtet sich ein Modell auch immer an ein konkretes Publikum. Dieser Aspekt der Modellrepräsentation läßt sich jedoch der spezifischen Funktion der Darstellung unterordnen: Die Aufgabe eines Modells läßt sich nicht nur durch Angabe seiner epistemischen Funktion charakterisieren, sondern auch durch Angabe seiner Zielgruppe. Ist diese Studenten oder die breite Öffentlichkeit, so ist die Aufgabe des Modells weniger Wissensgewinn als pädagogischer Natur.

Auch wenn sich das spezifische Publikum eines Modells der Aufgabe unterordnen läßt, so sind Modelle dennoch durch eine vier-, anstelle einer dreistelligen Repräsentationsrelation charakterisiert. Bei dieser gilt es zusätzlich zum (1) Zielsystem, bzw. den relevanten Aspekten desselben, und zu der (2) spezifischen Funktion oder Aufgabe der Repräsentation durch das Modell zusätzliche eine Art Korrespondenz- oder ‚Angemessenheitskriterium‘ angegeben werden muss. Letzere expliziert die Bedingungen an, welche erfüllt sein müssen, damit das Modell  $M$  eine nach den in  $A$  spezifizierten Kriterien eine gute Repräsentation des betrachteten Targetsystems  $S$  ist. Damit vermittelt das Angemessenheits- oder Korrespondenzkriterium zwischen dem Modell und dem Targetsystem.

Die Angabe eines Angemessenheitskriterium erfasst einen essentiellen Aspekt des nicht-systematischen Gebrauchs der Begriffe ‚Modell‘ und ‚Theorie‘ in den Naturwissenschaften, allen voran in der Physik, erfaßt: Während Modelle mit größerer Vorhersagekraft bezüglich eines konkreten, singulären Phänomens assoziiert werden, ist das Vertrauen in die Korrektheit und Vollständigkeit der Beschreibung höher bei Theorien. Modelle unterscheiden sich von Theorien durch ihre Nähe zum zu beschreibenden Targetsystem, das u.a. ein empirisches Phänomen sein kann. In der hier vorgeschlagenen Definition von Modellen wird diese Nähe zu  $S$  durch das Angemessenheitskriterium erfasst. In der semantischen Theorieinterpretation ebenso wie in vielen neueren Ansätzen der Wissenschaftstheorie (vgl. z.B. Bailer-Jones 2003, Cartwright 1999) wird diese Nähe durch die Existenz weniger freier Parameter in Modellen im Gegensatz zu Theorien erfaßt. Jedoch steht eine derartige Verwendung des Begriffspaares Modell–Theorie in deutlichen Widerspruch zu dessen Gebrauch in den Wissenschaften. So sind etwa die sog. Intermittenzmodelle in der Nichtgleichgewichts Statistischen Physik durch sehr viele freie Parameter gekennzeichnet. Intermittenzmodelle wie etwa das sog. Multifraktale Modell finden im Übrigen auch in der Ökonomie zahlreiche Verwendung.

Abschließend seien zwei Anmerkungen zu der hier vorgeschlagene Charakterisierung der Art und Weise wie Modelle ein Targetsystem, bestehend aus Daten, einem spezifischen Phänomen o.ä., repräsentiert, gemacht. Zum einen ist hier

gegebene Definition in Übereinstimmung mit der Vermittlerrolle zwischen Phänomen und Theorie, welche Modellen von einigen Autoren wie etwa M. Suárez (1999) zugestanden wird. Zum anderen ist das vorgeschlagene Angemessenheitskriterium nicht mit H. Reichenbachs Zuordnungsdefinition von zu verwechseln (Reichenbach 1938). Die Zuordnungsdefinition gibt an, wie sich ein uninterpretiertes axiomatisches System auf ein physikalisches Objekt abbilden läßt, und erlangte insbesondere unter Logischen Empiristen große Popularität. Auch wenn auf den ersten Blick beide Konzepte ähnlich erscheinen mögen, so geht der Inhalt von Modellen sowohl deutlich über rein propositionalen Charakter, als auch deutlich über einen reinen mathematischen Formalismus hinaus.

### 3 Implikationen der vierstelligen Repräsentationsrelation

1. In dem Fall in dem es sich bei dem Zielsystem um eine Menge empirischer Daten handelt, enthält das Angemessenheitskriterium u.a. Informationen darüber, welche Datenpunkte als statistische Ausreißer gelten. Diese Punkte dürfen daher aus guten Gründen von der theoretischen Kurve wie sie von dem Modell vorhergesagt wird abweichen. Es gilt zu beachten, dass es einiger Hintergrundinformation bedarf, um zu entscheiden, welche Datenpunkte als statistische Ausreißer gelten. Auch fließen hier epistemische und kognitive Werte ein, die über bloße empirische Adäquatheit hinausgehen. Aber erst wenn diese Frage geklärt ist, können Theoreme wie das von Akaike oder von Bayes, die helfen können, zwischen verschiedenen Modellen zu wählen, Anwendung finden.

2. Das Angemessenheitskriterium muss nicht, obgleich es konstitutiv für die Modellrepräsentation ist, explizierbar sein. Ein Beispiel liefert das sog. Mausmodell in den Biowissenschaften — ein, im Gegensatz zu den bislang diskutierten Modellen, konkretes Modell. Wissenschaftler beziehen sich auf das Mausmodell anstelle der konkreten zwanzig, fünfzig oder hundert Mäuse, welche im Laborexperimente untersucht wurden, um zu betonen, dass Modell (in diesem Fall: die Mäuse) und Targetsystem (hier: der Mensch) bezüglich der betrachteten Aspekte hinreichend ähnlich sind, so dass die erhaltene Information über eine gewissen Krankheit in Mäusen Rückschlüsse auf die Krankheit im Menschen erlaubt.

3. Das Angemessenheitskriterium ist verknüpft sowohl mit der Funktion oder der spezifischen Absicht des Modells, als auch mit den relevanten Aspekten des Zielsystems. An Hand von Skalenmodellen von Autos im Windtunnel, einer zweiten Art konkreter Modelle, läßt sich dies deutlich veranschaulichen: Das Skalenmodell repräsentiert die Strömung um das Auto, ist gleichzeitig aber nicht in der Lage andere Eigenschaften des Autos, wie dessen Fahrcharakteristiken, korrekt oder auch nur adäquat darzustellen. Die Strömungseigenschaften des Autos werden durch das reskalierte Modell erfaßt, das mit dem ursprünglichen Auto nur

die geometrische Form gemeinsam hat, weil die Strömungseigenschaften invariant sind unter gleichzeitiger Reskalierung der (i) Geschwindigkeit des Fluids (Luft), welches das Auto umgibt, der (ii) räumlichen Abmessungen des Autos und (iii) der Viskosität des Fluids.

4. Das Skalenmodell zeigt weiterhin deutlich wie das Angemessenheitskriterium ein spezifisches Modelle oftmals in einen weiteren theoretischen Kontext einbettet. Das Skalenmodell im Windtunnel repräsentiert das Targetsystem ‚Aerodynamische Eigenschaften eines realen Autos‘ weil die Strömung um das Auto den sog. Navier-Stokes-Gleichungen genügt. Diese Gleichungen weisen gerade die oben beschriebene Invarianz unter Reskalierung auf.

5. Oftmals enthält das Angemessenheitskriterium Informationen über alternative Beschreibungen eines Phänomens. In obigem Beispiel nimmt man, meist implizit, an dass die makroskopischen Abmessungen des Objektes, d.h. in unserem Fall des Autos, viel größer sind als die mittlere Reichweite der molekularen Kräfte. Spielten molekulare Kräfte eine nicht vernachlässigbare Rolle, so stellten die Navier-Stokes-Gleichungen keine geeignete Beschreibung des Phänomens dar. Das Modell wäre damit nicht mehr invariant unter Reskalierung — man denke nur an die Strömung durch ein Rohr, welches derart eng ist, dass molekulare Kräfte, auch Kapillarkräfte genannt, die Anwendung von Skalenmodellen unmöglich machen. Ein weiteres Beispiel bietet die Strahlenoptik. Diese Beschreibung funktioniert genau dann, wenn die Wellenlänge des Lichtes viel kleiner ist als die Strukturen des Mediums. Das Angemessenheitskriterium enthält damit den Begriff der Wellenlänge, und damit einen Begriff, der dem Modell selber fremd ist, entliehen aus der alternativen Beschreibung des betrachteten Targetsystems, nämlich der Wellenoptik.

6. Im Rahmen der vorgeschlagenen Charakterisierung von Modellen ist es oftmals nicht die Beschreibung eines Phänomens, welches nach der Entdeckung neuer Daten oder neuer theoretischer Beschreibungen geändert wird; vielmehr ist es das Angemessenheitskriterium welche sich ändern muss. In der Wissenschaftsgeschichte zeigten neue experimentelle Einsichten oftmals, dass ein Modell in einem bestimmten Parameterbereich ungültig ist — ein Parameterbereich, der erst durch die neuen Experimente zugänglich wurde. Das Angemessenheitskriterium wird dahingehend modifiziert, dass es den Anwendungsbereich des Modells deart eingrenzt, dass der neu erschlossene Parameterbereich ausgeschlossen wird. Das Modell selber bleibt unberührt von den neuen Einsichten. Beispielsweise wurde die Wellenbeschreibung des Lichtes weder obsolet noch als solche modifiziert nachdem quantenmechanische Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie, wie der Photoelektrischen Effekt, entdeckt wurden. Es ist damit das Angemessenheitskriterium welches mit der Zeitabhängigkeit der Wahrheitswerte, wie sie etwa in Bailer-Jones (2003) diskutiert werden, in Verbindung zu bringen ist.

7. Abschließend sei angemerkt, dass die Unterscheidung zwischen Angemessenheitskriterium und eigentlichem Modell auch in Fällen, in denen sich das Angemessenheitskriterium nicht explizit angeben lässt, keine reine philosophische

Spielerei ist. Vielmehr ist diese Unterscheidung unerlässlich für das korrekte Verständnis und den adäquaten Gebrauch des Modells. Als Beispiel dient wiederum die geometrische Optik zur Beschreibung eines konkreten Phänomens von Brechung oder Beugung. Obgleich die Bedingungen der Adäquatheit dieser Beschreibung heutzutage meist mit Hilfe der Wellenlänge formuliert werden, kennt und gebraucht die geometrische Optik den Begriff der Wellenlänge nicht. Dies mag klar sein in diesem Beispiel, doch oftmals sind die Dinge nicht derartig offensichtlich. Etwa im Fall molekularer Diffusion wird oftmals betont, dass bei der Strömung von Wasser durch ein Rohr Wasser als Kontinuum behandelt werden kann. Bei der molekularen Diffusion, die etwa dafür verantwortlich ist, dass sich Tinte im Wasser verteilt (dass sie *diffundiert*), müsse man, so die Behauptung, auf eine diskrete Beschreibung von Wasser zurückkommen. Indes wird Wasser in den theoretischen Beschreibungen von Diffusion als Kontinuum behandelt — dies gilt sowohl für die gegenwärtige Beschreibung mit Hilfe einer Langevin-Gleichung als auch für die erste mathematische Beschreibung mit Hilfe des Fick’schen Gesetzes. Beides sind genuin kontinuum-mechanische Beschreibungen welche die Trägerflüssigkeit als kontinuierliche Substanz beschreiben. Es ist eine gänzlich andere Frage, ob sich die etwa die Diffusionskonstante aus mikroskopischen Eigenschaften der Wassermoleküle herleiten läßt. Und es ist wieder eine andere Sache, dass die Beschreibung mit Hilfe eine Langevin-Gleichung nur solange möglich ist wie die Zeitskalen der Kollisionen der Fluidteilchen untereinander viel kleiner sind als die Zeitskalen auf denen die Wasserteilchen mit den dispersierten Tinteteilchen kollidieren. Letzteres ist Teil des Angemessenheitskriterium : Ebenso wie die geometrische Optik keine Wellenbeschreibung des Lichts voraussetzt nur weil ihr Anwendungsbereich mit Hilfe des Begriffes der Wellenlänge charakterisiert wird, so setzt das Modell der molekularen Diffusion keine Teilchenbeschreibung des Wassers voraus.

Zusammenfassend versuchte dieser Aufsatz eine Rekonstruktion der Modellsemantik in den Naturwissenschaften, allen voran in der Physik. Es zeigte sich dabei, dass die neuere Literatur zu Modellen innerhalb der Wissenschaftstheorie zwar zurecht von der semantischen Interpretation Abstand nimmt, da diese eine zu stark idealisierte Auffassung der Arbeitsweise der Wissenschaften vertritt. Indes scheint der Modellbegriff, der vielen Autoren in diese neueren Debatte zugrunde liegt, zu sehr verhaftet in der traditionellen Definition von Modellen. Durch Angabe eines Angemessenheitskriterium wurde hier versucht die Nähe von Modellen zum Zielsystem zu erfassen, ohne dass notwendigerweise ein Modell weniger freie Parameter als eine Theorie enthält.

## 4 Bibliographie

BAILER-JONES, D. 2003, “When scientific models represent,” in: *International Studies in the Philosophy of Science*, **17** (1), 59–74.

- CARTWRIGHT, N. 1999, *The Dappled World*, Cambridge University Press: Cambridge.
- FRIGG, R./HARTMANN, S. 2006, “Scientific Models”, in: S. Sarkar and J. Pfeifer (eds.): *The Philosophy of Science: An Encyclopedia*, Routledge: New York, 740–749.
- GIERE 1999A, “Using models to represent reality,” in: L. Magnani, N. Nersessian and P. Thagard (eds.): *Model-based reasoning in scientific discovery*, Kluwer Academic/Plenum Publisher: New York, 41–57.
- 1999B, *Science without Laws*, University of Chicago Press: Chicago.
- HUGHES, R. I. G. 1997, “Models and representing,” in: L. Darden (ed.), *PSA 1996*, Philosophy of Science association: East Lansing, S325–336.
- REICHENBACH, H. 1938, *Experience and Prediction*, The University of Chicago Press: Chicago, 1957.
- SUÁREZ, M. 1999, “Theories, models, and representation,” in: L. Magnani, N. Nersessian and P. Thagard (eds.): *Model-based reasoning in scientific discovery*, Kluwer Academic/Plenum Publisher: New York, 75–83.