

# Wissenschaft Bildung Politik

Herausgegeben von der  
Österreichischen Forschungsgemeinschaft

**Band 24**

**Modellbildung & Simulation  
in den Wissenschaften**

Wolfgang Kautek, Heinrich Schmidinger, Friederike Wall (Hg.):  
Modellbildung & Simulation in den Wissenschaften



Wissenschaft  
Bildung  
Politik

Herausgegeben von der

Österreichischen Forschungsgemeinschaft

Band 24

Wolfgang Kautek, Heinrich Schmidinger, Friederike Wall (Hg.):  
Modellbildung & Simulation in den Wissenschaften

# Modellbildung & Simulation in den Wissenschaften

Herausgegeben von

Wolfgang Kautek  
Heinrich Schmidinger  
Friederike Wall

BÖHLAU VERLAG WIEN KÖLN

Gedruckt mit Unterstützung durch:

 **Bundesministerium**  
Bildung, Wissenschaft  
und Forschung

**ÖFG** // ÖSTERREICHISCHE  
FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten  
sind im Internet über <https://dnb.de> abrufbar.

© 2022 by Böhlau Verlag Gesellschaft m.b.H. & Co. KG, Zeltgasse 1/Top 6a, A-1080 Wien  
(Koninklijke Brill NV, Leiden, Niederlande; Brill USA Inc., Boston MA, USA;  
Brill Asia Pte Ltd, Singapore; Brill Deutschland GmbH, Paderborn, Deutschland;  
Brill Österreich GmbH, Wien, Österreich)

Koninklijke Brill NV umfasst die Imprints Brill, Brill Nijhoff, Brill Hotei,  
Brill Schöningh, Brill Fink, Brill mentis, Vandenhoeck & Ruprecht,  
Böhlau, Verlag Antike und V&R unipress.

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich  
geschützt. Jede Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen  
bedarf der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlages.

Redaktion: Katharina Koch-Trappel, Wien

Satz und Layout: büro mn, Bielefeld

Druck und Bindung: Hubert & Co BuchPartner, Göttingen

**Vandenhoeck & Ruprecht Verlage** | [www.vandenhoeck-ruprecht-verlage.com](http://www.vandenhoeck-ruprecht-verlage.com)

ISBN 978-3-205-21579-0

## Inhalt

Vorwort .....	7
Ursprung und Funktionen wissenschaftlicher Modellbildung	
<i>Axel Gelfert</i> .....	11
Komplexitätsforschung: Theorie und Big Data	
<i>Stefan Thurner</i> .....	35
Simulation in Chemistry	
<i>Leticia González</i> .....	55
„Körper“ als Modell in Tanz und Performing Arts	
<i>Gabriele Brandstetter</i> .....	75
Künstliche Intelligenz und Deep Learning	
<i>Bernhard Nessler</i> .....	91
Simulation in den Sozialwissenschaften	
<i>Klaus G. Troitzsch</i> .....	97
Modellbildung und Simulation in der Archäologie	
<i>Elisabeth Trinkl</i> .....	121
Klimamodelle und Klimawandel	
<i>Jochem Marotzke</i> .....	149
Autor:innenverzeichnis .....	169

Wolfgang Kautek, Heinrich Schmidinger, Friederike Wall (Hg.):  
Modellbildung & Simulation in den Wissenschaften

## Vorwort

Aus dem heutigen Wissenschaftsgeschehen sind Modellbildungen und Simulationen nicht mehr wegzudenken. Dies gilt für Grundlagenforschung und angewandte Forschung gleichermaßen – und dies in so gut wie allen wissenschaftlichen Disziplinen. Dass es überhaupt so weit gekommen ist, dass sowohl Modellbildung als auch Simulation zum mehr oder weniger zentralen Instrument wissenschaftlicher Methodik in den meisten Fachgebieten geworden ist, verdankt sich zweifellos den atemberaubenden Rechenleistungen der allgegenwärtigen Computertechnik, die nicht nur die komplexesten thematischen Zusammenhänge immer rascher bewältigt, sondern in etlichen Bereichen Experimente ersetzt, die sich aus welchen Gründen auch immer nicht durchführen ließen, ja diese überhaupt erst ermöglicht – man denke beispielsweise an die Erkenntnisse im mikro- oder makrophysikalischen Bereich. Die Auswirkungen dieser Entwicklung sprengen bekanntlich den binnenwissenschaftlichen Rahmen der Theoriebildung. In der öffentlichen Wahrnehmung scheint sich die Relevanz der wissenschaftlichen Beiträge zur Lösung vieler anstehender Probleme daran zu bemessen, wie erfolgreich sie sind, mittels Modellierung und Simulierung besagte Probleme in den Griff zu bekommen. Die Erwartungen seitens der Gesellschaft, die sich gegenwärtig, in Zeiten der Corona-Pandemie, an die Wissenschaften richten, illustrieren, was gemeint ist. Analoges gilt im Zusammenhang mit Herausforderungen in den Bereichen Klima, Ökologie, Weltbevölkerung, Sozialwesen, Wirtschaft, Gesundheit und anderem mehr. Jedenfalls verweist das Thema „Modellbildung und Simulation in den Wissenschaften“ nicht etwa auf etwas Peripheres, dessen sich die diversen Disziplinen unter anderem bzw. dann und wann bedienen, im Gegenteil: Das Thema berührt vielmehr ein heute zentrales Element sowohl des Selbstverständnisses von Wissenschaft überhaupt als auch deren Wertschätzung seitens der gegenwärtigen Öffentlichkeit. Zu betonen ist freilich „heute“ und „gegenwärtig“, denn obwohl wenigstens „Modelle“ seit Beginn der europäischen Wissenschaftsgeschichte eine wichtige Rolle beim Gewinnen von Erkenntnissen spielen, setzt sich die Überzeugung, dass das Betreiben von Wissenschaft wesentlich anhand von Modellierungen und Simulationen erfolgt, erst im 19. und 20. Jahrhundert durch.

Voraussetzung dafür wiederum war, dass sich die Prioritäten in den Zielsetzungen von „Wissenschaft“ verschoben. Galt traditionell als deren unbestritten oberstes und emphatisch angestrebtes Ziel die argumentativ gesicherte Erkenntnis von Wahrheit, so trat im Zuge der zunehmenden Einsicht in die prinzipielle Schwierigkeit solchen Unterfangens immer mehr eine bescheidenere Zielformulierung in den Vordergrund – jene nämlich, dass es die primäre und allgemeine Aufgabe von Wissenschaft sei, schlicht Probleme zu lösen. Damit wurde das Streben nach wahrer Erkenntnis nicht aufgegeben, keineswegs, es empfahl sich jedoch, diesem Streben in kleineren, dafür aber erfolversprechenderen Schritten nachzukommen. In gewisser Weise geschah dies bereits bei Kopernikus und seinem Vorschlag, die astronomische Geozentrik durch eine Heliozentrik zu ersetzen. Die Motivation zu diesem Paradigmenwechsel entsprang wesentlich der Einsicht, dass sich unter der Annahme des neuen heliozentrischen Modells schlagartig zahlreiche Probleme beheben ließen, die mit dem traditionellen geozentrischen Modell zunehmend unlösbar erschienen.

Dass es Anfang des 16. Jahrhunderts nicht gleich zu einem gewandelten Verständnis von Wissenschaft kam, welches sich über „Modellbildung“ definiert, resultiert wohl daraus, dass die damaligen Wissenschaften außer im ethisch-pädagogischen, juristischen und politischen Bereich noch kaum anwendungsorientiert waren, so dass die reine „Schau“ (*theoria*) der Wahrheit weiterhin den Ton angab. Abgesehen davon bedeutete „Modell“ damals noch etwas anderes. Man verstand darunter zumeist ein normatives Ur- oder Vorbild, nach dem die gesamte Wirklichkeit gestaltet ist. Im Hinblick auf solche Ur- bzw. Vorbilder (die Ideen) formt der platonische Demiurg die Welt, ebenso ruft im Hinblick darauf der christliche Gott des Augustinus seine Schöpfung ins Leben. Derartige Modelle lassen sich menschlicherseits nicht entwerfen oder bilden, sie kommen ihm zuvor, können seinerseits daher nur aufgedeckt und erschaut werden. Daran änderte zunächst nicht einmal die nominalistische Erkenntnis-kritik, die seit dem 13. Jahrhundert stark um sich griff, etwas. Obwohl diese bekanntlich davon ausging, dass die menschliche Erkenntnisleistung viel höher einzuschätzen sei als bis dahin angenommen, sofern alles, was mit Allgemeinheit, Synthese, Ordnung, Norm oder Gesetz zu tun habe, aus dem menschlichen Verstand stamme, demnach der Natur nicht entnommen, sondern an sie herangetragen, ihr quasi übergestülpt werde. In diesem Zusammenhang fiel erstmals das Wort „Fiktion (*fictio*)“, und der Mensch erschien im Hinblick auf seine kreative Erkenntnisfähigkeit als „zweiter Gott (*secundus deus*)“. Trotzdem erhielt sich der Glaube, dass selbst diese Fiktionen letztlich einen aufdeckenden Charakter besaßen. Sie verhalfen am Ende dazu, den immer schon

„vor-geschriebenen“ Text des „Buches der Natur“ besser lesen zu können. Sie entschlüsselten darin einen Sinn, den Gott am Beginn seiner Schöpfung in dieses bereits hineingelegt hatte. Entsprechend verstanden selbst Naturphilosophen wie Kopernikus, Galilei, Kepler, Newton ihre Welterklärungsmodelle nicht als pragmatische Lösungsansätze, sondern als Enthüllungen des von Gott in die Natur eingestifteten Sinns.

Die Überzeugung, dass die Wissenschaft weniger zu enthüllen und zu erschauen, als schlicht Probleme zu lösen habe, und dies mit Hilfe von Modellen, die ausschließlich Ideen der Forschenden und nichts darüber hinaus darstellten, begann sich erst ab dem 19. Jahrhundert nach und nach zu verbreiten. Auslöser dürften wohl folgende Faktoren gewesen sein: Zunächst die Einsicht, dass sich der göttliche Sinn in der Natur, das normative göttliche Urmodell, durch die menschliche Erkenntnis prinzipiell nicht eruieren lasse, dass sogar gefragt werden müsse, ob es dergleichen überhaupt gibt. Außer dem Menschen – dem Wissenschaftler, der Wissenschaftlerin – modelliert niemand. Die metaphysische Dimension dieses Modellierungsaktes kommt abhanden, die Wissenschaften verzichten auf Metaphysik. Stattdessen gewinnt das wissenschaftliche Modellieren einen experimentellen, ja spielerisch-innovativen Charakter. Dementsprechend pragmatisch – von Fall zu Fall, bei auftretenden Problemständen – wird es eingesetzt. Sodann verstärkt sich mit zunehmender Neuzeit die Anwendungsorientierung der Wissenschaften. Das geschieht am Anfang und über längere Zeit nur in Disziplinen, deren Erkenntnisse sich in Technologien umsetzen lassen, in Physik und Chemie, aber auch Medizin. „Geisteswissenschaften“ wie beispielsweise Psychologie, Soziologie oder Pädagogik gliedern sich in diesen Trend ein, je mehr sie ihre Methoden empirisch ausrichten und eigene Formen von Prognostik entwickeln, die individuell und gesellschaftlich nutzbar gemacht werden können. Spätestens die Ökonomisierung des gesamten Hochschulwesens Ende des 20. Jahrhunderts treibt die allermeisten Disziplinen auf diese Bahn. Nichts kommt diesem Trend so entgegen, wie der pragmatische Einsatz von Modellierungen und Simulationen. Schließlich und nicht zuletzt ist es die ungeahnte Entwicklung der Mathematik, die es gestattet, immer mehr Bereiche der Wirklichkeit nicht bloß darzustellen, sondern „regelrecht“ zu berechnen. Wo selbst diese Entwicklung in Technologie mündet, was bekanntlich über die Informatik im breitesten Maße geschieht, wo in anderen Worten die Computertechnik zum zentralen Instrument fast jeglichen Erkenntnisgewinns und so gut wie jeder Wissensverarbeitung wird, kommt faktisch keine Wissenschaft in ihrer Wissensgenerierung ohne Modellbildung und Simulation mehr aus.

Die in diesem Band gesammelten Beiträge – sie gehen allesamt auf Vorträge zurück, die anlässlich des Wissenschaftstages der Österreichischen Forschungsgemeinschaft am 21. und 22. Oktober 2021 auf Schloss Weikersdorf in Baden bei Wien zum Thema „Modellbildung und Simulation in den Wissenschaften“ gehalten und diskutiert wurden – werfen einen Blick auf den gegenwärtigen Stand der geschilderten Entwicklung in einzelnen Wissenschaftsbereichen. Der Grundintention der Österreichischen Forschungsgemeinschaft gemäß tun sie dies aus interdisziplinärer Perspektive. Dabei informieren sie nicht nur über die aktuelle Relevanz, die dem Thema „Modellbildung und Simulation“ in der jeweiligen Disziplin zukommt. Sie geben ebenso Einblick in die damit verbundenen fachspezifischen Problemstellungen. Darüber hinaus berühren sie gemeinsam fundamentale Fragen wie – unter anderen – jene, ob sich durch Modelle und Simulationen tatsächlich vereinfachte Abbilder realer Zusammenhänge und Entwicklungen erkenntnisleitend gewinnen lassen, oder jene, wie die durch Modelle und Simulationen einhergehenden Vereinfachungen mit immer komplexer werdenden wissenschaftlichen Diskursen in Einklang gebracht werden können. Daran schließen sich Fragen wie diese an: Welche Probleme entstehen bei Simulationen von Prozessen der unbelebten und belebten Natur? Können formale Modelle auch in den Geistes- und Kulturwissenschaften neue Einsichten vermitteln? Welche Einsichten liefern Simulationen sozialer Prozesse in wirtschaftliche und soziale Zusammenhänge? Welche Grenzen und Gefahren der Verwendung von Modellen und Simulationen für individuelle und politische Entscheidungen gibt es?

Wie stets war der Wissenschaftstag 2021 das Ergebnis gemeinsamer Vorbereitungsarbeit im Wissenschaftlichen Beirat der Österreichischen Forschungsgemeinschaft, die angesichts des interdisziplinären Charakters des gewählten Themas eine besonders breite Beteiligung der Beiratsmitglieder erforderlich machte. Den Kolleginnen und Kollegen des Beirats gebührt dafür der Dank der Herausgeberin und der Herausgeber dieses Buches. Gleiches gilt für die Referentinnen und Referenten für ihre Zusammenarbeit sowie Frau Katharina Koch-Trappel, MSc, für die engagierte Betreuung des Projekts einschließlich der Bemühungen um die Drucklegung der hier gesammelten Beiträge.

Wien, im April 2022

Heinrich Schmidinger  
Wolfgang Kautek  
Friederike Wall

# Ursprung und Funktionen wissenschaftlicher Modellbildung

## Perspektiven der Wissenschaftstheorie

*Axel Gelfert*

Ob Klimawandel oder Pandemieentwicklung, Modellrechnungen zum Steuer-  
aufkommen oder städtebauliche 3D-Modelle: Modelle sind als Gegenstand  
und Grundlage gesellschaftlicher Diskussionen allgegenwärtig. In Verbindung  
mit Computersimulationen und darauf basierenden Visualisierungen machen  
Modelle zunehmend eine wichtige Schnittstelle zwischen Wissenschaft und  
Öffentlichkeit aus. Wissenschaftsintern kommt der Modellierung eine Schlüssel-  
funktion zu, auch und gerade dort, wo die „klassischen“ Erkenntnisformen der  
Beobachtung und der Theorie an ihre Grenzen stoßen. Trotz dieser zentralen  
Rolle werden wissenschaftliche Modelle noch immer oft als bloß behelfsmäßige  
Notlösungen behandelt, auf die wir zwar für praktische Zwecke angewiesen  
sind, am liebsten jedoch verzichten würden. Im Folgenden soll der Versuch  
unternommen werden, Modelle als eigenständige Erkenntnisinstrumente zu  
rehabilitieren, deren Wert sich nicht allein danach bemisst, inwieweit sie auf  
zu Grunde liegende fundamentale Theorien zurückgeführt werden können.  
Wissenschaftliche Modelle dienen einer Reihe unterschiedlicher Funktionen,  
die nicht immer spannungsfrei miteinander koexistieren; diese Pluralität anzu-  
erkennen, ohne dabei die verbindenden Charakteristika von Modellierung als  
eigenständiger wissenschaftlicher Methodik aus den Augen zu verlieren, ist die  
Grundmotivation für die folgenden Überlegungen. Nach einer Diskussion zu  
den Ursprüngen des Modellbegriffs und der Methodik des wissenschaftlichen  
Modellierens werden die verschiedenen Funktionen und Verwendungen wissen-  
schaftlicher Modelle zunächst in eine (vorläufige) Taxonomie gebracht, ehe die  
Frage untersucht wird, ob – und wie – wir wissenschaftlichen Modellen Ver-  
trauen schenken können.

## 1. Was sind Modelle? Was ist Modellierung?

Jeder Versuch, den wissenschaftlichen Modellbegriff allein durch Rückgriff auf den Sprachgebrauch zu klären, stößt schnell und zwangsläufig an seine Grenzen. Sprachgeschichtlich wird der Ausdruck „Modell“ oft über mehrere Zwischenschritte auf das von Vitruv in seinen *Decem Libri de Architectura* mehrfach verwendete Wort *modulus* zurückgeführt, das ein (jeweils zu bestimmendes) Grundmaß für die Anfertigung architektonischer Entwürfe bezeichnete. Die Bestimmung eines solchen Grundmaßes sollte einerseits alle Bestandteile und Größen eines Bauwerks kommensurabel machen, andererseits die Harmonie zwischen Teil und Ganzem sicherstellen und damit die ästhetische Qualität des Gesamtkonstrukts gewährleisten.<sup>1</sup> In dieser Grundvorstellung angelegt sind zwar bereits wesentliche Bestandteile späterer Ausformungen des Modellbegriffs – das Element der Repräsentation (hier prospektiv in der Form eines Entwurfs von erst noch zu Erschaffendem), die Idee der Komplexitätsreduktion (durch Reduktion der Gesamtzahl der in Erwägung zu ziehenden Möglichkeiten) – doch war es ein weiter Weg von diesem spezifischen Anwendungskontext über Wortformen wie *modul*, *model* oder *modello* (wie in der bildenden Kunst der Renaissance vorbereitende, meist kleinformatige, jedoch schon detailreiche Vorstudien künstlerischer Werke genannt wurden) zu einem verallgemeinerten, oft abstrakten Modellbegriff, der der heutigen Wissenschaft angemessen ist.

Die Polysemie des Worts „Modell“ setzt sich bis heute fort und bleibt selbst nach Absonderung alltagssprachlicher Bedeutungen bestehen. Weiter verkompliziert wird die Lage durch die oft unberücksichtigt bleibende Unterscheidung zwischen dem *Begriff* des wissenschaftlichen Modells einerseits und der *Methodik* des wissenschaftlichen Modellierens. Nicht jeder Gebrauch von etwas, das aus heutiger Sicht als wissenschaftliches Modell bezeichnet werden könnte, stellt deswegen bereits einen Fall wissenschaftlicher Modellierung dar. Dies betrifft nicht nur sachfremde Verwendungen – z. B. die eines Astrolabiums als Briefbeschwerer – sondern durchaus auch wissenschaftliche, auf Erkenntnis zielende Kontexte. Wie die Wissenschaftshistoriker Giora Hon und Bernard Goldstein es treffend ausdrücken: „*That a model (a concept) is invoked in some scientific discussion does not mean that the methodology applied is modeling.*“<sup>2</sup> Ein

---

1 Vgl. hierzu Bernd Mahr, Cargo: *Zum Verhältnis von Bild und Modell*. In: Ingeborg Reichle, Steffen Siegel, Achim Spelten (Hg.), *Visuelle Modelle*, München 2008, 17–40.

2 Giora Hon, Bernard R. Goldstein, *Maxwell's Role in Turning the Concept of Model into the Methodology of Modeling*. In: *Studies in History and Philosophy of Science* 88 (2021), 332.

wie auch immer geartetes Repräsentationsmittel – sei es ein Gleichungssystem, eine physisch realisierte Replika oder eine mentale Repräsentation – wird erst in einem geeigneten Kontext der Erkenntnisgewinnung zu einem Beispiel wissenschaftlicher Modellierung; dass wir auch außerhalb eines solchen Kontextes die entsprechenden Repräsentationsmittel oft „Modelle“ nennen, zumal wenn wir uns ihrer möglichen Verwendung in Modellierungszusammenhängen bewusst sind, ist einerseits verständlich, trägt andererseits jedoch zur allgemeinen, aus unserem Sprachgebrauch resultierenden begrifflichen Unschärfe bei.

Ludwig Boltzmann (1844–1906) definiert den Begriff „*model*“ in seinem 1902 in der *Encyclopaedia Britannica* erschienenen Lexikoneintrag folgendermaßen:

Model: a tangible representation, whether the size be equal, or greater, or smaller, of an object which is either in actual existence, or has to be constructed in fact or in thought. More generally it denotes a thing, whether actually existing or only mentally conceived of, whose properties are to be copied.<sup>3</sup>

Zwei Aspekte von Boltzmanns Definition sind hervorzuheben. Zum einen ist in ihr eine Gleichbehandlung konkreter (materieller) Modelle („tangible representations“) und abstrakter (mentaler) Modelle („mentally conceived of“) angelegt; zum anderen betont er das konstruktive Element der Modellbildung („constructed in fact or in thought“). So verstanden sind Modelle nicht in erster Linie bloß vereinfachte Nachbildungen der zur repräsentierenden Zielsysteme. Vielmehr zeichnen sie sich dadurch aus, dass ihnen durch den Konstruktionsprozess Eigenschaften eingeschrieben sind, die ihrerseits gewissermaßen auf die Welt projiziert werden können („a thing . . . whose properties are to be copied“). Das Modell ist nicht mehr bloß die Kopie eines Ausschnitts der Realität, sondern dient als ein Mittel, dem repräsentierten Gegenstand entsprechende Eigenschaften zuzuschreiben. So bringt Boltzmann das Verhältnis von Modell und Wirklichkeit folgendermaßen auf den Punkt: „*On this view our thoughts stand to things in the same relation as models to the objects they represent.*“ Insofern unser gesamtes Wissen von der Welt gedanklich vermittelt ist, könnte man – dabei nur geringfügig über Boltzmann hinausgehend – argumentieren, dass nahezu unser gesamtes wissenschaftliches Wissen mindestens indirekt auf wissenschaftliche Modelle angewiesen ist.

---

3 Ludwig Boltzmann, *Model*. In: *Encyclopaedia Britannica*, 10. Auflage. (1902); ohne Änderungen wiederabgedruckt in der 11. Aufl. (1911). New York 1911, 638.

Als Gewährsmann für seine Überlegungen zieht Boltzmann den englischen Physiker James Clerk Maxwell (1831–1879) heran, dessen mechanisches Äthermodell den Boden für die später von ihm selbst ausgearbeitete moderne Theorie des Elektromagnetismus bereitet hatte. Die Analyse und Erklärung elektrischer und magnetischer Phänomene stand zunächst vor scheinbar unüberwindlichen Schwierigkeiten, weil völlig unklar war, wie das Substrat dieser Phänomene beschaffen sein müsste, um die Vielfalt von neuen Beobachtungen und Zusammenhängen zu erklären. Boltzmanns Darstellung zufolge gelang es Maxwell, diese Schwierigkeiten dadurch zu umschiffen, dass er zwei Gedankenbewegungen kombinierte. Wenn zum einen die „wahre Natur der Form“ der die Phänomene ausmachenden Konstituenten völlig unbekannt war („absolutely unknown“), sollte es doch den Versuch wert sein, zu erforschen, wie weit ein Erklärungsversuch auf der Basis rein mechanischer Prozesse („a conception of purely mechanical processes“) hilfreich sein könnte. Zum anderen sah Maxwell davon ab, den so postulierten mechanischen Prozessen jedwede Realität zuzuschreiben; sie seien lediglich „mechanische Analogien“ – bloße Mittel zum Zweck, die beobachteten Phänomene innerhalb einer theoretischen Beschreibung zu reproduzieren. Aus der erfolgreichen Beschreibung beobachteter Phänomene mittels derartiger mechanischer Modelle erwachse, anders als in vergangenen Fällen wissenschaftlicher Theoriebildung, nicht länger der Anspruch, den vom Modell postulierten Entitäten und Prozessen unabhängige Realität zuzuschreiben; vielmehr gehe es allein darum, tragfähige Analogien zu entwickeln und bestenfalls partielle Ähnlichkeiten zwischen Modell und Wirklichkeit freizulegen.<sup>4</sup>

Dass selbst diese im Modus des Hypothetischen verbleibende Einführung mechanischer Analogien und Modelle seinerzeit die Gemüter erhitzte, lässt sich durch folgendes Zitat Pierre Duhems illustrieren, der die nach theoretischer Vereinheitlichung strebende „kontinentale Physik“ mit der hemdsärmeligen, modellbasierten „englischen Physik“ kontrastiert, und zwar durchaus mit einer Prise Herablassung:

Vor uns liegt ein Buch, das die modernen Theorien der Elektrizität darlegen will. Es ist darin nur die Rede von Seilen, die sich auf Rollen bewegen, sich um Walzen winden, durch kleine

---

<sup>4</sup> Wie Hon und Goldstein (vgl. Fußnote 2) darlegen, stellt Boltzmann die Position Maxwell nicht ganz richtig dar: Maxwell verfährt anfangs noch nach dem Vorbild von Hypothesenbildung und entwickelt erst später ein Verständnis von Modellierung als eigenständiger Methodik, die auf die Theoriebildung zurückwirkt.

Ringe hindurchgehen und Gewichte tragen, von Röhren, deren manche Wasser aufsaugen, andere anschwellen und sich wieder zusammenziehen, von Zahnrädern, die ineinander eingreifen oder an Zahnstangen geführt werden; wir glaubten in die friedliche und sorgfältig geordnete Behausung der deduktiven Vernunft einzutreten, und befinden uns in einer Fabrik.<sup>5</sup>

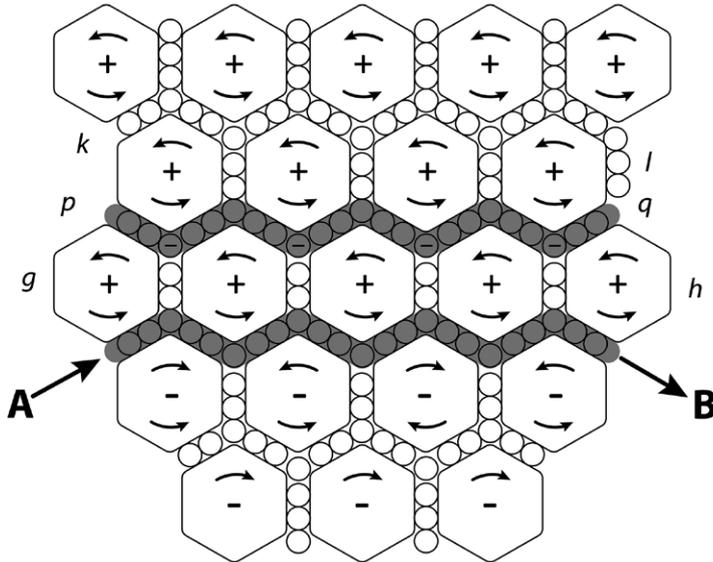


Abb. 1 Maxwells Mechanisches Äthermodell (Bildrechte liegen beim Verfasser / Axel Gelfert).

Der Vorwurf, der exzessive Gebrauch von Modellen sei dem theoretischen Anspruch der Wissenschaft abträglich und liefere bestenfalls eine Art Pseudo-Anschaulichkeit, durchzieht die Debatte über wissenschaftliche Modelle bis heute. Mag er auch in Einzelfällen legitim sein, so ist jedoch – nicht zuletzt vor dem Hintergrund des immensen Erfolgs von Modellen bei der Generierung neuer wissenschaftlicher Einsichten und Erkenntnisse im Laufe der letzten Jahrzehnte – fraglich, ob eine derartige Generalkritik nicht womöglich der Sache der Wissenschaft abträglich ist.

Denn seit den Ursprüngen des wissenschaftlichen Modellbegriffs und der Ausbildung einer methodisch eigenständigen wissenschaftlichen Praxis der Modellierung in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts hat sich die Anzahl etablierter wissenschaftlicher Modelle und Modelltypen auf geradezu frappierende Weise vervielfacht. Neben jenen Typen und Verwendungen von Modellen,

<sup>5</sup> Pierre Duhem, *Ziel und Struktur physikalischer Theorien*, Hamburg 1978 (Nachdruck der Ausgabe von 1908), 88.

die auch einem Wissenschaftler des späten 19. Jahrhunderts bekannt vorgekommen wären – etwa den genannten mechanischen Analogien, aus fundamentalen Theorien abgeleiteten Modellgleichungen (wie etwa der des idealen Pendels) und natürlich den didaktischen Gebrauch von materiellen Modellen als Schauobjekten – findet sich unter dem Oberbegriff des „wissenschaftlichen Modells“ eine höchst vielfältige und in sich heterogene Klasse epistemischer Objekte wieder. Einige unter ihnen, wie etwa die aus verschiedenen Materialien zusammengeschrabte dreidimensionale DNA-Doppelhelix von Watson und Crick, haben geradezu ikonischen Status erlangt; andere, beispielsweise die Lotka-Volterra-Gleichungen, können einerseits rein mathematisch als die Kopplung zweier nicht-linearer Differentialgleichungen erster Ordnung aufgefasst werden, repräsentieren andererseits die Abhängigkeit und Dynamik von Räuber- und Beutepopulationen.

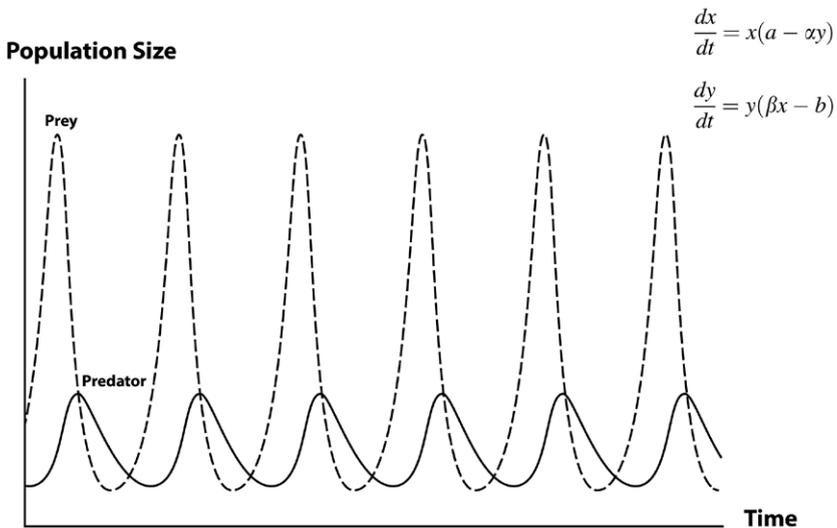


Abb. 2 Lotka-Volterra-Modell von Räuber-Beute-Populationen (Bildrechte liegen beim Verfasser/ Axel Gelfert).

Wieder andere Modelle kombinieren theoretische Annahmen über die Beschaffenheit des Untersuchungsobjekts mit visuell-diagrammatischen Elementen. So wird zum Beispiel das aus der Zellbiologie bekannte Flüssig-Mosaik-Modell, das die Grundstruktur der Zellmembran als von Proteinen und Ionenkanälen durchsetzte Lipid-Doppelschicht konzipiert, meist zeichnerisch dargestellt als Querschnitt durch einen Membransektor, der alle wesentlichen Elemente – so z. B. die erwähnten Ionenkanäle – einschließt. Die Lipide werden dabei als

runder „Kopf“ mit langem kohlenstoffbasiertem „Schwanz“ dargestellt, wodurch auf diagrammatische Konventionen aus anderen Disziplinen, z. B. der Chemie, verwiesen wird. Auch wenn das Flüssig-Mosaik-Modell weit mehr als nur die zeichnerische Darstellung der Zellmembran umfasst, darunter hochkomplexe Annahmen über die Funktionsweise und das Zusammenspiel der einzelnen Membranbestandteile, so wird all dies für jeden mit der Zellbiologie Vertrauten unmittelbar durch die grafische Darstellung aufgerufen.

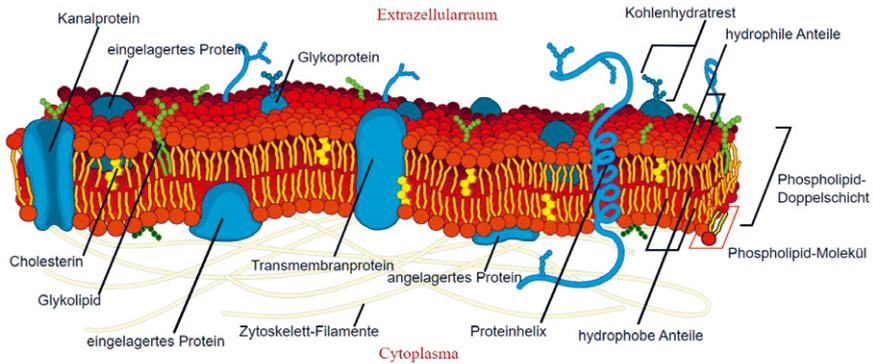


Abb. 3 Flüssig-Mosaik-Modell der Zellmembran (Bildrechte: gemeinfrei, Quelle: Wikimedia Commons, Urheber: LadyOfHats).

Handelt es sich beim Flüssig-Mosaik-Modell trotz des durch die bildhafte Darstellung suggerierten Realismus noch immer um eine Idealisierung, so steht etwa im Falle von Modellorganismen ein voll entwickeltes, wenn auch durch Züchtung geschaffenes Lebewesen in seiner ganzen empirischen Komplexität Modell für ein zu untersuchendes Zielphänomen. Bei letzterem kann es sich z. B. um ein (menschliches) Krankheitssyndrom handeln, das am (tierischen) Modell untersucht werden soll. Ein prominentes Beispiel für ein tierisches Modellsystem ist die Mitte der 1980er Jahre von Stewart und Leder erzeugte (und später patentierte) „OncoMouse“, das erste vom Menschen geschaffene transgene Tier, das durch Überführung dominanter Onkogene in Labormäuse entstanden war, die wiederum unter den Einfluss hochaktiver Promotoren gebracht worden waren, so dass die so manipulierten Tiere eine hohe Prädisposition zur Ausbildung verschiedener Karzinome aufweisen. Je nach Onkogen können die so geschaffenen Onkomäuse als Modell unterschiedlicher – auch im Menschen auftretender – Krebstypen aufgefasst werden.

Was aber hat nun die OncoMouse mit der Watson-Crick-Doppelhelix und diese wiederum mit den Lotka-Volterra-Gleichungen gemein? Inwieweit sind

alle drei Beispiele für dieselbe wissenschaftliche Wissensform – also dafür, was ein wissenschaftliches Modell *im Allgemeinen* ausmacht? Im Hintergrund steht hierbei nichts anderes als die ontologische Frage danach, was – auf fundamentaler Ebene – denn nun ein Modell im eigentlichen Sinne sei. Dass es auf diese Frage womöglich keine befriedigende Antwort geben würde, ahnte bereits in der Mitte des letzten Jahrhunderts der amerikanische Philosoph Nelson Goodman (1906–1998), der beklagte, es gebe „wenige Begriffe, die im populären wie auch im wissenschaftlichen Sprachgebrauch so promisk verwendet werden wie der des Modells“.<sup>6</sup>

Dabei gab es durchaus erfolgversprechende Versuche, den Modellbegriff in wissenschaftstheoretisch-formaler Hinsicht zu vereindeutigen – auch wenn angesichts der rapiden Erweiterung dessen, was auf wissenschaftspraktischer Ebene als „Modell“ bezeichnet wird, jeder Versuch einer solchen Vereindeutigung absehbar zu Kontroversen über die deskriptive Adäquatheit der vorgeschlagenen eindeutigen Definition bzw. Charakterisierung führen muss. Besonders einflussreich waren solche Ansätze, die sich eine formale Ausgestaltung des Verhältnisses von Modellen zu Theorien zum Ziel gesetzt hatten.

Traditionell wurden im Rahmen der sog. *syntaktischen Auffassung* Theorien als Menge von miteinander in einem logisch-deduktiven Zusammenhang stehenden Aussagen aufgefasst. Als „Modell“ wurden in diesem Kontext Regeln zur Interpretation eines Kalküls (bzw. im engeren Sinne jeweils *eine* solche, in sich stimmige Interpretation) bezeichnet, während die in der Wissenschaftspraxis gebräuchliche Vorstellung, Modelle hätten oft analogischen Charakter und könnten als Näherungen oder Anwendungen der Theorie auf spezifische Situationen betrachtet werden, wenig Berücksichtigung fand.<sup>7</sup> Entsprechend dieser Auffassung wäre ein Modell dadurch charakterisiert, dass es die Basis darstellt für *eine* mögliche Interpretation einer vorgegebenen Menge theoretischer Aussagen, unter der diese als axiomatisch wahr angesehen werden können. Verkürzt ausgedrückt: Ein Modell definiert gewissermaßen eine (u. U. kontrafaktische) „Modellwelt“, innerhalb derer die Axiome einer Theorie konsistent als wahr angenommen werden können. So wären die Modellgleichungen des

---

6 „Few terms are used in popular and scientific discourse more promiscuously than ‚model‘.“ – Nelson Goodman, *Languages of Art*, Indianapolis 1976, 171.

7 Dass es zu kurz greifen würde, der klassischen Wissenschaftstheorie pauschal eine Vernachlässigung wissenschaftlicher Modellbildung vorzuwerfen, legt u. a. folgender Aufsatz dar: Sebastian Lutz, *On a Straw Man in the Philosophy of Science: A Defense of the Received View*. In: HOPOS. The Journal of the International Society for the History of Philosophy of Science 2 (2012) 77–119.

idealen Pendels eine – aber eben nur *eine* – Realisierung der Newtonschen Theorie, deren Axiome die bekannten Newtonschen Grundgesetze sind. Die *semantische* Auffassung geht einen Schritt weiter und charakterisiert Theorien und Modelle nicht länger als sprachliche Gebilde – auch nicht als formalsprachliche – sondern als *abstrakte Strukturen*, die bestimmte theoretische Grundannahmen respektieren und darüber hinaus in einem bestimmten Verhältnis zur Welt stehen. So verstanden sind Modelle nicht nur Auslegungen (oder Realisierungen) einer vorgegebenen Theorie, sondern sind vor allem auch Modelle von etwas in der Welt. Theoretische Modelle rücken damit in den Fokus der philosophischen Beschreibung wissenschaftlicher Theoriebildung, und dies so sehr, dass bisweilen der Theoriebegriff selbst als sekundär und bloß abgeleitet verstanden wird: „*A scientific theory is best thought of as a collection of models*“, lautet ein oft zitierter Slogan, der die semantische Auffassung vom Verhältnis zwischen Theorien und Modellen auf den Punkt bringt.<sup>8</sup>

Auch wenn der semantischen Auffassung eine größere Affinität zu Modellen und damit eine größere Nähe zur wissenschaftlichen Praxis nachgesagt wird, so bleibt die Vorstellung von Modellen als abstrakten Strukturen dennoch hinter der – sehr heterogenen – Wissenschaftspraxis zurück. Dies betrifft insbesondere die Vorstellung davon, wie Modelle auf ihre Zielsysteme in der Welt Bezug nehmen. So wird die Verbindung zwischen Modell und Zielphänomen nach Art einer mathematischen Abbildung vorgestellt: genauer gesagt als (wenigstens partieller) Isomorphismus. Jedem Element des Modells soll ein Element im wirklichen Zielsystem eineindeutig zugeordnet werden können, so dass sich die Abbildung auch umkehren lässt. Mag dies für die Physik noch hier und da plausibel sein, zumindest dort, wo man berechtigter Hoffnung sein kann, sich auf eine präzise und umfassende Theorie stützen zu können, die noch dazu hochgradig mathematisierbar ist, so erscheinen vom Standpunkt anderer Disziplinen – wie etwa der Geologie oder der Ökologie – sowohl die Privilegierung mathematischer Beschreibungsweisen als auch das doppelte Ideal der Vollständigkeit und Eineindeutigkeit als wagemutig.

Ihre Anfangsplausibilität beziehen die diskutierten wissenschaftstheoretisch-formalen Versuche der Vereindeutigung des Modellbegriffs daraus, dass sie sich auf ein – womöglich vages – vortheoretisches Einvernehmen darüber stützen können, dass Modelle in vielen Fällen bestimmte Aspekte der Realität widerspiegeln sollten. Jedoch wäre es ein Fehlschluss zu glauben, dass wir darum

---

8 Vgl. hierzu z. B. Patrick Suppes, *A Comparison of the Meaning and Uses of Models in Mathematics and the Empirical Sciences*. In: *Synthese* 12 (1960), 287–301.

Modelle stets und ausschließlich nach dem Vorbild mathematischer Abbildungen betrachten müssten. Hinzu kommt, dass nicht alle Modelle reale Zielsysteme abbilden oder repräsentieren, sondern dass Modelle oft auch dazu dienen, Möglichkeiten oder kontrafaktische Szenarien auszuloten. Die Vorstellung, Modelle würden auf eineindeutige Weise einen vorgegebenen Teilbereich der Realität abbilden, wird also mindestens dadurch verkompliziert, dass Modelle auch dann eine zentrale Rolle in der Wissenschaft spielen, wenn es – wie im Fall kontrafaktischer Erwägungen – keinen abbildbaren Teilbereich der Realität gibt oder wenn noch ungeklärt ist, ob es sich bei dem vermeintlichen Zielsystem um ein reales Phänomen handelt (und nicht etwa um Hintergründrauschen, eine Verkettung von Zufällen oder ein anderweitiges nicht-reproduzierbares Artefakt der verwendeten Untersuchungsmethoden). Die Güte eines Modells lässt sich also nicht dadurch feststellen, dass man – naiv gesprochen – das Modell neben das Zielsystem legt und vergleicht, wie ähnlich sich die beiden sind. Lässt sich ein empirisch reales Zielsystem ausmachen, so wird ein Modell zwar nur insoweit als dessen erfolgreiche Repräsentation gelten können, wie es in der richtigen Relation zu ihm steht, doch ist die Güte eines Modells nicht allein eine Sache der Beziehung zwischen *model* und *target*, sondern hängt mindestens auch von der Beziehung zum Modellbenutzer (*user*) ab.

Die Idee, dass Modellen auch eine pragmatische Dimension zukommt – mit anderen Worten, dass sie als Erkenntnisinstrumente für konkrete Benutzer fungieren – hat eine lange Tradition, die bereits in der oben diskutierten formativen Phase des Modellierens als eigenständiger wissenschaftlicher Methodik aufscheint. Nichts anderes deutet Boltzmann an, wenn er Maxwell die Vorstellung zuschreibt, Modelle seien „Mittel zur Hervorbringung von Phänomenen“ (*means by which phenomena could be reproduced*)<sup>9</sup>, die in relevanter Hinsicht realen Systemen ähneln; Modelle sind also für den *Gebrauch* konzipiert. Eine systematischere Diskussion erfährt dieser Aspekt unter anderem in der Allgemeinen Modelltheorie Herbert Stachowiaks (1921–2004), der, ausgehend von der Feststellung, dass Modelle „ihren Originalen [=Zielsystemen] nicht *per se* eindeutig zugeordnet“ sind, den Modellbegriff eng mit der Pragmatik ihres Gebrauchs verknüpft:

Modelle sind nicht nur Modelle *von etwas*. Sie sind auch Modelle *für jemanden*, einen Menschen oder einen künstlichen Modellbenutzer.<sup>10</sup>

---

9 Siehe Fußnote 3.

10 Herbert Stachowiak, *Allgemeine Modelltheorie*, Wien/New York 1973, 133.

Als solche sind sie sowohl zeitlich als auch an einen Zweck gebunden, und eine um Vollständigkeit bemühte Charakterisierung muss nicht nur beantworten können, „wovon etwas Modell ist, sondern auch, für wen, wann und wozu bezüglich seiner je spezifischen Funktionen es Modell ist“.<sup>11</sup>

In den letzten Jahren hat die pragmatische Dimension wissenschaftlicher Modelle neue Aufmerksamkeit erfahren, indem sie als multifunktionale *epistemische Werkzeuge* (engl. „epistemic tools“/„epistemic artefacts“) charakterisiert wurden. Die traditionelle Fokussierung auf die repräsentative Funktion von Modellen stellt dieser Auffassung nach eine unzulässige Verengung dar, die weder die vielfältige Genese und Anwendung wissenschaftlicher Modelle widerspiegeln kann, noch den – mitunter einander zuwiderlaufenden – Zielsetzungen der wissenschaftlichen Praxis gerecht wird. Zwar können Modelle durchaus repräsentativ gebraucht werden, doch ist dies eben nur eine von verschiedenen legitimen Verwendungsarten. So fordert etwa Tarja Knuuttila eine Abkehr von der Fixierung auf die „dyadische“ Modell-Zielsystem-Beziehung, die stattdessen durch eine Art Dreiecksbeziehung zwischen Modell, Zielsystem und Nutzer abgelöst werden soll. Damit verbunden ist die Aufwertung des Konstruktionsprozesses wissenschaftlicher Modelle, der nicht nur den Bezug zum Zielsystem herstellen, sondern auch sicherstellen soll, dass das so konstruierte Modell im konkreten Fall der Anwendung durch einen Nutzer erfolgreich als Instrument zur Extraktion von Wissen über das Zielsystem fungieren kann. Modelle werden deshalb charakterisiert als

concrete artefacts that are built by specific representational means and are constrained by their design in such a way that they facilitate the study of certain scientific questions, and learning from them by means of construction and manipulation.<sup>12</sup>

## 2. Wozu (ge)brauchen wir wissenschaftliche Modelle?

Zweierlei Grundbeobachtungen ergeben sich aus dem bisher Gesagten. Zum einen sind Modelle – verstanden als Produkte einer eigenständigen Praxis des wissenschaftlichen Modellierens – umfassend weder durch ihre Charakterisierung als bloß abstrakte Strukturen noch als in bestimmten

---

11 Ibid.

12 Tarja Knuuttila, *Modelling and Representing: An Artefactual Approach to Model-based Representation*. In: *Studies in History and Philosophy of Science* 42 (2011), 262.

Ähnlichkeitsbeziehungen stehende materielle Nachbildungen von Zielsystemen beschrieben. Vielmehr sind sie Erkenntnisinstrumente, deren oft komplexe, interessengeleitete Genese sich in einer durchaus heterogenen Beschaffenheit niederschlägt, so dass wissenschaftliche Modelle oft theoretischen Annahmen, materielle Faktoren und verschiedene mediale Formate miteinander kombinieren. Zum anderen sind Modelle nicht bloß Modelle *von* etwas, sondern vor allem auch Modelle *für* jemanden. Die Güte eines Modells hängt nicht allein von Aspekten der dyadischen Modell-Zielsystem-Relation ab, sondern bemisst sich daran, wie gut ein Modell sich innerhalb der Dreiecksbeziehung Modell-Zielsystem-Nutzer bewährt. Dabei ist das maßgebliche Kriterium nicht die individuelle Willkür des einzelnen Modellbenutzers; ob ein Modell erfolgreich ist oder nicht, liegt nicht im Auge des Betrachters. Vielmehr orientiert sich der Erfolg eines Modells daran, ob es objektiv geeignet ist, den zu Grunde liegenden Interessen gerecht zu werden, also z. B. Antworten auf die im Rahmen des wissenschaftlichen Erkenntnisprozesses an das Modell herangetragenen Fragen zu liefern.

Die Pragmatik wissenschaftlicher Modelle ernst zu nehmen, heißt, den Gebrauch von Modellen in spezifischen Kontexten nicht als etwas Nachgeordnetes zu betrachten, ganz so als müsste man stets zuerst ein möglichst wirklichkeitstreuere Modell konzipieren, ehe dieses dann in einem zweiten Schritt auf eine spezifische Situation angewendet werden kann. Stattdessen richtet die pragmatische Auffassung wissenschaftlicher Modelle den Blick darauf, dass Modelle immer schon mit dem Blick auf (reale oder hypothetische) Benutzer und Anwendungssituationen hin konzipiert werden, also zum Zweck ihres Gebrauchs. Die Hinwendung zur Pragmatik des wissenschaftlichen Modellgebrauchs verändert nachhaltig die Perspektive darauf, was Modelle ausmacht und inwiefern sie ein integraler Bestandteil der heutigen Wissenschaft sind. Denn die Frage nach deren Ontologie – also danach, was ein Modell im Allgemeinen, auf einer fundamentalen Ebene, ausmacht – verliert dadurch an Dringlichkeit. Stattdessen rückt die Frage in den Mittelpunkt, was Modelle für uns leisten, wie sie funktionieren und welche wiederkehrenden Arten des Gebrauchs von Modellen wir in den Wissenschaften vorfinden.

Wozu nun werden Modelle in der Wissenschaft *ge-braucht*? Diese Frage ist selbst doppeldeutig und kann zum einen interpretiert werden als Frage danach, warum wir Modelle überhaupt benötigen, zum anderen als Frage nach den unterschiedlichen Arten und Weisen des Modellgebrauchs. Die Antwort auf die erste Frage scheint offensichtlich: Modelle benötigen wir mindestens immer dann, wenn wir über unvollständiges Wissen verfügen – insbesondere

dann, wenn wir es mit Phänomenen zu tun haben, die zu komplex sind, um sie auf eine theoretisch umfassende, analytisch geschlossene Weise beschreiben zu können. Und selbst in Situationen, die von einer zu Grunde liegenden Theorie im Prinzip gut beschrieben werden könnten, können Modelle mittels Abstraktion und Idealisierung willkommene Vereinfachungen liefern, die die Auswertung und Vorhersage erheblich erleichtern. Doch geht es bei der Modellierung durchaus nicht immer darum, eine Situation unter Abwägung der zur Verfügung stehenden Ressourcen unter das Dach einer Theorie zu zwingen; auch auf der Ebene der Beobachtung sind wir oftmals auf Modelle angewiesen.

Zwar werden Theorie und Beobachtung oft als einander unabhängig gegenüberstehende Erkenntnispole behandelt – schließlich soll die Beobachtung ein neutraler Prüfstein der Theorie sein – doch ist in der Praxis eine theoriefreie Beobachtung nahezu unmöglich. Schon der Blick durch ein Lichtmikroskop erfordert theoretische Annahmen, z. B. über die Auflösung des Geräts und darüber, welche Lichterscheinungen womöglich bloß Artefakte des Beobachtungsprozesses sind. Je komplizierter und technologisch aufwendiger Beobachtungen werden, desto wichtiger wird es, sich nicht auf Rohdaten zu stützen, sondern auf valide, um Fehler und Rauschen bereinigte Messdaten. Nicht immer ist offensichtlich, wie sich die so gewonnenen validierten Daten zusammenfassen lassen. Umso wichtiger ist es, auf Datenmodelle („models of data“) zurückgreifen zu können, die deshalb auch als Mittel zur Disziplinierung unserer technisch vermittelten Beobachtungen verstanden werden können.

Daran, dass wir Modelle für die wissenschaftliche Forschung benötigen, besteht kaum ein Zweifel. Wenn wir jedoch Modelle in einem solch fundamentalen Sinne brauchen, *wie* – und auf welche wiederkehrenden Arten und Weisen – gebrauchen wir Modelle in der wissenschaftlichen Praxis? Jeder konkrete Gebrauch eines Modells bringt fallspezifische Charakteristika mit sich. Dennoch lassen sich eine Reihe typischer Verwendungsarten identifizieren, die mit unterschiedlichen Funktionen wissenschaftlicher Modelle verknüpft sind. Diese in eine Liste zu bringen, soll nicht suggerieren, dass mit den aufgeführten Funktionen das Spektrum möglicher Verwendungsarten ausgeschöpft wäre; zugleich schließen nicht alle Funktionen einander aus. Im Folgenden sollen vier der zentralen Verwendungsweisen wissenschaftlicher Modelle diskutiert werden: die Verwendung von Modellen 1.) als Repräsentation (repräsentationale Funktion), 2.) als Mittel zur Vorhersage (prädiktive Funktion), 3.) als Hilfsmittel zur Intervention (instrumentalistische Funktion) und 4.) als Mittel zum Ausloten möglicher explanatorischer, kausaler und theoretischer Zusammenhänge (explorative Funktion).

Die repräsentationale Funktion wissenschaftlicher Modelle leitet sich daraus ab, dass ein Modell stellvertretend für sein Zielsystem verwendet werden kann: Es dient als ein uns zugänglicheres Ersatzsystem, gerade weil eine vollständige Beschreibung des Zielsystems in vielen Fällen nicht verfügbar ist. Damit kommt Repräsentation der intuitiven Vorstellung am nächsten, ein Modell sei gewissermaßen ein Abbild des Zielsystems bzw. einiger seiner Teilaspekte. Allerdings ist subjektiv zugeschriebene Ähnlichkeit in der Regel kein guter Ratgeber hinsichtlich der Frage, ob ein Modell sein Zielsystem erfolgreich repräsentiert. Denn zum einen mangelt es in der Regel an einem modell-unabhängigen Zugang zum Zielsystem, so dass sich Modell und Zielsystem nicht direkt miteinander vergleichen lassen. Zum anderen ist die Ähnlichkeitsrelation selbst eine hochproblematische und Gegenstand zahlreicher philosophischer Diskussionen. Für Goodman ist die Vorstellung, Repräsentation lasse sich auf bloße Ähnlichkeit zurückzuführen die „naivste Auffassung von Repräsentation“<sup>13</sup>, weswegen er dafür argumentiert, dass Repräsentation nicht durch Ähnlichkeit allein herbeigeführt werden kann, sondern ein Element der Konvention beinhalten muss. So ähneln zwei eineiige Zwillinge einander sicher mehr als beiden die Fotografie des einen – doch nur bei letzterer handelt es sich um eine Repräsentation (und auch nur des einen Zwillinges). Selbst bei piktorialen Repräsentationen kann Ähnlichkeit also nur von sekundärer Bedeutung sein. Im Falle wissenschaftlicher Modelle gilt es außerdem zu bedenken, dass das Weglassen von Details mit dem Ziel der Vereinfachung mehr als nur ein notwendiges Übel ist. Oft geht es bewusst darum, zu klären, was minimal erforderlich ist, um z. B. ein beobachtetes Phänomen zu erklären. In solchen Fällen würde die Güte eines Modells unter der Hinzufügung unnötiger Einzelheiten leiden, auch wenn diese die Ähnlichkeit eines Modells zu seinem Zielsystem scheinbar erhöhen würden: „*The adding of details with the goal of, improving ‘[such a] model is self-defeating – such improvement is illusory*“.<sup>14</sup>

Im Hinblick auf Modelle als Instrumente zur Vorhersage von Phänomenen oder Entwicklungen, d. h. in ihrer *prädiktiven* Funktion, sticht zunächst eine Parallele mit wissenschaftlichen Theorien ins Auge. Auch Theorien werden oft daran gemessen, wie gut sie zukünftige Entwicklungen oder Beobachtungen

---

13 „The most naive view of representation might perhaps be put somewhat like this: ‚A represents B only if A appreciably resembles B.‘“ – Nelson Goodman, *Languages of Art*, Indianapolis 1976, 3.

14 Robert Batterman, *Asymptotics and the Role of Minimal Models*. In: *The British Journal for the Philosophy of Science*, 52 (2002), 22.

vorhersagen können. Während bei Theorien oft der Fähigkeit, neuartige Phänomene vorherzusagen, große Bedeutung beigemessen wird – prominentes Beispiel ist die ursprünglich als Widerlegung der Wellentheorie des Lichts gedachte Vorhersage des sog. „Poissonschen Flecks“ im Schatten einer Beugungsfigur – sind Modelle oft für bereits bekannte Phänomenbereiche intendiert. Doch auch sie sollten brauchbare Vorhersagen treffen, so dass einem prädiktiv erfolgreichen Modell in der Regel größeres Vertrauen entgegengebracht wird. Fortschritte im Bereich der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens haben es in den letzten Jahren möglich gemacht, mittels künstlicher neuronaler Netzwerke Modelle zu generieren, die zwar prädiktiv höchst erfolgreich sind – z. B. weil das Netzwerk auf der Grundlage großer Datenmengen von bereits beobachteten Fällen erfolgreich dazu angeleitet wurde, neue Fälle verlässlich zu kategorisieren – bei denen aber nicht länger nachvollziehbar ist, auf der Basis welcher (ggf. auch kausal zu rechtfertigenden) Kriterien sich ihr empirischer Erfolg erklären ließe.

Dort, wo Modelle die Grundlage praktischer Interventionen in die Welt liefern, dominiert ihre *instrumentalistische* Funktion. Dabei ist der Begriff der „Intervention“ so allgemein zu verstehen, dass darunter sowohl die Vorbereitung eines wissenschaftlichen Experiments als auch z. B. das Herbeiführen gesellschaftlicher oder technologischer Veränderungen fallen könnte. In solchen interventionistischen Kontexten werden Modelle handlungsleitend zur Rechtfertigung bestimmter Entscheidungen herangezogen, und die Güte eines Modells bemisst sich dann in erster Linie am Erfolg der geplanten Intervention. Damit wird auch deutlich, dass die Funktionen von Modellen überlappen können: Denn ob ein Modell instrumentalistisch erfolgreich ist, wird auch davon abhängen, ob es das Resultat der geplanten Intervention hinlänglich erfolgreich vorhersagt, d. h., ob es prädiktiv erfolgreich ist. Jedoch ist zweitrangig, ob das Modell jeden relevanten Aspekt des Zielsystems repräsentiert oder für jede Variable gleichermaßen genaue Vorhersagen macht; vielmehr wird die Beurteilung des Modells dominiert von externen Zielen und Bedürfnissen, die auch der Begrenztheit verfügbarer Ressourcen und ggf. der Notwendigkeit, hier und jetzt handeln zu müssen, Rechnung trägt. So kann ein Modell auf instrumentalistischer Ebene als Entscheidungshilfe erfolgreich sein, obwohl allen Entscheidungsträgern bewusst ist, dass es prinzipiell möglich wäre, ein genaueres und vollständigeres Modell zu konstruieren – was jedoch den verfügbaren Zeit- und Kostenrahmen sprengen würde. Womöglich sind es solche profanen Erwägungen, die dazu geführt haben, dass der handlungsleitenden Dimension von Modellen innerhalb der Wissenschaftstheorie in der Vergangenheit recht wenig Aufmerksamkeit geschenkt wurde.