

Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften

Debatte

Heft 2

Herausgeber: Präsident der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften

Redaktion: Sonja Ginnow unter Mitarbeit von Christiane Lahusen

Satz: Kathrin Künzel

Umschlagentwurf: Carolyn Steinbeck · Gestaltung

Druck: Oktoberdruck, Berlin

© Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin 2005

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Herausgebers gestattet.

## *Modelle des Denkens*

*Streitgespräch in der Wissenschaftlichen Sitzung  
der Versammlung der Berlin-Brandenburgischen  
Akademie der Wissenschaften  
am 12. Dezember 2003*

Einführung . . . . .	7
<i>Horst Bredekamp/Klaus Pinkau</i>	
Einladung zum akademischen Gespräch – Rundbrief . . . . .	9
<i>Horst Bredekamp</i>	
Modelle der Kunst und der Evolution . . . . .	13
<i>Martin Quack</i>	
Modelle in der Chemie . . . . .	21
<i>Jürgen Ehlers</i>	
Modelle in der Physik . . . . .	35
<i>Detlev Ganten</i>	
Modellentwicklung in der Medizin . . . . .	41
<i>Wolfgang Klein</i>	
Über den Nutzen naturwissenschaftlicher Denkmodelle für die Geisteswissenschaften . . . . .	45
<i>Eberhard Knobloch</i>	
Kurzdarstellung zum Thema „Modelle“ . . . . .	51
<i>Heinz Duddeck</i>	
Modelle in den Technikwissenschaften . . . . .	53
<i>Jürgen Mittelstraß</i>	
Anmerkungen zum Modellbegriff . . . . .	65
<i>Hans-Jörg Rheinberger</i>	
Überlegungen zum Begriff des Modellorganismus in der biologischen und medizinischen Forschung . . . . .	69
<i>Herfried Münkler</i>	
Modelle im politisch-militärischen Bereich . . . . .	75
<i>Peter Költzsch</i>	
Zum Problem der Modelle aus der Sicht der Technikwissenschaften . . . . .	81
Diskussion . . . . .	91

## Einführung

### *Vorstellungen der EINEN Welt*

Mit Modellvorstellungen versuchen wir, uns die Wirklichkeit zu vergegenwärtigen. Unser Denken steht zu den Dingen im selben Verhältnis wie unsere Modellvorstellungen zu den Objekten, die sie repräsentieren. So kann sich das Denken von der Wirrnis der Phänomene lösen, um sie durch ihre Reduktion zunächst einordnen und verstehen, ihren Horizont sodann überschreiten zu können, allerdings für den Preis unserer Fesselung an die Modelle.

„Modelle“ waren deshalb der Ausgangspunkt für ein Gespräch zwischen den Disziplinen in der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Es interessierte nicht nur die Frage, wie Modellvorstellungen entstehen, sondern vor allem, wie sie weiterentwickelt und überprüft werden. Dabei trat der Unterschied zwischen den Kultur- und Naturwissenschaften zutage: Die ersteren sind auf den Träger der Kultur, den Menschen, bezogen; er schafft ihre Vorstellungen und ist der Richter darüber, ob diese adäquat sind; dieses Urteil bleibt den wechselnden Meinungen der Menschen unterworfen. Die letzteren unterwerfen sich mit der durch Beobachtungen oder Experimente überprüften Aussage der Modellvorstellungen dem Urteil der Natur darüber, inwieweit sie adäquat sind oder unter dem „Druck der Tatsachen“ verändert werden müssen. Sie werden mit Hilfe der Mathematik zu abstrakten Theorien, sie lösen sich vom menschlichen Bezug und seinen wechselnden Meinungen. Damit allerdings scheinen sie gleichzeitig ihren Einfluß auf menschliches Denken und Fühlen einzubüßen.

12. November 2003

## Rundbrief an alle Mitglieder der Berlin- Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften

Für den 12. Dezember 2003 ist von 9.00 Uhr bis 13.00 Uhr ein akademisches Gespräch zum Thema „Modelle“ geplant, welches wir (H. Bredekamp und K. Pinkau) organisieren und moderieren sollen. Dazu möchten wir Ihnen einige Gedanken mitteilen, damit Sie sich mit unserem Konzept vertraut machen und auf die Diskussion vorbereiten können. Wenn Sie jetzt schon wissen, daß Sie sich mit eigenen „spontanen Beiträgen“ an der Diskussion beteiligen möchten, dann bitten wir um eine kurze Nachricht, damit wir den Ablauf des akademischen Gesprächs besser planen können.

Ausgangspunkt war die Veranstaltung „Sprachlosigkeit zwischen den Wissenschaftskulturen“, die am 1. und 2. Oktober 2002 in der BBAW stattgefunden hatte.<sup>1</sup> Anlässlich dieser Veranstaltung wurde viel darüber geredet, daß man zu den Grundlagen der Arbeits- und Denkweise der Disziplinen zurückkehren müsse, um diese Sprachlosigkeit verstehen und vielleicht überwinden zu können. Das akademische Gespräch am 12. Dezember soll das versuchen.

### 1 Problem

Die angebliche Sprachlosigkeit zwischen den Wissenschaftskulturen scheint auch die Kommunikation mit der Öffentlichkeit zu betreffen. So schreibt Hans Blumenberg<sup>2</sup> über Selbstzeugnisse schöpferischer Menschen: „... Die Geschichte des technischen Geistes dagegen ist überaus arm an solchen Selbstzeugnissen ihrer Träger. Das ist nicht nur ein typologisches Phänomen, das den nüchternen Mann der Konstruktion charakterisiert. Es ist auch nicht nur ein soziologisches Phänomen der öffentlichen Wertung und Aufmerksamkeit, die sich erst mit der Beachtung der *artes mechanicae* durch die französische

---

<sup>1</sup> Siehe Jahrbuch 2002 der BBAW, S. 395.

<sup>2</sup> Blumenberg, H.: *Wirklichkeiten, in denen wir leben*, Reclam Universal-Bibliothek 7715, 1991, S. 59–60.

*Enzyklopädie* der geistigen Ursprungssphäre des technischen Produkts zuwenden. Es ist vor allem ein Phänomen der 'Sprachlosigkeit' der Technik. Für den Dichter und Künstler war schon in der Antike ein Arsenal von Kategorien und Metaphern, bis ins Anekdotische hinab, bereitgestellt worden, das zumindest in der Negation zu sagen gestattete, wie sich der schöpferische Prozeß verstanden wissen wollte. Für die herankommende technische Welt stand keine Sprache zur Verfügung, und es versammelten sich hier wohl auch kaum die Menschen, die sie hätten schaffen können. Das hat schließlich zu dem erst heute – da die technische Sphäre erstrangig 'gesellschaftsfähig' geworden ist – kraß auffallenden Sachverhalt geführt, daß die Leute, die das Gesicht unserer Welt am stärksten bestimmen, am wenigsten wissen und zu sagen wissen, was sie tun ...". Gerade die Fragwürdigkeit dieser Aussage scheint uns geeignet, unsere Diskussion zu beflügeln.

Das Thema „Modelle“ schien uns zudem ausreichend nahe an der Wurzel unserer Arbeits- und Denkweise zu liegen, um uns davon ausgehend gegenseitig zu beschreiben, wie in unseren Disziplinen der schöpferische Prozeß stattfindet. Eine Definition hat der Physiker Ludwig Boltzmann 1902 und 1910 in einem Beitrag zum Stichwort „Model“ in der *Encyclopedia Britannica* gegeben, wobei Wolfgang Klein darauf hingewiesen hat, daß „Denkmodelle“ nicht tangibel seien (oder nehmen auch sie von tangiblen Modellen ihren Ausgang?):

„*Model* (O. Fr. *modelle*, mod. *modèle*; lt. *modello*, pattern, mould; from Lat. *modus*, measure, standard), 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 ...

... Models in the mathematical, physical and mechanical sciences are of the greatest importance. Long ago philosophy perceived the essence of our process of thought to lie in the fact that we attach to the various real objects around us particular physical attributes – our concepts – and by means of these try to represent the objects to our minds ... On this view our thoughts stand to things in the same relation as models to the objects they represent. The essence of the process is the attachment of one concept having a definite content to each thing, but without implying complete similarity between thing and thought; for naturally we can know but little of the resemblance of our thoughts to the things to which we attach them ...“.

Leibniz, der Gründer unserer Akademie, hat sowohl die Stärken wie auch die Schwächen der Modellbildung in extreme Positionen hinein verfolgt. Ihm zufolge sind Ideen per se auf Modelle angewiesen, die eine objektive, visuelle oder haptische Qualität besitzen. Da sich das Denken von der Wirrnis der Phänomene zu lösen hat, ist Modellbildung für Leibniz die Voraussetzung jeder Reflexion. Modelle dienen dazu, den Horizont

scheinbar unüberschaubarer Probleme zu reduzieren, um diesen dann überschreiten zu können. Die Reduktion nicht handhabbarer Vielfalt geschieht in der Regel durch Visualisierung unanschaulicher Naturphänomene, unüberschaubarer Datenmengen und sprachlich nicht zu bewältigender Phänomene.

Leibniz hat auf Grund seiner Betonung materiell-sinnlicher Modelle für jedwede Form der Erkenntnis auch die Defizite der Modellbildung gesehen, die in der Reduktion der Phänomene, der Bindung der Imagination und der Ausblendung des nicht zu Bewältigenden liegen können. Jede modellfundierte Befreiung des Blickes zwingt diesen auch ein: die Bedingung der Lösung ist der Grund auch einer Fesselung. Diese Problematik scheint bis heute durch keine Modellbildung über das Funktionieren der Erkenntnis überholt worden zu sein. Auch Theorien, welche die Willensfreiheit negieren, beruhen auf Modellen, die erst die Freiheit erlaubt haben, den freien Willen als Illusion zu bestimmen.

## 2 Vorgehen

Unser Modell der Veranstaltung über Modelle am 12. Dezember sind die großen interdisziplinären Lehrveranstaltungen der ersten europäischen Universitäten im 13. Jahrhundert, nämlich die *Quæstiones disputatae*. Denn es erscheint uns unvermeidlich, eine Kette von Fragen vorgeben zu müssen, um gemeinsam erarbeitetes Wissen einer größeren Anzahl bedeutender Gelehrter durch eine Kette von Antworten erzeugen zu können.

Wir schlagen vor, die Diskussion auf zwei Pole, Naturwissenschaften einerseits, Geisteswissenschaften andererseits im Sinne der „ZweiKulturen“-These zuzuspitzen, um diese zu bekräftigen, zu modifizieren oder auch ad absurdum zu führen. Eine zu große Vielfalt birgt die Gefahr in sich, daß die Diskussion zerfasert. Dabei bleibt es der Entscheidung des einzelnen Wissenschaftlers überlassen, zu welcher der beiden Pole er sich zurechnen oder äußern will.

Das akademische Gespräch wird eröffnet durch zwei einführende Vorträge von je etwa 30 Minuten Dauer. Für die Naturwissenschaften teilen sich die Herren Quack und Ehlers die Vortragszeit, für die Geisteswissenschaften soll Herr Bredekamp am Beispiel seines Faches sprechen. Diese Vorträge sollen zwar in die Problematik der „Modelle“ einführen, aber vor dem Hintergrund der *Quæstiones* diese bereits ansprechen.

Da Modellbildung darauf bezogen sein muß, was das Ziel der wissenschaftlichen Tätigkeit in den einzelnen Disziplinen ist (nur Erkenntnis?), steht diese Frage immer im Hintergrund; sie wird deshalb in den *Quæstiones disputatae* nicht explizit angesprochen.

Quæstiones disputatae zum Thema Modelle.

*Erste Frage:* Sind es Vorstellungen und Bestandteile unserer Lebenswelt, unseres täglichen Umgangs, die wir zur Modellbildung verwenden? Wie werden Modelle weiterentwickelt, wer ist der Richter darüber, daß ein Modell und seine Fortentwicklung adäquat sind, das heißt sich zum Beispiel dem Ziel der Erkenntnis „angenähert“ haben?

*Zweite Frage:* Ist ein überprüftes, adäquates Modell die „wissenschaftliche Wahrheit“ und damit das Produkt und Ziel der Wissenschaft? Sind die Modelle unabhängig von den Menschen, die sie entwickeln, haben sie deshalb eine allgemeine Bedeutung? Ist die „wissenschaftliche Wahrheit“ kumulativ?

*Dritte Frage:* Was macht die Wissenschaft mit den Modellen? Kann die Fesselung überwunden werden, und wie?

In der klassischen dreiteiligen Vorgehensweise der *Quæstiones disputatae* würde der auf eine Frage gegebenen Antwort zunächst widersprochen werden, gefolgt von der Antwort auf diesen Widerspruch. Wir unterstellen, daß Widerspruch und Antwort nicht organisiert werden müssen, sondern sich ergeben werden.

Zumindest in den Naturwissenschaften ist evident, daß sich die Modelle von anschaulichen Vorstellungen lösen und lösen müssen, um Antworten zu ermöglichen, die den Problemen adäquat sind. Sie müssen zu abstrakten Theorien werden und lösen damit das Bedenken Hans Blumenbergs aus, „... daß die Leute, die das Gesicht unserer Welt am stärksten bestimmen, am wenigsten wissen und zu sagen wissen, was sie tun ...“.

Uns liegt daran, Sie mit Hilfe dieses Rundbriefes dazu aufzufordern, die *Quæstiones disputatae* zum Thema „Modelle“ zu einem Erfolg zu machen. Wir wollen Vortragende „eingeladener Kurzdarstellungen“ von je fünf Minuten Dauer in die Fragenreihe einordnen. Der Diskussion soll durch „spontane Beiträge“ von je höchstens drei Minuten Dauer Raum gegeben werden. Deshalb wäre es für das Gelingen des akademischen Gesprächs wichtig, wenn Sie sich auf „spontane Beiträge“ vorbereiten würden.

Als Zeit steht am 12. Dezember die Spanne von 9.00 Uhr bis 13.00 Uhr zur Verfügung. Von 11.00 Uhr bis 11.20 Uhr ist eine Kaffeepause vorgesehen. Nach der Mittagspause von 13.00 Uhr bis 14.00 Uhr wird die Geschäftssitzung der BBAW beginnen.

Mit freundlichem Gruß

Ihre

Horst Bredekamp (horst.bredkamp@culture.hu-berlin.de)

und

Klaus Pinkau (pinkau-muenchen@t-online.de)

*Horst Bredekamp*

## *Modelle der Kunst und der Evolution*

### *Vorbemerkung: Modellgebilde und Gedankenbilder*

Ein Muster der Modellverwendung, das gleichermaßen auf alle Disziplinen und Methoden appliziert werden kann, hat sich in den Geisteswissenschaften ebensowenig durchgesetzt wie in den Naturwissenschaften. Dennoch können zwei aus der Kunst und Kunstgeschichte stammende Modellfelder mit einer gewissen Berechtigung als exemplarisch angesehen werden, weil sie zu den frühesten und nachhaltigsten Prägungen dieses Gebietes gehören.

Aus dem Bereich der Kunst stammen vornehmlich Modelle der Architektur, die auf Grund ihrer rituellen Nutzung, aber auch ihrer praktischen Notwendigkeit am Anfang aller Modellpraxis standen. Da sie ihre Leitfunktion in materieller wie metaphorischer Hinsicht bis heute bewahrt haben, sollen sie im Zentrum des ersten Abschnittes stehen. Der zweite Teil betrifft das im sechzehnten Jahrhundert entwickelte Evolutionsmodell der Kunstgeschichte, das mit seinem Schema der künstlerischen Entwicklung eines der folgenreichsten Gebilde der Modellgeschichte überhaupt darstellt.

Beide Modellformen – sowohl Werk wie auch Evolution betreffend – sind insofern von übergreifender Bedeutung, als sie nicht nur ein dienendes Verhältnis des Modells zum Modellierten verkörpern. Vielmehr bezeugen sie ein komplexes Gespinnst von Effekten und Rückwirkungen. Dieser Grundproblematik gilt die folgende Einführung.

### *1 Gebaute Miniaturmodelle als Muster, Ideal und Fessel*

#### *1.1 Verkleinerung als Muster und Ermutigung*

Die ersten überlieferten Modelle sind als Kleinstarchitekturen identifiziert worden, welche die Bauwerke zumeist in maßstabsgetreuen Umsetzungen wiedergeben. Bei dieser Modellform ging es um vollgültige Repräsentation, um das Dargestellte als Grabbeigabe in eine andere Welt überführen zu können.<sup>1</sup> Sie unterscheiden sich deshalb von ihrem Vorbild allein hinsichtlich Material und Format.

---

<sup>1</sup> Vgl. Evers, B. (Hg.): *Architekturmodelle der Renaissance. Die Harmonie des Bauens von Alberti bis Michelangelo*, Ausstellungskatalog, München, New York 1995.

Ein weiterer Grund für die Verwendung von Modellen lag bereits in der Antike darin, daß Kunstwerke zu teuer waren, um ohne festgelegte und approbierte Modelle, sei es in Form von Zeichnungen, Reliefs oder plastischen Gebilden, geschaffen zu werden. In diesem Rahmen hat sich auch die Begriffsbildung vollzogen. Als Bezeichnungen für diese musterhaften Modelle der Umsetzung lassen sich die Begriffe *Modello* und *Disegno* bis weit in das Mittelalter und die Frührenaissance zurückverfolgen.<sup>2</sup>

In ihrem Verweischarakter haben diese Art Modelle über ihre Funktionsbestimmung hinaus eine unverwechselbare psychologische Wirkung. Die Kühnheit und Präzision, mit der beispielsweise die riesige, doppelschalige Kuppel des Florentiner Domes nach dem maßgeblichen Holzmodell umgesetzt wurde, verdeutlicht die ermutigende Kraft der vorbildhaften Kleinform in einer noch heute beeindruckenden Weise.<sup>3</sup> Als Vorschein des zu Verwirklichenden besitzen Modelle offenbar von Beginn an einen über ihre engere Bestimmung hinausgehenden, die Bereitschaft zum Handeln und zum Denken stimulierenden Überschub.

### 1.2 Modelle als ideale Wirklichkeit

Dieser *Surplus* liefert jedoch zugleich eines der systematisch mit der Modellverwendung verbundenen Probleme. Indem mit der Vorbildfunktion des Modells die intuitive Frage verbunden ist, inwiefern die Umsetzung das Versprechen der Kleinform einzulösen vermag, konnte die dienende Funktion in einen Anspruch umschlagen, der mit der ursprünglichen Modellfunktion kollidierte.

Ein besonders drastisches Beispiel der Kunst des sechzehnten Jahrhunderts verdeutlicht, wie sich das Modell an die Stelle des Modellierten zu setzen vermochte. Als die Herkulesgruppe des Bildhauers Baccio Bandinelli 1534 vor dem Florentiner Rathaus auf der Piazza della Signoria enthüllt wurde, äußerte sein Konkurrent Benvenuto Cellini eine so verletzend, sowohl die Gesamtkomposition wie auch alle Details vernichtende Kritik,<sup>4</sup> daß sich Bandinellis Gegenwehr – und hierin liegt der paradigmatische Zug – auf das gezeichnete Modell verlagerte: „Wehe Dir du böse Zunge, und wo bleibt mein Modell?“

---

<sup>2</sup> Vgl. Lepik, A.: *Das Architekturmodell in Italien 1335–1550*, Worms 1994.

<sup>3</sup> Siehe Evers: *Architekturmodelle* (Anm. 1), S. 14f.

<sup>4</sup> Sie enthält unter anderem folgende Polemik: „Alles was er anschaut, wandelt sich in seinen widerlichen Augen ins allerschlimmste Übel. Würde man dem Herkules die Haare scheren, bliebe ihm nicht genug Schädel übrig, um das Gehirn in sich zu bergen.“ Siehe in: Cellini, B.: *Mein Leben. Die Autobiographie eines Künstlers aus der Renaissance* (Übers. v. Jacques Laager), Zürich 2000, S. 577f.

Bandinelli spielte auf sein Selbstportrait an, auf dem eine großformatige Zeichnung einer anderen Version des Herkules und Kakus gemalt war. Die Zeichnung sollte überstrahlen, was es zu repräsentieren hatte.<sup>5</sup>

Eine nicht weniger spektakuläre Wendung des Modells gegen das Modellerte ereignete sich etwa zur selben Zeit im Bereich der Architektur. Als der römische Architekt Antonio da Sangallo Jahre nach der Zerstörung Roms von 1527 beauftragt wurde, den Neubau von St. Peter wieder in Gang zu bringen, arbeitete ein großer, hochkarätiger Stab von Bauleuten über Jahre nicht etwa an der Neubauruine selbst, sondern an einem bis in kleinste Details ausgeklügelten Modell, das seinerseits die Dimension einer veritablen Architektur erreichte. Es war begehbar, es besaß subtilste Lichtbrechungen und es war mit dem mathematischen Wissen der Fachleute ausgestattet. Aber es verwies nur mehr auf sich selbst.<sup>6</sup> Sangallos St. Peter-Modell bietet das psychologische Problem der Fixierung auf Modelle, gegenüber denen die Wirklichkeit eher als eine Entgleisung wirkt. Die Versuchung, Modelle für effektiver oder auch schöner zu halten als das, worauf sie verweisen sollen, hat in der so grandiosen wie tragischen Miniaturarchitektur Sangallos ihren exemplarischen Auftritt.<sup>7</sup>

Mit dieser Verkehrung der Hierarchie von Modell und Zielobjekt war ein bis heute wirksames Grundproblem angesprochen, das für Kunst und Wissenschaft sowie für Geistes- und Naturwissenschaften gleichermaßen bedeutsam ist. Es tritt überall dort auf, wo Analysen unabdingbar auf Simulationen angewiesen sind, deren Schönheit und Finesse die darzustellende Entität überstrahlen.

### 1.3 Modelle als Fessel

Historisch wurde dieser Vorgang der Fesselung bereits sehr früh reflektiert und damit die Kritik der Modelle in deren Verwendung auf teils konfliktvolle Weise eingebunden. Diese Volte ist mit Michelangelos Wirken als Architekt verbunden. Als er 1545 die Baustelle von St. Peter übernahm, bedeuteten ihm die Architekten, daß man auf der „Wiese“ des Sangallo-Modells noch lange Zeit würde weiden können, woraufhin Michelangelo zur

---

<sup>5</sup> Vgl. Wiemers, M.: „Und wo bleibt meine Zeichnung?“. Zur Werkgenese im bildhauerischen Oeuvre des Michelangelo-Rivalen Baccio Bandinelli. In: Rohlmann, M. & A. Thielemann (Hg.), Michelangelo. Neue Beiträge, Berlin 2000, S. 235–264.

<sup>6</sup> Vgl. Thoenes, C.: Antonio da Sangallos Peterskuppel. In: Striker, C. L. (Hg.), Architectural Studies in Memory of Richard Krautheimer, Mainz 1996, S. 163–167.

<sup>7</sup> Vgl. Bredekamp, H.: Sankt Peter in Rom und das Prinzip der produktiven Zerstörung. Bau und Abbau von Bramante bis Bernini, Berlin 2000, S. 58ff.

Antwort gab: „Ja, Schafe und Ochsen wie ihr“, um in einem Zug das Modell in das Depot zu verweisen und seine eigene, reduzierte, baubare Version dagegenzusetzen.<sup>8</sup>

Die Vorbildfunktion des Modells wendete sich nunmehr gegen dieses selbst. Michelangelos Konflikt mit den Modellarchitekten setzte eine historische Zäsur in der Modelltheorie: Obwohl ebenfalls auf Modelle angewiesen, versuchte Michelangelo sie prinzipiell zu meiden, weil er ihren statischen und defizitären Charakter nicht ertragen konnte. Seine Wirklichkeit war die seines Kopfes. Was er abbildete, waren die Bewegungen seiner Ideen, gegenüber denen jedes Modell eine Erstarrung bedeuten mußte. Modelle verkörperten für ihn die Stillstellung der Dynamik seines Denkens. Als er geradezu gezwungen wurde, dem Modell von St. Peter zu folgen, baute er noch im letzten Moment gegen dieses an, indem er etwa die parataktische Reihe der Dreiecksgiebel Fenster der Kuppel auflöste und Kreissegmentöffnungen dazwischensetzte. Michelangelo war als Künstler der Modelle auch ein Meister der Selbstentfesselung von Modellen.<sup>9</sup>

Dieses Konfliktverhältnis hat sich bis heute kaum gewandelt. Die Begrifflichkeit der Neurobiologie spricht etwa von „Hirnarchitektur“. Damit aber – so ist eingewendet worden – wird eine Statik und Stabilität vorgegeben, die nur im Metaphernbild, nicht aber in der Natur gegeben ist. Der Hinweis, daß kein Architekturmodell die Dynamik neuronaler Prozesse wiedergeben könne, entspricht noch immer Michelangelos Modellkritik.<sup>10</sup>

Systematisch ergeben sich aus diesem Anwendungsbereich der Modelle drei Möglichkeiten:

1. Anleitung und Ermutigung des zu Errichtenden,
2. Konkurrenz gegenüber dem zu Realisierenden,
3. Fesselung der Denk- und Konstruktionspotentiale.

## 2 Evolutionsmodelle

### 2.1 Das Schema

Michelangelos Aversion gegen Architekturmodelle lag an deren Unfähigkeit, das Prozessuale des Denkens gleichsam filmisch einzufangen. Das Prinzip der sich in Bewegung

---

<sup>8</sup> Vasari, G.: *Le vite de' più eccellenti pittori scultori ed architettori*, hrsg. von G. Milanesi, Florenz 1906, Bd. VII, S. 218.

<sup>9</sup> Vgl. Bredekamp, H.: Michelangelos Modellkritik. In: Evers: *Architekturmodelle* (Anm. 1), S. 116–123.

<sup>10</sup> Vgl. Rose, S. P. R.: *New Millennium: New Biology?* In: *Changing Concepts of Nature at the Turn of the Millennium. Proceedings of the Pontifical Academy of Sciences 26–29 October 1998*, Rom Vatikanstadt 2000, S. 105–120.

verändernden Vorgänge ist jedoch seinerseits zum Objekt der Modellbildung gemacht worden.

Das Modell dieser Modellbildung wiederum liegt im Bereich der Bildenden Kunst, weil es der Biologie auf Grund der alttestamentlichen Lehre, nach der die Arten in sieben Tagen geschaffen worden seien, verwehrt war, den Gedanken einer Entwicklung der Spezies zu favorisieren. Im Bereich der Kultur spielte diese Hemmung keine Rolle. Daher hat es die Kunstgeschichte seit dem sechzehnten Jahrhundert vermocht, erste Modelle evolutionärer Vorgänge zu entwickeln, die im neunzehnten Jahrhundert von der Evolutionsbiologie übernommen oder parallel entwickelt wurden.

Seit Giorgio Vasaris „Viten“ von 1550 ist die Kunstgeschichte der Überzeugung gefolgt, daß die Entwicklung der Kunst nach einem vegetabilen Rhythmus ablaufe: vom Einfachen zum Komplexen und umgekehrt.<sup>11</sup> Sangallos römischer Palazzo Farnese bietet in diesem Sinn um 1540 das Beispiel einer konzessionslosen, bauhaushaften Einfachheit, raffiniert in der unerhörten Präzision seiner Stockwerksgliederung. Die römische Kirche Il Gesu rhythmisiert 40 Jahre später die Fassade in horizontaler, vertikaler und räumlicher Staffelung; vor allem die riesigen Eckvoluten überspielen den Gestus der rechtwinkligen Kompaktheit. Borrominis römische Kirche San Carlino läßt die Fassade in eine schwingende Membran transmutieren, die kaum mehr an Stein denken läßt und die Fläche in eine hochkomplexe Raumdynamik überführt. Um 1740 lassen die Brüder Asam in München die Wand im Stil einer die feste Materie auflösenden und zerstäubenden Naturphilosophie in ihrer Materialität gleichsam verschwinden. Im Sinne des vegetabilen Evolutionsmodells war dies die Stufe der Spätpracht und des überkomplexen Welkens. Kurz darauf entstand in Berlin die Oper Knobelsdorffs als einer der ersten klassizistischen Bauten, der nach dem „Verblühen“ des Rokoko die Klarheit des Beginns zurückzubringen schien.<sup>12</sup>

## 2.2 Der Erfolg

Dieses Entwicklungsschema wurde auf die Kunst insgesamt übertragen, da Künstler und Stile seit Filippo Baldinuccis Kunstgeschichte von 1681 in Pflanzen- und Baummodelle

---

<sup>11</sup> Eine vorzügliche Einführung bietet der erste Band der Neuübersetzung: Vasari, G.: Kunstgeschichte und Kunsttheorie, hrsg. von M. Burioni und S. Fester, Berlin 2004.

<sup>12</sup> Zur Geschichte biologischer Entwicklungsmodelle siehe Golden, L.: Science, Darwin and Art History. In: ders. (Hg.), Raising the Eyebrow: John Onians and World Art Studies. An Album Amicorum in His Honour, Oxford 2001, S. 79–90.

eingetragen wurden.<sup>13</sup> Die Überlegung, daß die Bildende Kunst eine Entwicklung besäße und folglich einem inneren Evolutionsgesetz folge, führte im neunzehnten Jahrhundert zu der Überzeugung, daß die Werke in den Museen nicht nach Themen und Gehalten, sondern nach dem ihnen eigenen Entwicklungsgesetz aufzustellen seien. Der Besucher solle sich der autonomen Entwicklung der Kunst überlassen; er würde dabei eine solche tiefe Berührung erfahren, daß der Bildungseffekt größer sei als durch pädagogische Treibjagden.<sup>14</sup>

In Schinkels Berliner Museum wurde das stilistische Baummodell der Kunstgeschichte erstmals umgesetzt. Die Kunst wurde nicht nach dem Grad ihres Belehrungspotentials, sondern nach der inneren Organisation der Epochen aufgestellt: Gotik, Renaissance, Barock, Klassizismus. Diese Wortfindungen hatten sich schon zuvor auch für die Allgemeingeschichte durchgesetzt.<sup>15</sup>

In mehr oder minder abstrakter Form haben Diagrammbäume die Entwicklung zu schematisieren und das große Makromodell zu visualisieren versucht.<sup>16</sup> Kaum ein Modell der Moderne war so erfolgreich wie die Annahme, daß sich Kunststile aus Kunststilen entwickeln. Um diese Evolutionspracht nachvollziehbar zu machen, werden Museen nach den formalen Kriterien dieser Entwicklung bestückt. In diesem Sinn wird das Flaggschiff des Faches, das „Allgemeine Künstlerlexikon“, etwa 550.000 Künstler seit der Nachantike verzeichnen. Die Gesamtzahl der erfaßten Werke dürfte sich auf etwa 30 bis 40 Millionen belaufen.<sup>17</sup>

### 2.3 Kunstgeschichte und Biologie

Mit angeführter Größenordnung wird eine Dimension erreicht, die in die Nähe der vermuteten Menge natürlicher Spezies gelangt. Dieser Zufall bestärkt die methodologische Bindung von Kunstgeschichte und Biologie. Nur wenige Fächer sind sich in ihren me-

---

<sup>13</sup> Vgl. Baldinucci, F.: Notizie de' Professori del Disegno da Cimabue in Qua, Florenz 1681, nach: Goldberg, E. L.: After Vasari. History, Art, and Patronage in Late Medici Florence, Princeton 1988, S. 33.

<sup>14</sup> Vgl. Wyss, B.: Trauer der Vollendung: zur Geburt der Kulturkritik, Köln 1997, S. 147ff.

<sup>15</sup> Vgl. Bredekamp, H.: Metaphern des Endes im Zeitalter des Bildes. In: Klotz, H., Kunst der Gegenwart. Museum für Neue Kunst. ZKM/Zentrum für Kunst und Medientechnologie Karlsruhe, München, New York 1997, S. 32–37.

<sup>16</sup> Vgl. Schmidt-Burkhardt, A.: Shaping modernism: Alfred Barr's genealogy of art. In: Word & Image, 16 (2000) 4, S. 387–400; dies.: Stammbäume der Kunst. Zur Genealogie der Avantgarde, Berlin 2005.

<sup>17</sup> K. G. Sauer Verlag (Hg.): Allgemeines Künstlerlexikon. Die bildenden Künstler aller Zeiten und Völker, (begründet und mitherausgegeben von Günter Meissner), Bd. 1, Leipzig 1983.

thodischen Prämissen so nah wie diese beiden Disziplinen.<sup>18</sup> Die Biologie hatte von Beginn an mit Problemen der morphologischen Bestimmung von plastischen Formen zu tun, die von der Kunstgeschichte seit dem sechzehnten Jahrhundert zur Raffinesse geführt worden war. In derselben Weise mit der Bewältigung unübersehbarer Quantitäten konfrontiert, besitzt auch die Biologie das vom Einfachen zum Komplexen fortschreitende Schema. Auch sie hat sich schließlich – wie etwa durch Ernst Haeckel – des Baumes als dem Makromodell der Evolution der Natur bedient.<sup>19</sup> Beide, Kunstgeschichte wie Biologie, haben mit ihren Evolutionsmodellen eine Erfolgsgeschichte sondergleichen durchlebt, die in den Kunst- und Naturkundemuseen ihren Ausweis und ihr Symbol erhalten haben.

Genau aber an diesem Punkt haben sich die Fächer auch wieder getrennt. Die Baumvorstellung wurde in der Kunstgeschichte als romantische Zwangsvorstellung persifliert, seitdem Wilhelm Pinder, Mitglied dieser Akademie, verächtlich vom „Gänsemarsch der Stile“ sprach, um das Konzept der „Gleichzeitigkeit des Ungleichzeitigen“ als Alternative vorzuschlagen.<sup>20</sup> Nach 1970 trat eine fast panische Angst vor falsch verstandenen darwinistischen Biologismen hinzu. Das vom Einfachen zum Komplexen gehende Muster wurde umgekehrt oder gleichsam verstrudelt; und es wurde eingewandt, daß die stilkritische Autonomie der Kunst, wie sie das Baummotiv als Symbol einer autopoietischen Evolution der Kunst darstelle, alle sozialen Schichtungen und alle Funktionsdifferenzen verhülle, die sich in derselben Zeit in unterschiedlichen Stilen geäußert hätten. Heute ist das stilkritische Baummodell kaum mehr in Kraft, weil die methodologische Kritik der letzten dreißig Jahre seine Berechtigung weitgehend zerstörte.<sup>21</sup> Eine radikale Modellkritik hat das Erfolgsmodell beseitigt.

Die Nachteile des Baummodells sind in der Biologie nicht weniger evident. Es bindet disparate Gesichtspunkte der Arten und läßt keine wechselnden Bewertungskriterien zu. Es verschleiert den Umstand, daß zumindest in der Frühphase von einzelnen Arten nicht gesprochen werden kann, weil sie ihre Gene vermischt haben. Im Ursprung also kann es keine Modellbäume, sondern allenfalls Modellbüsche gegeben haben; zudem ist der Baum vor allem aus dem Grund ein absurdes Modell, weil er in Diagrammen wurzellos

---

<sup>18</sup> Vgl. Fernie, E.: *Art history from Henri Focillon to Stephen Jay Gould*. In: *Golden: An Album Amicorum in His Honour* (Anm. 12), Oxford 2001, S. 79–90.

<sup>19</sup> Siehe Haeckel, E.: *Generelle Morphologie der Organismen. Allgemeine Grundzüge der organischen Formen-Wissenschaft*, Berlin 1866, II, S. 397–399; Tafeln I–VIII.

<sup>20</sup> Pinder, W.: *Das Problem der Generationen in der Kunstgeschichte Europas*, Berlin 1926, S. 1–12.

<sup>21</sup> Vgl. Suckale, R.: *Die Unbrauchbarkeit der gängigen Stilbegriffe und Entwicklungsvorstellungen*. In: Schmidt, P. & G. Wedekind, *Stil und Funktion. Ausgewählte Schriften zur Kunst des Mittelalters*, Berlin 2003, S. 287–302.

immer erst mit seinem Stamm beginnen kann. Stephen Jay Gould hat sich entschieden gegen das Baummodell gewandt,<sup>22</sup> und kaum ein ernstzunehmender Biologe würde heute den Baum als Modell der Natur festschreiben wollen. Dennoch aber wird er weiterhin ungerührt als Bild der gesamten Natur tradiert, wie es die Zeitschrift *Science* kürzlich mit einem Heft zum „Tree of Life“ vorführte.<sup>23</sup> Von Biologen ist als Erklärung zu hören, daß Zeitschriften wie *Science* und *Nature* eher exoterische Aushängeschilder geworden seien, die mit der harten gleichsam bildlosen Forschung wenig gemein hätten.

Daraus aber resultiert ein Disjunktionsprinzip. Wie erwähnt, wird es keine zwei Fächer geben, die sich in den Methoden ihrer morphologischen Feinbestimmungen und Systematik so ähneln wie Kunstgeschichte und Biologie. Beide haben mit Stoffmengen zu tun, die das Fassungsvermögen des Gedächtnisses bei weitem übersteigen. Sie sind mit denselben Evolutionsmodellen groß geworden. Beide haben jedoch auch die Selbstkritik an ihren Erfolgsmodellen exzessiv betrieben.

Hier aber enden die Gemeinsamkeiten. Die Kunstgeschichte leistet sich den Luxus, das Baummodell kraft einer übermächtigen Kritik zu verabschieden, und sei es um den Preis, daß es mit ihm einen Teil seiner Berechtigung verliert. Die Selbstkritik geht bis an die Grenze seiner Existenz. In der Biologie dagegen ist das Baummodell in der Abwägung zwischen Nirwana und Gewohnheit zumindest exoterisch bewahrt worden. Ob sich hierin grundsätzliche Unterschiede offenbaren oder nur der differente Umgang mit der Pragmatik zeigt, sind Fragen, die sich wechselseitig aufdrängen.

In jedem Fall hoffe ich deutlich gemacht zu haben, daß Modelle nicht nur unerläßliche Hilfsmittel einer Verkleinerung sind, die den Denkraum zu öffnen vermögen, sondern auch Quellen einer subtilen Steuerung, die den Problemhorizont verlagern oder verengen können. In ihren Stärken und Schwächen gehören sie weder den Geistes- noch den Naturwissenschaften allein. Das Modell eines reflektierten Austausches von Geistes- und Naturwissenschaften sind die Modelle selbst.

---

<sup>22</sup> Vgl. Gould, S. J.: A Tale of three pictures. In: ders., *Eight little Piggies. Reflections in Natural History*, London 1993, S. 427–438.

<sup>23</sup> Siehe Pennisi, E.: Modernizing the Tree of Life. In: *Science*, 300 (2003) 5626, S. 1692–1697.

Martin Quack

## Modelle in der Chemie<sup>\*</sup>

„Wissenschaft wird aus Tatsachen aufgebaut, genauso wie ein Haus aus Steinen aufgebaut werden kann. Aber eine Anhäufung von Tatsachen ist genauso wenig Wissenschaft wie ein Haufen von Steinen ein Haus ist.“<sup>1</sup>

### 1 Allgemeines und Definitionen

Ziel des Vortrages ist es, den Begriff des Modells und die Verwendung von Modellen in den Naturwissenschaften, insbesondere mit Beispielen aus der Chemie, auch im Grenzbe-  
reich zur Physik, zu erläutern. Hierzu will ich einleitend versuchen, die Verwendung des  
Wortes und Begriffes einzugrenzen und in Beziehung zu anderen Begriffen zu setzen  
(Einleitung, Kap. 1). Sodann werde ich beispielhaft die Entwicklung besonders wichtiger  
Modelle der Chemie erläutern, Atommodelle (Kap. 2), Molekülmodelle (Kap. 3), Mo-  
delle der chemischen Bindung (Kap. 4) und Modelle von Prozessen in der Chemie  
(Kap. 5). Anschließend werde ich die Grenzen solcher Modelle in der Chemie anhand  
von neueren Entwicklungen aufzeigen (Kap. 6).

Die Ambivalenz der Verwendung von Wörtern ist allgegenwärtig, und im Zusammen-  
hang mit dem Modellbegriff fällt mir ein Scherz eines berühmten Zürcher Stereochemikers,  
des Nobelpreisträgers Vladimir Prelog, ein, der in seinem etwa 1979 in Göttingen ge-  
haltenen Vortrag sagte: „Ich spiele gerne mit Modellen, wobei das gefährlich sein kann,  
wenn man nur an die Affairen um Profumo denkt, der zu gerne mit (Photo-)Modellen  
spielte ...“.

---

<sup>\*</sup> Zusammenfassung des Vortrages in der Sitzung der Mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse  
der BBAW am 20. Februar 2003

<sup>1</sup> Frei übersetzt nach Henri Poincaré: *La Science et l'Hypothèse*, nach der englischen Ausgabe  
*Science and Hypothesis*, Dover Publ. 1952: „On fait de la science avec des faits comme on  
fait une maison avec des pierres/mais une accumulation de faits n'est pas plus une science  
qu'un tas de pierres est une maison“.

Es ist offenbar zunächst nötig, die Verwendung des Modellbegriffes einzugrenzen. In der Chemie (wie auch allgemein in den Naturwissenschaften) ist das „Modell“ eines von mehreren Instrumenten des menschlichen Geistes zur Abbildung der Wirklichkeit, wobei die Existenz einer solchen vom menschlichen Geist unabhängigen äußeren Realität in der Regel zunächst einmal vorausgesetzt wird (von dieser Regel gibt es Ausnahmen, über die ich hier nicht sprechen will). Von der Wortgeschichte her hat sich der Begriff „Modell“ als Vorstellung einer Abbildung aus dem Lateinischen (modulus = Mass, Maßstab) über mittelalterliches Vulgärlatein (modellus) entwickelt und bis in das Italienische der Renaissance (modello = Muster, Abbild, Vorbild) erhalten. Hierbei ist meist impliziert, daß die Abbildung nicht 1:1, sondern in der Regel verkleinert oder vereinfacht ist. Auch ist das Verhältnis zwischen Modell und Realität zweiseitig: Das Modell kann nachträglich als Abbild einer vorher bestehenden Realität geschaffen werden oder aber eine Realität (z. B. ein Gebäude) kann nach einem vorher entworfenen Modell (im Geiste, auf dem Papier, im Atelier, im Labor) später „erstellt“ werden. Diese Zweiseitigkeit ist auch in der Chemie sehr geläufig, je nachdem, ob der Chemiker zum Beispiel analytisch einen in der Natur bestehenden Stoff als Modell „nachbaut“ oder ein Molekül nach einem in seinem Geiste (oder auf dem Papier) entworfenen Modell als „Molekülarchitekt“ neu aufbaut.

Da Modelle auch Teil der realen Welt sind, geht es eigentlich bei ihrer Verwendung darum, eine Beziehung zwischen verschiedenen Objekten der Realität herzustellen und hiermit die Realität zu verstehen (oder auch zu verändern).

Was bisher über „Modelle in der Chemie“ gesagt wurde, gilt auch für andere Instrumente des menschlichen Geistes zur Abbildung der Realität, gegen welche wir nun den Modellbegriff abgrenzen müssen.

### 1.1 Theorie

Unter einer Theorie (griechisch θεωρία = Schau, Erkenntnis) verstehen wir im allgemeinen eine exakte, treue Abbildung der Realität. Eine „richtige“ Theorie erhebt den Anspruch, bei voller Erkenntnis alles ganz richtig abzubilden, exakte Vorhersagen von zukünftigen Beobachtungen zu treffen sowie Rückblicke auf vergangene Beobachtungen in der Realität vorzunehmen. Sie ist der Versuch, „alles richtig zu machen“. Eine Theorie ist gemessen an ihrem Anspruch entweder richtig oder falsch („falsifizierbar“). In Wahrheit sind, mit Distanz betrachtet, allerdings alle Theorien falsch – immerhin wollen sie aber richtig sein. Insofern gibt es einen fließenden Übergang zu den beiden anderen zu diskutierenden Begriffen. In der Chemie kann man sagen, daß die Quantentheorie den Anspruch erheben kann, eine Theorie der Struktur und der Dynamik von Atomen und Molekülen (Kap. 2 und 3) sowie eine Theorie der Chemischen Bindung zu sein (Kap. 4, auch 6).

## 1.2 Hypothese

Eine Hypothese ist eine Theorie im Entstehen. Sie ist eine vorläufige Abbildung der Realität und insoweit vermutete Grundlage einer zukünftigen Theorie. Wörtlich übersetzt ist sie eine „Unterstellung“, wie die Realität aussehen könnte. Im Gegensatz zur Theorie muß sie den betrachteten Bereich der Natur nicht „vollständig“ beschreiben, sie kann ergänzt werden. Sie ist eine vorläufige Theorie. Eine Hypothese ist aber ansonsten einer Theorie recht ähnlich und ebenfalls falsifizierbar.

## 1.3 Modell

Das Modell erhebt in aller Regel nicht den Anspruch einer vollständig richtigen Abbildung der Realität. Vielmehr sollen gewisse „wesentliche“ Aspekte gut getroffen sein, „unwesentliche“ Teile der Realität dürfen falsch beschrieben oder ganz ausgelassen sein. Ein Modell ist eine nützliche, hilfreiche Abbildung der Wirklichkeit, nicht unbedingt eine exakte, treue Abbildung. Ein gutes Modell ist meist ein vereinfachtes Bild der Realität. Es kann in Beziehung zur Hypothese und Theorie in zwei unterschiedlichen Weisen verwendet werden: Erstens, in der Phase der Erkenntnis, in der wir noch keine genaue Kenntnis über und keine Theorie der Phänomene haben. Hier hilft das Modell geeignete Hypothesen zu bilden und Theorien zu entwerfen, der Weg ist also

beobachtete Tatsachen → Modell → Hypothese → Theorie

Zweitens, zu dem Zeitpunkt, da uns eine „vollständige Theorie“ der betrachteten Phänomene vorliegt; das Modell dient nunmehr der Vereinfachung, der Weg ist

Theorie → Modell

Das Modell ist ein vereinfachtes Bild der Theorie, die selbst den Anspruch erhebt, ein exaktes Bild der Realität zu sein. Sein Nutzen liegt darin begründet, daß oft die exakte Theorie gar nicht umsetzbar („realisierbar“) ist. So ist eine vollständige quantentheoretische Berechnung eines Proteins heute noch völlig illusorisch, wogegen einfache Modelle des Proteins leicht gebaut oder mit Computern graphisch abgebildet werden können. Selbst wenn eine vollständige Theorie mathematisch-numerisch realisierbar wäre, könnte ein vereinfachtes „Modell“ dem besseren Verständnis dienen, da unser Geist eher in der Lage ist, ein Modell zu „begreifen“, das hilft, Wesentliches von Unwesentlichem zu trennen. Ein Modell ist weder „richtig“ noch „falsch“. Es ist nicht falsifizierbar. Es erweist sich allenfalls als nützlich oder nutzlos, vielleicht als irreführend. Allerdings existiert auch die Auffassung, daß dieselbe Aussage auch für Theorien gilt – eine Betrachtungsweise also,

nach der die Übergänge zwischen den Begriffen fließend werden. Von Louis Pasteur gibt es eine hierzu passende Aussage: „Ce qui fait le mérite d’une théorie nouvelle ce n’est pas d’être vraie : il n’y a pas de théories vraies ; c’est d’être féconde“.<sup>2</sup> Damit wird der Wahrheitsanspruch von Theorien relativiert, die in ihrer Bedeutung eher als den Modellen ähnlich angesehen werden.

Unabhängig davon haben wir nun eine ungefähre Abgrenzung der drei Grundbegriffe physikalisch-chemischer Erkenntnis erreicht, etwa so, wie wir den Pazifik vom Atlantik abgrenzen können, auch wenn die Übergänge fließend sind.

In den folgenden Kapiteln soll die Verwendung von Modellen in der Chemie in ihrer historischen Perspektive anhand von Beispielen kurz erläutert werden.

## 2 Atommodelle in der Chemie

Daß die Materie aus Atomen aufgebaut ist, ist eine Modellvorstellung, die zur Hypothese und Theorie wurde. Die ursprünglichen Atommodelle der Chemie gehen auf das Atom ( $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$ ) des Demokrit und Leukipp zurück (ca. 400 v. Chr.). Atom- und Molekülbegriff wurden ursprünglich nicht scharf unterschieden. Die geringe Größe der Atome und die große Zahl in makroskopischen Proben gaben jedoch Anlaß zu Untersuchungen. Schon relativ früh (1646) hat der Mönch Johann Chrysostomus Magnenus auf der Grundlage des Demokritischen Atommodells die Zahl der „Atome“ (oder Moleküle) in einem Weihrauchkorn aus einem prinzipiell akzeptablen Geruchsexperiment ungefähr richtig abgeschätzt.<sup>3</sup> Diese Tatsache ist wenig bekannt. Auch über die geometrischen Formen von Atomen hat schon Demokrit mit Hilfe indirekter Beobachtungen Schlüsse gezogen. Seit etwa 1800 wurde eine Symbolik entwickelt, die zunächst geometrisch-graphisch war (Dreiecke, Kreise etc., Pierre Auguste Adet, Jean Henri Hassenfratz, 1787, Dalton ca. 1810, „Kreise mit Inhalt“). Berzelius abstrahierte zur selben Zeit von diesen geometrischen Vorstellungen und führte die heute noch verwendeten Atomsymbole (Elementsymbole) ohne geometrische Vorstellung ein (H, C, N, O, S, ...). Diese Beschreibung ist immer noch Bestandteil der international akzeptierten chemischen Nomenklatur (IUPAC, International Union of Pure and Applied Chemistry). Das moderne Atommodell mit Atom-

---

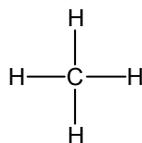
<sup>2</sup> Louis Pasteur, zitiert in: Quack, M.: Vorlesungsskript Allgemeine Chemie (Teil Physikalische Chemie, Kap. 1 Thermodynamik), Zürich 1994.

<sup>3</sup> Vgl. Johann Chrysostomus Magnenus: Democritus reviviscens, zitiert in: Stückelberger, A.: Antike Atomphysik, München: Heimeran-Verlag 1979, sowie Quack: Allgemeine Chemie (Anm. 2), Kap. 2.

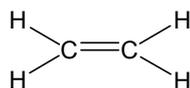
kernen und Elektronen geht auf Rutherford und Bohr (1913) zurück und führt schließlich zur Quantentheorie der Atome. Das Atommodell wurde in der Chemie eingeführt und nutzbringend verwendet, lange bevor es wirklich experimentell einwandfreie „Beweise“ für die Existenz von Atomen gab (die „Beweisführung“ erfolgte nach ca. 1850 bis 1910).

### 3 Molekülmodelle

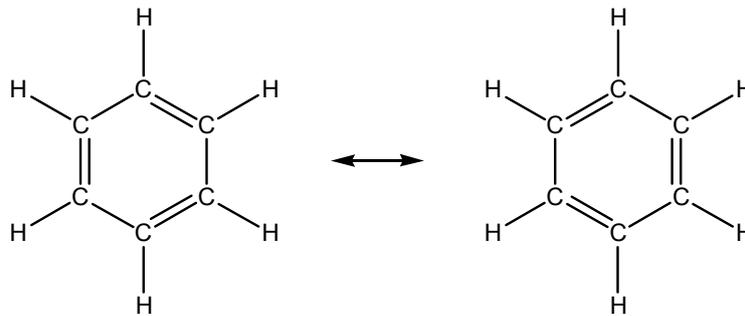
Auch der Aufbau der Materie aus Molekülen, die selbst wiederum aus Atomen zusammengesetzt sind, ist eine Modellvorstellung, die nach 1800 zu einer quantitativen Hypothese und Theorie wurde (Avogadro'sche Molekülhypothese). Für die Geschichte unserer Akademie ist vielleicht von Interesse, daß Avogadro seine Molekülhypothese (gleiche Volumina idealer Gase enthalten bei gleichem Druck und gleicher Temperatur die gleiche Anzahl von Molekülen) auf der Grundlage einer Analyse von Experimenten von Gay-Lussac aufbaute. Diese haben ihren Ursprung in der kurzen Episode einer Zusammenarbeit von Gay-Lussac und Alexander von Humboldt im Dezember 1804. Nach Avogadro kommen wir auf der Basis dieser Untersuchungen zur Knallgasreaktion  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$  zu dem Schluß, daß die Elemente Wasserstoff und Sauerstoff aus Molekülen mit jeweils zwei Atomen bestehen. Die geometrischen Molekülmodelle nach Dalton (um 1810) ähneln vielfach den noch heute verwendeten Modellvorstellungen der Chemiker. Sie wurden zunächst durch die abstraktere Symbolik nach Berzelius und Liebig (bis 1850) ersetzt (die „Bruttoformeln“ der Chemie, wie  $\text{CH}_4$ , die bis heute fester Bestandteil der chemischen Nomenklatur geblieben sind). Planare Bindungs- und Strukturmodelle wurden nach 1850 von Loschmidt, Couper, Lothar Meyer und Kekulé verwendet, was auch in der endgültigen Form bis heute in der Nomenklatur erhalten blieb, zum Beispiel für Methan,  $\text{CH}_4$ :



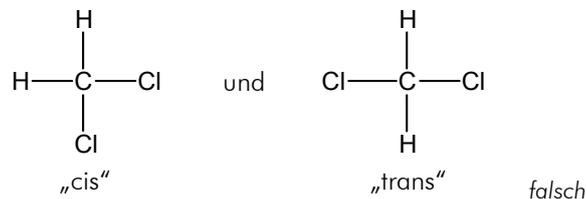
Es wurde der Begriff der Valenz und der Doppelbindung eingeführt, zum Beispiel Ethylen:



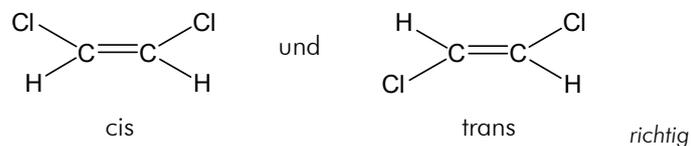
und Benzol (mit zwei „äquivalenten“ Repräsentationen nach Kekulé oder „Resonanzstrukturen“ nach Pauling):



Ein wichtiger Schritt war der Übergang zur dreidimensionalen räumlichen Modelldarstellung durch van't Hoff und Le Bel 1874. Die dreidimensionalen Modelle (Tetraeder für Methan etc.), die van't Hoff sich zur Veranschaulichung gebaut hat, sind besonders bekannt. Sie entsprechen einem Modell des „Molekülarchitekten“ und bilden bis heute die Grundlage der organischen Stereochemie. Sie erklären die Abwesenheit der scheinbaren (hypothetischen) Isomerie am Methylenechlorid  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ , die in der Ebene existieren würde,

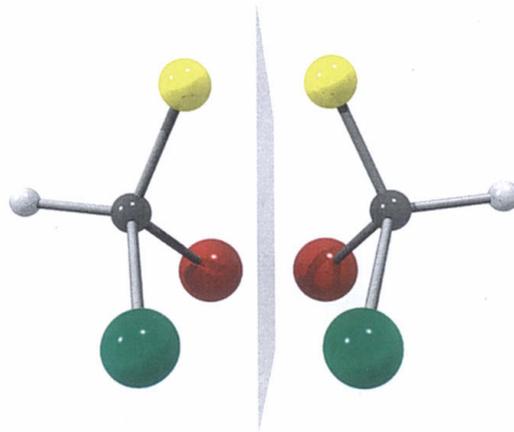


während in der tetraedrischen Gestalt beide „Isomere“ identisch sind, was dem experimentellen Befund entspricht.  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  ist nicht eben, sondern ungefähr tetraedrisch gebaut; „cis“- und „trans“-Isomere gibt es hier nicht (Isomere sind Moleküle gleicher Zusammensetzung, aber verschiedener Geometrie). Demgegenüber existiert beim Dichlorethylen ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2$ ) eine entsprechende cis-trans-Isomerie in der tatsächlich ebenen Geometrie:



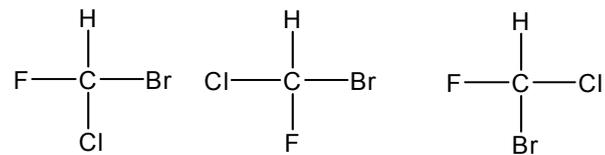
Weiterhin erklärt das räumliche tetraedrische Strukturmodell des vierbindigen Kohlenstoffatoms mit vier nach den Tetraederecken gerichteten „Einfachbindungsvalenzen“ das Phänomen der Spiegelbildisomerie im  $\text{CHFClBr}$  (Fluorchlorbrommethan). Die beiden Iso-

mere sind hier „Enantiomere“, die sich wie Bild und Spiegelbild verhalten. Sie sind wie die linke und rechte Hand geometrisch unterscheidbar, aber energetisch exakt (symmetrisch) äquivalent, wegen der Spiegelbildsymmetrie des Raumes (siehe Kap. 6). Die folgende Abbildung zeigt eine moderne Computergraphik der beiden Enantiomeren (Spiegelbildisomeren) von  $\text{CHFClBr}$ , die bunt aussieht, aber vom Konzept her gegenüber den van't Hoff'schen Modellen nichts Neues erbringt. Man kann sich mit einem tetraedrischen räumlichen Modell leicht klarmachen, daß es genau diese beiden spiegelbildlich symmetrischen Isomeren des  $\text{CHFClBr}$  gibt.



Richtige räumliche Struktur der Spiegelbildisomeren von  $\text{CHFClBr}$

Demgegenüber erwartet man bei einer hypothetischen planaren Geometrie drei Isomere, mit jeweils F, Cl, oder Br transständig zum Wasserstoff H:



Falsche planare Modelle zu Isomeren des  $\text{CHFClBr}$

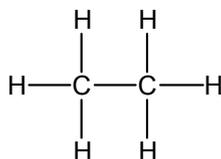
Es ist bemerkenswert, daß erst seit etwa 1950 durch Röntgenstrukturuntersuchungen von J. Bijvoet bekannt ist, welches der beiden spiegelbildähnlichen Enantiomeren, das in der belebten Natur vorkommt (z. B. die L-Aminosäure L-Alanin in den Proteinen), unserem

nachgebauten makroskopischen Modell entspricht (Frage der sogenannten „absoluten“ Konfiguration). All diese Modellvorstellungen sind auch heute noch in der modernen Stereochemie allgegenwärtig. Es gibt Modellbaukästen (z. B. die Dreiding-Modelle), mit denen makroskopische Molekülmodelle gebaut werden können. Die Entdeckung der DNS-Doppelhelixstruktur im Jahre 1953 durch Crick und Watson beruhte auf einem zu van't Hoffs Modellen völlig analogen, sehr einfachen Modellbau. In Anbetracht der ungeheuren Fruchtbarkeit dieser Modelle ist es von Interesse, daß van't Hoffs räumliche Modellvorstellungen zu seiner Zeit heftig angegriffen wurden (z. B. von Hermann Kolbe im Journal für praktische Chemie 1877). Das tat dem Ruhm van't Hoffs aber später keinen Abbruch: Er erhielt 1901 den ersten Nobelpreis für Chemie. Allerdings hat auch die hierauf gegründete moderne und weitverbreitete Art der „Legochemie“ ihre Grenzen, die seit dem Entstehen der Quantenmechanik und der Theorie der chemischen Bindung klargeworden sind. Die einfache Vorstellung, die Moleküle seien nur verkleinerte Formen unserer makroskopischen Modelle, bei denen wir die Atome mit Steckverbindungen gemäß ihren Valenzen zu Molekülen zusammensetzen können, ist aus der heutigen quantenmechanischen Sicht allerdings eher eine Karikatur als ein treues Abbild der Moleküle. Dennoch bleibt diese geometrische Modellvorstellung auch gegenwärtig in Computermodellen der Chemie weit verbreitet. Zum Beispiel wird sie zu Planungen in der pharmazeutischen Chemie eingesetzt, wenn man Wirkstoffmoleküle modellmäßig in Enzyme einpaßt – etwa so wie nach dem Konzept von Fischer ein Schlüssel in ein Schloß, oder bei „händigen“, chiralen Molekülen eine Hand in einen Handschuh paßt.

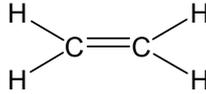
#### 4 Bindungsmodelle in der Chemie

Im 19. Jahrhundert übernahmen die Chemiker das Demokritische Bindungsmodell, nach dem sich Atome zu Molekülen mit „Haken und Ösen“ verbinden. Ein Bindungshaken zwischen zwei Atomen führt zu einer Einfachbindung, zwei Bindungshaken zwischen zwei Atomen zur Doppelbindung, drei Bindungshaken zur Dreifachbindung:

C–C Einfachbindung im Ethan



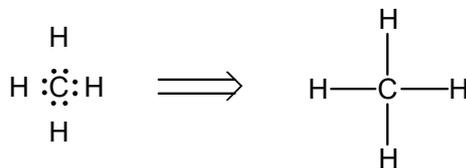
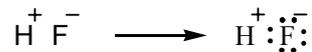
C=C Doppelbindung im Ethylen



C≡C Dreifachbindung im Acetylen



Jede Bindung wird durch einen „Valenzstrich“ dargestellt. Ein Atom hat eine feste Zahl von Valenzen (im Beispiel das Wasserstoffatom H eine, das Kohlenstoffatom C vier). Hiermit lassen sich Molekülbindungsmodelle systematisch aufbauen (sog. kovalente Bindungen). Später kam die Vorstellung des Aufbaus von Molekülen und Kristallen aus geladenen Ionen hinzu (nach Arrhenius ab 1884), wie  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$ , die durch elektrostatische Kräfte gebunden werden. Beide Vorstellungen der ionischen und der kovalenten Bindung lassen sich nach Lewis (ab 1920) mit Hilfe des Rutherford-Bohrschen Atommodells und der Oktettregel verstehen. So entspricht zum Beispiel ein Valenzstrich dann einem gemeinsamen Elektronenpaar zwischen zwei Atomen:



Jeder Punkt ein Elektron,  
jeder Bindestrich zwei  
Valenzelektronen.

Sowohl das Bindungsmodell als auch die Symbolik haben sich bis heute erhalten und sind Bestandteil der chemischen Nomenklatur.

Eine Theorie der chemischen Bindung ergibt sich aus der Quantenmechanik seit 1925. Vereinfachte „Modelltheorien“, die hierauf aufbauen, sind das Valenzbindungsmodell von Pauling und das MO-Modell von Hund und Mulliken sowie das Hückel-MO-Modell (HMO-Modell). All diese Modelle finden immer noch Anwendung. Sie führen zum Beispiel zu einer konsistenten Beschreibung der symmetrischen Bindungsverhältnisse im Benzol. Diese Modelle sind eigentlich mathematische Modelle, Vereinfachungen der zugrundeliegenden Theorie auf der Basis der Vielelektronen-Schrödingergleichung. Es gibt jedoch zahlreiche weiter vereinfachte geometrische Modelle der verwendeten „Molekülorbitale“,

die weithin in der Lehrbuchliteratur verwendet werden und weitestgehend dem heutigen Stand der Modellbildung für die chemische Bindung entsprechen. Seit etwa 1960 arbeitet auch der praktisch-experimentell-synthetisch orientierte Chemiker vorwiegend mit solchen Modellvorstellungen aus der MO-Theorie („Molekülorbitaltheorie“, eigentlich ein vereinfachtes Modell). In all diesen mathematischen Modellen, wie auch in vielen anderen Modelltheorien in Physik und Chemie, wird eine sehr komplizierte Differentialgleichung aus der „vollständigen Theorie“ durch eine stark vereinfachte „Modellgleichung“ ersetzt (oder der vollständige Hamiltonoperator durch einen „Modellhamiltonoperator“). Der Begriff des Modells wird hier auf ein mathematisches Objekt angewendet.

## 5 Modelle von Prozessen in der Chemie

Um über die Struktur hinaus chemische Prozesse und Reaktionen zu beschreiben, verwendet man zeitabhängige mathematische Modelle. Hierzu zählen die Modelle der klassischen Moleküldynamik (molecular modelling), welche die Bewegungen der Atome in Molekülen mit Kraftfeldern und klassisch-mechanischen Bewegungsgleichungen beschreibt. Ferner gehören hierzu die Differentialgleichungen der Kinetik und weiter vereinfachte kinetische Modelle, um etwa die Charakteristika von Kettenreaktionen und Explosionen zu beschreiben. Oft wird hier die Nomenklatur „Theorie“ oder „Modell“ vermischt. So spricht man von der „Theorie des Übergangszustandes“ und der „RRKM-Theorie“ (eigentlich Näherungstheorien oder eben Modelle der Reaktionskinetik), während man in einer verallgemeinerten Form solcher kinetischer „Theorien“ den bescheideneren Namen „statistisches Modell adiabatischer Reaktionskanäle“ gewählt hat. In all diesen Fällen handelt es sich aber um Modelle der Reaktionskinetik.<sup>4</sup> Die heutige Theorie chemischer Reaktionen gründet sich auf die zeitabhängige Schrödingergleichung.<sup>5</sup> Ich will hierauf nicht näher eingehen und verweise auf die zitierte Literatur (siehe Anm. 4 und 5).

---

<sup>4</sup> Vgl. Quack, M. & J. Troe: Statistical Adiabatic Channel Models. In: Schleyer, R., Allinger, N., Clark, T., Gasteiger, J., Kollman, P. A., Schaefer, H. F. III & P. R. Schreiner (Hg.), *Encyclopedia of Computational Chemistry*, Vol. 4, New York: John Wiley & Sons 1998, S. 2708–2726.

<sup>5</sup> Siehe Luckhaus, D. & M. Quack: Gas Phase Kinetics. In: Moore, J. H. & N. D. Spencer (Hg.), *Encyclopedia of Chemical Physics and Physical Chemistry*, Vol. 1 (Fundamentals), Chapter A. 3. 4, Bristol: IOP publishing 2001, S. 653–682; siehe weiter dies.: *Gas Phase Kinetics Studies*. In: Ebenda., Vol. 2 (Methods), Chapter B. 2. 5, S. 1871–1904; siehe auch Marquardt, R. & M. Quack: Energy Redistribution in Reacting Systems. In: Ebenda, Vol. 1 (Fundamentals), Chapter A. 3. 13, S. 897–936.

## 6 Grenzen der Modelle in der Chemie und Grenzen unseres heutigen Verständnisses der Chemie

So fruchtbar und weit verbreitet sie sein mögen, die einfachen Modellvorstellungen der Chemie stoßen vielerorts an Grenzen. Unser heutiges Verständnis der chemischen Bindung, der Struktur und Dynamik von Molekülen gründet sich weitgehend auf die Quantentheorie, die Lösungen der zeitabhängigen und der zeitunabhängigen Schrödingergleichung. Auch hier gibt es Grenzen. Während zum Beispiel die Superposition eines linkshändigen und eines rechtshändigen Moleküls in einem Paritätsisomer (gleichzeitig linke und rechte Hand) den geometrischen Modellvorstellungen des Chemikers prinzipiell widerspricht, aber bei einfachen Molekülen wie  $\text{H}_2\text{O}_2$  (Wasserstoffperoxid) unseren spektroskopischen Experimenten entspricht, ist es bis heute unbekannt, ob wir eine solche Annahme auch für Makromoleküle (DNS; Proteine) machen dürfen.<sup>6</sup> Die Superpositionsform eines linkshändigen und rechtshändigen makroskopischen Objektes oder auch nur eines größeren stabilen chiralen Moleküls ist bis heute noch nicht beobachtet worden, was allerdings nicht ausschließt, daß sie existiert. Nach der heutigen Strukturhypothese chiraler Moleküle sollte man jedoch annehmen, daß es bei einem Molekül wie  $\text{CHFClBr}$  (Fluorchlorbrommethan) prinzipiell vier Isomere gibt, von denen zwei die beiden Enantiomere bilden, die wir als Bild und Spiegelbild in Kapitel 3 besprochen haben.

Komplementär dazu existieren die beiden „Paritätsisomere“ mit positiver und negativer Parität, die eine Aussage über die Symmetrie der molekularen Wellenfunktion enthält.<sup>7</sup> Diese Paritätsisomere sind räumlich nicht lokalisierte Strukturen und entziehen sich der gewöhnlichen geometrischen Anschauung. Sie lassen sich aber durch ein einfaches mathematisches Modell beschreiben. Stellt man nämlich den quantenmechanischen Grundzustand der „linken“ Struktur im Bild zu  $\text{CHFClBr}$  durch eine Wellenfunktion  $\varphi_L$  (oder einen Zustandsvektor  $|\varphi_L\rangle$ ) dar und den rechten, enantiomeren Zustand durch  $\varphi_R$ , so erhält man die Paritätsisomere als Superposition:

---

<sup>6</sup> Vgl. Quack, M.: Molecular femtosecond quantum dynamics between less than yoctoseconds and more than days: Experiment and theory. In: Manz, J. & L. Woeste (Hg.), *Femtosecond Chemistry, chapter 27* (Proc. Berlin Conf. Femtosecond Chemistry), Weinheim: Verlag Chemie 1994, S. 781–818.

<sup>7</sup> Vgl. ebenda.

$$\begin{array}{ll} \pi\text{-Isomer} & \chi_+ = \frac{1}{\sqrt{2}}(\varphi_L + \varphi_R) \\ \mu\text{-Isomer} & -\chi_- = \frac{1}{\sqrt{2}}(\varphi_L - \varphi_R) \end{array}$$

Es gibt also nicht nur die beiden Isomere  $L$  und  $R$ , die im Bild als räumliche Modelle dargestellt sind (nach der chemischen Nomenklatur würde man heute  $R$  und  $S$  oder  $D$  und  $L$  schreiben), sondern auch die „unanschaulichen“ Isomere  $\pi$  (positive Parität) und  $\mu$  (negative Parität), die keiner räumlich lokalisierten Geometrie entsprechen, die sich aber durch ihre hochaufgelösten Spektren prinzipiell von den  $R$ - und  $L$ -Isomeren unterscheiden lassen. Strenggenommen muß man allerdings sagen, daß die experimentelle Erzeugung dieser Isomere für stabile chirale Moleküle wie  $\text{CHFClBr}$  bis heute nicht gelungen ist; man müßte also von hypothetischen Isomeren sprechen. Experimentelle Ansätze zur Erzeugung der ungewöhnlichen  $\pi$ - und  $\mu$ -Isomere existieren aber<sup>8</sup> und führen zu prinzipiellen, neuen Aussagen zur Struktur und Dynamik von chiralen Molekülen.<sup>9</sup>

Wir kommen hier in einen Bereich, in dem sich die intuitiven Modellvorstellungen eines typischen Quantenphysikers und eines typischen Strukturchemikers prinzipiell unterscheiden. Die grundsätzliche Frage wurde schon von Schrödinger am Beispiel seines bekannten „Katzenexperimentes“ aufgeworfen (mit einer hypothetischen Katze, deren Zustand einer Superposition der Zustände „lebendige Katze“ und „tote Katze“ entspricht), wobei dieses Experiment nicht sinnvoll realisierbar ist, während analoge Experimente im Bereich der Molekülphysik realisierbar wären und zum Teil auch realisiert wurden (z. B. am  $\text{C}_{60}$ , schon fast ein Makromolekül<sup>10</sup>). Es bleibt bis heute unbekannt, wo die Grenze des Übergangs zur klassischen Strukturbildung liegt, ob es eine solche Grenze überhaupt gibt und falls ja, wie sie zustande kommt.

Ein weiteres Beispiel für die Grenzen der Modellvorstellung in der Stereochemie ist die seit van't Hoff vermutete Äquivalenz von linkshändigen und rechtshändigen Enantiomeren (Spiegelbildisomeren). Wir wissen heute aus dem „Standardmodell“ der elektroschwachen Wechselwirkung in der Hochenergiephysik, daß diese Äquivalenz nicht existiert.<sup>11</sup> Aller-

<sup>8</sup> Vgl. Quack, M.: On the measurement of the parity violating energy difference between enantiomers. In: Chem. Phys. Lett. 132 (1986), S. 147–153.

<sup>9</sup> Vgl. ders.: Struktur und Dynamik chiraler Moleküle. In: Angewandte Chemie 101 (1989), S. 588–604, Angewandte Chemie (Intl. Ed.) 28 (1989), S. 571–586.

<sup>10</sup> Vgl. hierzu Zeilinger, A.: Einsteins Schleier. München: Verlag C. H. Beck 2003.

<sup>11</sup> Vgl. Quack, M.: Intramolekulare Dynamik: Irreversibilität, Zeitumkehrsymmetrie und eine absolute Moleküluhr. In: Nova Acta Leopoldina 81, N. F. 314 (1999), S. 137–173; vgl. weiter

dings stoßen wir hier an eine Grenze und gelangen in einen Bereich, in dem eine neue Modellvorstellung in der Chemie (z. B. die vermutete Nichtäquivalenz von Molekülen und ihrer Enantiomere aus Antimaterie) zu einer neuen Hypothese zur Struktur der Materie und der Zeit führt.<sup>12</sup>

Unser Überblick über Modelle in der Chemie zeigt uns die Fruchtbarkeit der Modellbildungen, die von den frühen Atommodellen der Griechen Demokrit und Leukipp zu heute noch teils spekulativen Vorstellungen an der Grenze der modernen Erkenntnisse zur Molekülstruktur und Dynamik führen.

---

ders.: How Important is Parity Violation for Molecular and Biomolecular Chirality? In: *Angewandte Chemie* 114 (2002), S. 4812–4825; auch *Angew. Chem.* 41 (2002), S. 4618–4630.

<sup>12</sup> Vgl. ders.: On the measurement of CP-violating energy differences in matter-antimatter enantiomers. In: *Chem. Phys. Lett.* 231 (1994), S. 421–428; siehe ders.: Von den „unmessbar schnellen“ chemischen Reaktionen zur Bestimmung ultrakurzer Zeiten für chemische Primärprozesse. In: *Akademie-Journal der Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Themenschwerpunkt Chemie)* 1 (2003), S. 38–44; siehe ders.: Molecular spectra, reaction dynamics, symmetries and life (Paracelsus Prize lecture). In: *Chimia* 57 (2003), S. 147–160.

Jürgen Ehlers

## Modelle in der Physik

Was immer die „Realität“ sein mag,  
man muß erklären können, wie man  
die Welt wahrnimmt (Roger Penrose).

### Allgemeine Vorbemerkungen

Nach meinem Verständnis sollte es bei dem interdisziplinären Gespräch um die Frage gehen, wie in verschiedenen Wissensgebieten Kenntnisse erworben werden, insbesondere wie über die Richtigkeit (Wahrheit?) von Aussagen entschieden wird. Der Modellbegriff, so war die Meinung, eigne sich zum Einstieg in ein solches Gespräch.

Aus meiner Sicht (des theoretischen Physikers) ist das Ziel der Physik, zumindest in der Grundlagenforschung, die Aufstellung möglichst umfassender *Theorien* für durch Beobachtung und *Messung* erfaßbare Naturdinge und -vorgänge. *Modelle* sind Hilfsmittel, um zu Theorien zu gelangen oder Theorien vereinfacht, oft anschaulich, darzustellen. Aus dieser Sicht erscheint mir der Theoriebegriff primär, der Modellbegriff sekundär.

In der Physik dienen Modelle dazu, die Vielfalt und Komplexität realer Sachverhalte durch Beschränkung auf eine übersehbare Menge ausgewählter, meist durch Messungen quantifizierbarer Merkmale zu reduzieren und dadurch rational analysierbar zu machen. Mit den ausgewählten Merkmalen bzw. *Begriffen* werden über die Sachverhalte Sätze formuliert, über deren Zutreffen objektiv, also personenunabhängig, entschieden werden kann und die experimentell überprüfbar sind.

Man spricht von Theorien, wenn die Aussagen ein widerspruchsfreies, logisch-mathematisches System bilden, das aufgrund einer Interpretation viele durch Beobachtungen bzw. Messungen überprüfbare Folgerungen enthält. Eine Theorie wird *adäquat* (richtig, brauchbar oder wahr) genannt, wenn sich die tatsächlich experimentell geprüften Folgerungen als richtig erwiesen haben (Richterfunktion). Experimentell bestätigte, als allgemeingültig erachtete Aussagen über wahrnehmbare oder durch Messungen ermittelbare Vorgänge werden *Naturgesetze* genannt.

In der Physik entstehen Modelle aus anschaulichen Vorstellungen, werden dann durch mathematische Formeln ergänzt und oft schließlich durch mathematische Strukturen ersetzt.

Jede modellfundierte Aussage ist durch die vorgenommene Reduktion auf die ausgewählten Merkmale in ihrer Repräsentation konkreter Sachverhalte eingeschränkt. Dadurch werden insbesondere quantitative Aussagen widerlegbar und führen zur Aufstellung neuer Modelle. Dementsprechend weist die Geschichte der Physik Folgen von einander ablösenden Theorien bzw. Modellen auf, wobei mehr oder weniger vollständig einsehbar ist, daß die späteren Theorien ihre Vorgänger als in einem (von der späteren Theorie aus beurteilt) eingeschränkten Bereich als Näherungen enthalten.

Bisher haben sich Theorien durchweg als verbesserungsbedürftig und -fähig erwiesen. Dennoch gibt es einige Theorien, die in einem jeweils großen, wenn auch begrenzten, Erfahrungsbereich mit angebbarer, oft hoher Genauigkeit als endgültig richtig angesehen werden können. In solchen *abgeschlossenen Theorien* kann man die Produkte der Physik sehen.

### *Atommodelle*

1. Die Bedeutung von Modellen für die physikalische Grundlagenforschung kann beispielhaft an der Geschichte der Atomphysik im ersten Viertel des 20. Jahrhunderts dargestellt werden. Schon vor 1900 hatte sich in der Chemie und in der kinetischen Gastheorie vielfältig die Annahme bewährt, die Materie bestände aus kleinsten Einheiten, den Atomen (von Molekülen werde ich der Einfachheit halber absehen). Wenn sie zuträfe, müßten unter anderem die im Periodensystem zutage tretenden Unterschiede und Ähnlichkeiten chemischer Elemente sowie die von den Elementen im Gaszustand ausgestrahlten, sie kennzeichnenden Farben (Spektren) auf den Eigenschaften ihrer Atome beruhen. Das Ziel der hier zu skizzierenden Forschungen war, Atommodelle zu entwerfen, die entsprechende Erklärungen ermöglichen.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Hier zeigt sich bereits ein prinzipieller Unterschied zur Modellbildung in der Architektur. Dort dient das Modell, jedenfalls ursprünglich, als Vorbild für ein von Menschen zu errichtendes Gebäude; hier geht es um die Erfindung eines Gedankendinges, aus dessen mit angenommenen Naturgesetzen erschlossenen Eigenschaften sich zum Beispiel Wellenlängen berechnen lassen, die andererseits im Laboratorium an wirklichen Gasen gemessen wurden oder für künftige Messungen vorhergesagt werden können.

An *Erfahrungstatsachen* standen schon um 1860 Spektren zur Verfügung, deren Wellenlängen mit relativen Genauigkeiten von einem hundertstel Prozent gemessen worden waren. Das Handbuch der Spektroskopie von 1910 enthält auf 5.000 Seiten eine riesige Datenmenge. Dazu kamen ab 1906 Streuexperimente (siehe unten). Dieses Material galt es zu deuten, wofür um 1900 als *Theorien* die klassische Newtonsche Mechanik und die Maxwell-Lorentzsche Elektrodynamik zur Verfügung standen.

2. Im Jahre 1885 entdeckte *Johann Jakob Balmer*, daß 13 gemessene Wellenlängen  $\lambda$  des atomaren Wasserstoffs sich durch die Formel

$$\lambda^{-1} = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (1)$$

mit  $n = 2$  und  $m = 3, \dots, 16$  darstellen lassen. Er fand für die Konstante  $R$  den Wert

$$R = 109721 \text{ cm}^{-1}. \quad (2)$$

(Dank der Verbesserung experimenteller Verfahren wurde hundert Jahre später, 1985, bereits

$$R = 109737,315211(11) \text{ cm}^{-1} \quad (2')$$

angegeben.) Balmer vermutete sofort, daß seine Formel für „alle“ Paare natürlicher Zahlen mit  $n < m$  richtige Wellenlängen ergäbe; Spektrallinien für mindestens  $n = 1, 2, 3, 4$  und hunderte von  $m$ -Werten sind gefunden worden.

Balmers Formel gab den Physikern ein Rätsel auf. Schwingende Saiten und ähnliche mechanische Gebilde erzeugen Grund- und Oberschwingungen, wobei im einfachsten Fall  $\lambda = \frac{2l}{n}$  gilt ( $l = \text{const.}, n = 1, 2, \dots$ ). Wie muß ein Gebilde beschaffen sein, um ein

Balmerspektrum hervorzubringen?

3. *Joseph John Thomson* identifizierte 1899 Elektronen als im Vergleich mit Atomen viel leichtere, elektrisch geladene Teilchen und entdeckte somit als erster ein Elementarteilchen, das in allen Atomen vorhanden sein mußte, da es mittels elektrischer Kräfte aus jedweder Materie „herausgezogen“ werden konnte.

1903 übernahm er ein im selben Jahr von *Lord Kelvin (William Thomson)* vorgeschlagenes Atommodell und untersuchte bis 1906 dessen Eigenschaften. Nach Kelvin und Thomson besteht ein Atom aus einer Kugel homogen verteilter positiver elektrischer Ladung, in der sich punkartige Elektronen bewegen (Plumpudding-Modell). Danach werden die Elektronen von der positiven Ladung wie mit einer elastischen Kraft zum Zentrum gezogen und stoßen einander wechselseitig ab.

Durch Vergleich einiger Eigenschaften dieses Modells mit Messungen an verschiedenen Stoffen, zum Beispiel Streuung von Röntgenstrahlen, fand Thomson, daß die Anzahl der Elektronen ungefähr dem aus der Chemie bekannten Atomgewicht gleich, so daß die Masse eines Atoms überwiegend nicht die seiner Elektronen sein kann. Es blieb ein Rätsel, wie Atome in stabilen Zuständen existieren können; denn nach der Elektrodynamik müßten ihre Bewegungen durch Ausstrahlung gebremst werden, und stabile Konfigurationen ruhender Ladungen gibt es nicht, wie schon Earnshaw 1831 gezeigt hatte. Auch blieb die Balmerformel (1) ungeklärt. Immerhin gab es Anzeichen dafür, daß die Regelmäßigkeiten des Periodensystems mit bevorzugten Anordnungen der Elektronenbewegungen ringförmiger Bahnen zusammenhängen könnten.

*Fazit:* Das Modell erbrachte zwar keine der von ihm erwarteten Leistungen, aber es deutete Lösungsmöglichkeiten an und warf Fragen für die weitere Forschung auf.<sup>2</sup>

4. *Ernest Rutherford* und seine Mitarbeiter hatten 1908 experimentell festgestellt, daß die von radioaktiven Substanzen ausgesandten  $\alpha$ -Strahlen aus zweifach positiv geladenen Teilchen mit der Masse von Heliumatomen bestehen. Durch Beschuß von Metallfolien mit im Vergleich zu Elektronen sehr schweren  $\alpha$ -Teilchen fanden Rutherfords Mitarbeiter Geiger und Marsden 1909 heraus, daß einige der  $\alpha$ -Teilchen von der Folie reflektiert wurden. Dieser Befund war mit Thomsons Modell unvereinbar: Weder die leichten Elektronen noch die homogene positive Ladung können schwere Teilchen nahezu zurückwerfen (R.: „Es war, als ob eine gegen ein Blatt Papier gefeuerte Kanonenkugel zum Schützen zurückkehrte.“). Rutherford fand bald (1911) eine in der Folgezeit bestätigte Erklärung: Die Masse eines Atoms ist in einem gegenüber dem Atom sehr kleinen, positiv geladenen Kern enthalten, dessen Ladung von den Ladungen der ihn umgebenden Elektronen neutralisiert wird. Er leitete eine Streuformel her und zeigte damit, daß ein schwerer Kern tatsächlich ein Zurückprallen von  $\alpha$ -Teilchen bewirken kann. Ein homogener Strahl vom Querschnitt  $F$  aus Teilchen der Masse  $m$ , Ladung  $ze$  und der Geschwindigkeit  $v$  werde senkrecht gegen eine Folie gerichtet, deren Kerne die Ladung  $Ze$  tragen. Dann beträgt der Bruchteil derjenigen Teilchen, die um einen Winkel zwischen  $\theta$  und  $\theta + d\theta$  abgelenkt werden:

$$\frac{d\sigma}{F} = \left( \frac{zZe^2}{2mv^2} \right)^2 \cdot \frac{d\theta}{\sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (3)$$

---

<sup>2</sup> Hier zeigt sich ein weiterer Unterschied in der Rolle der Modelle. In der Physik geht es um die Anpassung an empirische Befunde, in der Architektur um die Konkretisierung ästhetischer Auffassungen.

Damit war nicht nur die oben erwähnte Massenfrage beantwortet, sondern auch die von Thomson gefundene Beziehung zwischen Elektronenanzahl (= Kernladungszahl) und Atomgewicht bestätigt und erklärt, da letzteres ungefähr doppelt so groß ist wie die nunmehr als Kernladungszahl identifizierte Ordnungszahl der Elemente im Periodensystem. Ungelöst blieben weiterhin das Stabilitätsproblem und die Erklärung der Spektren.

5. Die zuletzt erwähnten Probleme (Stabilität, Spektren) lassen sich mit klassischer Mechanik und Elektrodynamik nicht lösen; das war mittlerweile klar geworden. Nur durch neue Hypothesen, die die klassischen Gesetze teilweise außer Kraft setzen müßten, war hier weiterzukommen. Zu dieser Auffassung hatte sich *Niels Bohr* 1912 durchgerungen.

*Max Planck* hatte 1900 eine neue Konstante mit der Dimension eines Drehimpulses (Länge x Impuls) in die Physik eingeführt, das „Wirkungsquantum“  $h$ ; und 1905 hatte *Albert Einstein* begründet, daß sich die Energie einfarbigen Lichtes der Schwingungszahl  $\nu$  in Elementarvorgängen nur um Vielfache von  $h\nu$  ändern kann. Dies mußte sich auf die Emission von Licht auf Atome auswirken. Aber wie?

Kurz nachdem er auf Balmers Formel (1) aufmerksam gemacht worden war, gelang Bohr der erste Schritt in Richtung einer Quantentheorie des Atombaus. Seine Annahmen waren:

i) Im Wasserstoffatom läuft das Elektron strahlungslos auf solchen Kreisbahnen, für die der Drehimpuls ein (ganzzahliges) Vielfaches des Wirkungsquantums beträgt:

$$2\pi m v r = n \cdot h. \quad (4)$$

Diese Bedingung zeichnet unter allen klassisch möglichen Bewegungen die stationären Zustände mit den aus (4) (klassisch) folgenden Energien

$$E_n = -\frac{m e^4}{2 \hbar^2 n^2} \quad (5)$$

( $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ) aus.

ii) Bei einem Übergang vom  $m$ -ten in den  $n$ -ten Zustand sendet das Atom im Einklang mit dem Energiesatz ein Lichtquant der Frequenz  $\nu$  aus, also

$$h \nu = E_m - E_n. \quad (6)$$

Aus (5 und 6) ergibt sich durch elementare Umformung Balmers Formel (1) mit

$$R = \frac{m e^4}{4 \pi c \hbar^3}, \quad (7)$$

so daß der früher der Messung entnommene Wert (2) bzw. (3) nun aus bekannten Konstanten berechnet und damit „verstanden“ werden konnte (Physikalische Modelle führen zu quantitativen Folgerungen, die neue experimentelle Prüfungen erlauben, die bei Aufstellung der Theorie nicht bekannt waren.).

So erfolgreich Bohrs Modell auch ist, es widerspricht den Gesetzen der klassischen Physik. So ergab sich die Aufgabe, eine Theorie zu finden, die die Bohrschen Formeln widerspruchsfrei abzuleiten erlaubt.

6. Eine Lösung der letztgenannten Aufgabe kann hier nicht skizziert werden. Sie ging in den Jahren 1925/1926 aus grundlegenden Arbeiten von *Werner Heisenberg*, *Max Born*, *Pascual Jordan*, *Paul Dirac* und *Erwin Schrödinger* hervor.

In der Quantentheorie werden die Energien der stationären Zustände des Wasserstoffatoms nicht mehr durch Anwendung einer Mischung klassischer und quantenhafter Formeln auf ein anschauliches Modell bestimmt, sondern aus Schrödingers Eigenwertgleichung:

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta - \frac{e^2}{r} \right) \Psi = E\Psi \quad (8)$$

berechnet. An die Stelle eines Modells tritt eine mathematische Struktur.

Die Quantenmechanik ermöglicht darüber hinaus die Berechnung der Spektren von Atomen mit mehreren Elektronen, was mit den früheren Modellen unmöglich war, und erklärt ein riesiges Tatsachenmaterial, darunter auch das Periodensystem.

„Es wäre zu wünschen, daß eine Veranstaltung wie die heutige nicht nur zu einer seltenen Stunde der Erbauung gedeiht, sondern zu einer wiederkehrenden Beschäftigung mit diesen grundlegenden Fragen“ (Erhard Scheibe bei ähnlicher Gelegenheit).

### Literatur

Bohr, N.: *Collected works*, vol. 1, J. R. Nielsen (ed.), North Holland, Amsterdam 1972, vol. 2, U. Høyen (ed.), *ibid.*, 1981.

Ludwig, G.: *Die Grundstrukturen einer physikalischen Theorie*, 2. Auflage, Berlin: Springer 1990.

Pais, A.: *Inward Bound*, Oxford: Clarendon Press 1986, esp. ch. 9.

Schrödinger, E.: *Quantisierung als Eigenwertproblem*. In: *Annalen der Physik* 79 (1926), S. 361ff.

Sommerfeld, A.: *Atombau und Spektrallinien*, Braunschweig: Vieweg 1919 u. später.

Straumann, N.: *Quantenmechanik*, Berlin: Springer 2002.

Weyl, H.: *Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaften*, 5. Auflage, München: R. Oldenbourg-Verlag 1976.

Detlev Ganten

## Modellentwicklung in der Medizin

Aufgrund ihrer großen Bedeutung für die aktuelle Forschung und auch für die Art und Weise, wie über medizinische Fragen in der Öffentlichkeit diskutiert wird, möchte ich die Gene als Ausgangspunkt meiner kurzen, skizzenhaften Überlegungen zur Modellentwicklung in der Medizin nehmen.

Es gibt zwei historische Modelle, auf die die (derzeit) aktuellen Modellvorstellungen der Genetik zurückgehen. Das erste, nicht ganz unverbunden mit dem folgenden, ist von dem Physiker Max Delbrück in einer exemplarischen, epochemachenden, interdisziplinären Zusammenarbeit mit dem russischen Genetiker Timoféeff-Ressovsky entwickelt worden. Sie haben mit Experimenten, auf die hier nicht eingegangen werden kann, hergeleitet und in der berühmten Schrift „Über die Natur der Genmutation und der Genstruktur“<sup>1</sup> im Jahre 1935 dargelegt, daß es sich bei den Genen um große Moleküle handeln müsse. Erstmals prägten sie für diese biologischen Moleküle den Ausdruck „Atomverband“. Das Gen erschien ganz materiell als quantenmechanisches System, dessen Stabilität aus der Energiedifferenz resultierte, die einen Zustand vom anderen trennte. Das war damals etwas völlig Neues, da zu dieser Zeit noch die alte Mendelsche/Morgansche Genetik vertreten wurde und man Gene nur als abstraktes Medium der Vererbung sah.

Nachdem 1858 Rudolph Virchow mit seinem Diktum „Omnis cellula e cellula“ alles Leben auf der Erde als einen ununterbrochenen Strom sich teilender Zellen dargestellt hatte, war man nun zur Vorstellung gekommen, daß im Inneren der Zelle noch kleinere informationstragende Einheiten verborgen waren, die diesen Strom in Gang halten, indem sie sich replizieren. Diese Vorstellung von der Erbinformation als Atomverband wurde wenig später von einem anderen Physiker aufgegriffen. Mit dem Buch „What is Life?“ sorgte Erwin Schrödinger<sup>2</sup>, der kurz zuvor bereits mit seinem Beitrag zur Quantentheorie die Physik revolutioniert hatte, für eine neue Denkweise in der Biologie. Während viele Biologen noch von der Idee einer Lebenskraft beeinflusst waren, lokalisierte er das Ge-

---

<sup>1</sup> Timoféeff-Ressovsky, N. W., Zimmer, K. G. & M. Delbrück: Über die Natur der Genmutation und der Genstruktur. In: Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, N. F. Bd. 1, S. 189–245.

<sup>2</sup> Schrödinger, E.: What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell, Cambridge: Cambridge University Press, 1944.

heimnis des Lebens in einer „höchst geordneten Gruppe von Atomen“, die einen „Code der Vererbung“ bilden.

Schrödinger diskutiert auf hundert Seiten seines 1944 erschienenen Buches das Delbrücksche Modell des Atomverbands. Dabei zeigt er sich absolut überzeugt von dem Modell, das er als Ausgangspunkt gewählt hat: „If the Delbrück picture should fail, we would have to give up further attempts, that is the first point I wish to make.“ Es geht ihm vor allem darum, wie Gene stabil bleiben können. Er formuliert das Prinzip „Ordnung aus Ordnung“ und glaubt, daß die genetische Information in so etwas wie einem „aperiodischen Kristall“ verschlüsselt sein könnte, der sich immer wieder aufzubauen vermag. Aus der Sicht von Delbrück und Schrödinger, die letztlich auf Weismann zurückgeht, war das Gen also eine stabile materielle Einheit. Gene wurden als kleinste Einheit des Lebens betrachtet, vergleichbar den Atomen in der Physik. Mutationen schießen eine Entsprechung in Quanten zu finden. Der Genetiker H. J. Muller schrieb bereits 1921: „It is not physics alone which has its quantum theory. Biological evolution too has its quanta – these are the individual mutations.“<sup>3</sup> Es waren also nicht nur Physiker, die hier ein biologisches Modell entwickelt haben – das Modell selbst befindet sich in Analogie zu einem zentralen Modell der Physik.

Die heutige Vorstellung ist eine andere. Doch trotz der Defizite stellte der „Atomverband“ einen ungeheuren Ansporn für junge Wissenschaftler dar, so daß es nicht verwundert, daß weniger als zehn Jahre nach dem Erscheinen von „What is Life?“ jenes Modell der Struktur der DNA präsentiert wurde, das wir alle kennen und das wie eine Ikone der modernen Wissenschaften genutzt wird: die Doppelhelix, von der viele meinen, sie sei der Wirklichkeit nachgebildet. Tatsächlich war die als Illustration in *Nature* erschienene erste Darstellung dieser Doppelhelix eine Zeichnung von Odile Crick, der Frau von Francis Crick, einer Künstlerin, die die Forschung ihres Mannes sicher nicht in allen Einzelheiten verstanden, aber dennoch dieses schöne Modell entworfen hatte. Die Ästhetik der Doppelhelix war gewiß ein Schlüssel zum Erfolg des Modells, das beständig immer noch als Gen-Modell fortgeführt wird, obwohl es mit der Realität und dem heutigen wissenschaftlichen Erkenntnisstand nur noch wenig zu tun hat. Keiner von uns trägt eine solche Doppelhelix tatsächlich mit sich herum. Das ursprüngliche Modell von Watson und Crick ist weit weniger ästhetisch. Wir kennen es von einem Bild, auf dem zu sehen ist, wie beide das komplexe DNA-Molekül mit Schrauben, Zangen und Klemmen am Drahtmodell herstellen.

---

<sup>3</sup> Carlson, E. A.: An unacknowledged founding of molecular biology: H. J. Muller's contributions to gene theory, 1910–1936. In: *J. Hist. Biol.* 4 (1971), S. 149–170.

Die Nutzung des Modells in der ästhetisierten Fassung der Doppelhelix als Sinnbild mit seiner Aura der Unveränderlichkeit und der Ruhm, den Watson und Crick zu Recht ernteten, verführen uns dazu, es als Endpunkt der Modellbildung zu betrachten. Doch tatsächlich sind mit der Darstellung der Struktur längst nicht alle Fragen geklärt, insbesondere nicht jene nach der – wie Schrödinger formulierte – „an Wunder grenzenden“ Dauerhaftigkeit und Stabilität. Inzwischen wissen wir, daß das Geheimnis des Lebens (oder zumindest der DNA-Replikation) eine ganze Protein-Maschinerie zur Durchführung des Kopierprozesses und zur Vermeidung und Korrektur von Kopierfehlern und sonstigen Beschädigungen umfaßt. Der vermeintlich stabile Kristall hat sich als permanente, allerdings gut organisierte, Baustelle erwiesen. Das Bild hat sich erheblich gewandelt. Das Strukturmodell muß durch ein Prozeßmodell ergänzt werden. Solche Prozesse können heute mit Hilfe von Computern sehr anschaulich in Animationen abgebildet werden. Doch in der Biologie und in der Medizin kennen wir nicht nur Animationen, sondern auch tatsächlich lebende Modelle: Modellorganismen der hochkomplexen Art, auf die ich nun noch kurz eingehen möchte.

### *Lebende Modelle*

In der Biologie geht es um sehr komplexe Vorgänge. Ich nehme einmal ein Beispiel aus meinem eigenen Arbeitsgebiet „Bluthochdruck“. Das Bluthochdruckmodell ist deshalb für komplexe genetische Krankheiten so interessant, weil praktisch alles im Körper in irgendeiner Weise mit der Blutdruckregulation, mit dem Strömen des Blutes verbunden ist. Alle Organe und alle etwa 200 differenzierten Zellarten sind mehr oder weniger an der Regulation des fließenden Blutes und an der Höhe des Blutdruckes beteiligt und somit auch alle etwa 30.000 Gene. Wir haben es mit einer Komplexität zu tun, die sich praktisch nicht auflösen läßt. Deshalb benötigen wir Modelle und abgeleitete Submodelle. Es wird von Gen-Modellen und von Protein-/Proteom-Modellen gesprochen – und daraus wird dann immer eine ganze Wissenschaft gemacht: Genetics, Genomics, Proteomics, Zellbiologie usw.

Ziel ist es, zumindest in vereinfachter Form die Funktion der Gene darzustellen, die beim Krankheitsgeschehen eine Rolle spielen. Hierzu gibt es in der Tat ganz ausgezeichnete, realitätsnahe Modelle mit großer Aussagekraft und außerordentlicher Konsequenz. Das ergibt sich aus der Tatsache, daß wir die Gene synthetisieren oder aus den Chromosomen von Zebrafisch, Wurm, Mensch oder einem anderen Modellorganismus heraus-schneiden und in mehr oder weniger beliebiger Art und Weise verändern können. Wir

können die Natur in Varianten nachbilden. In einem kurzen Zeitfenster der Reproduktion neuen Lebens, bei der Verschmelzung von Ei und Samenzelle, können wir mit verschiedenen Methoden neue Gene einführen oder Gene ausschalten (Transgene). Wir sprechen von „Knock-ins“ und „Knock-outs“. Es handelt sich dabei um eine außerordentlich flexible und schnelle Technologie mit fast unbegrenzten Möglichkeiten. Das Resultat sind sogenannte transgene Tiere wie Krebsmaus oder Bluthochdruckratte in den unterschiedlichen Ausprägungen, die als Krankheits- oder auch Gesundheitsmodell dienen. Diese lebenden, funktionellen Modelle nutzen wir für Fragestellungen aller Art, indem wir zum Beispiel menschliche Gene, die Krankheitswert haben, in Maus, Ratte oder ein anderes Modelltier einführen und dann an diesem Modell Experimente durchführen. Je nach Fragestellung ist neben dem *in vivo*-Modell auch die Zellkultur, die aus diesen transgenen Modellen hergestellt werden können, als *in vitro*-Modell von großem Nutzen.

Im Gegensatz zu Struktur- oder Prozeßmodellen, die in allen Disziplinen genutzt werden, ist der Modellorganismus in Biologie und Medizin also nicht in erster Linie ein Hilfsmittel der Theoriebildung, sondern sie dienen vor allem der experimentellen Forschung. Die Arbeit mit lebenden Modellen ist eine Möglichkeit, die uns fasziniert und für die Entwicklung neuer Methoden der Diagnose und Therapie von außerordentlichem Wert ist. Ohne diese experimentellen Modelle ist die Analyse komplexer Lebensvorgänge nicht möglich. Gleichzeitig gilt für diese Untersuchungen aber auch in besonderer Weise, daß Modelle in ihrer Aussagekraft für die Realität Einschränkungen haben, die uns an die Bescheidenheit der Wissenschaft mahnen.

Wolfgang Klein

## *Über den Nutzen naturwissenschaftlicher Denkmodelle für die Geisteswissenschaften*

Ich glaube nicht, daß es grundsätzliche Unterschiede zwischen Geistes- und Naturwissenschaften gibt. Die Gegenstände, um deren Erforschung und Erklärung es geht, sind natürlich verschieden. Der Althistoriker befaßt sich mit anderen Dingen als der Biochemiker, und so brauchen die beiden denn auch verschiedene Methoden. Der Gedanke, die Entwicklung der frühgriechischen Polis mit den Methoden der Biochemie untersuchen zu wollen, so beeindruckend diese auch sind, wäre bizarr. Aber der Althistoriker befaßt sich auch mit anderen Gegenständen als der Literaturwissenschaftler, und der Biochemiker mit anderen als der Astronom – die Scheidelinie liegt nicht zwischen Natur- und Geisteswissenschaften, sondern zwischen den einzelnen Disziplinen und den Phänomenen, deren Untersuchung sie sich zum Ziel gesetzt haben. Was immer der Gegenstand solcher Untersuchungen sein mag, wenn sie den Namen 'Wissenschaft' verdienen sollen, so müssen sie gewisse elementare Kriterien erfüllen, deren wichtigste die folgenden drei sind:

- die grundlegenden Begriffe müssen mehr als Schlagwörter sein,
- es muß zumindest der Versuch gemacht werden, die Zusammenhänge zwischen den Einzelercheinungen zu bestimmen und präzise zu machen,
- und vor allem muß jede Aussage belegt werden können.

Dies sind die allerelementarsten Voraussetzungen, über die sich, sollte man jedenfalls meinen, die Wissenschaftler einig sind, auch wenn sie sich im Einzelfall nicht immer daran halten. In allen Disziplinen bilden sich aus der Tradition gespeiste Blickweisen, gewisse Denkmuster heraus, die darüber bestimmen, wie man sich den Phänomenen nähert. In einer der vielen Verwendungsweisen dieses Wortes kann man solche Muster als 'Modelle' bezeichnen – nicht als reale Modelle, sondern als 'Denkmodelle'. Sie entwickeln sich allmählich und bestimmen oft eher unterschwellig als explizit, was in dem betreffenden Fach von den Kollegen als Faktum, als zulässiges Argument oder als explanativer Faktor geachtet wird. Bis vor nicht allzu langer Zeit war es durchaus üblich, sich auf das Eingreifen Gottes oder anderer überirdischer Mächte zu beziehen, um bestimmte Erscheinungen zu erklären, beim Schlachtenglück wie beim Umlauf der Plane-

ten. Niemandem wäre ein Argument in diese Richtung unpassend vorgekommen. Isaac Newton, dem die Naturwissenschaften ja einiges verdanken, hat dies für ganz selbstverständlich angenommen, und Laplaces berühmte Behauptung – „je n'ai pas besoin de cette hypothèse“ – wäre ihm nicht bloß gottlos, sondern auch unsinnig erschienen. Im Laufe der Zeit ist Newtons Blickweise außer Mode geraten, ein anderes Denkmodell, eben das Laplacesche, hat sich in den Naturwissenschaften durchgesetzt, und einem Physiker, der sich zur Erklärung irgendeiner Irregularität auf das Eingreifen überirdischer Mächte beriefe, würde alsbald die rote Karte gezeigt. Dies ist ganz unabhängig von der Frage, ob man anderweitig an überirdische Mächte glaubt oder nicht; auch religiöse Naturwissenschaftler halten Gott aus ihren Aufsätzen fern; er ist kein zulässiges Argument.

In diesem Fall beschränkt sich das Denkmodell nicht auf die Naturwissenschaften; auch in der Geschichtswissenschaft ist es nicht länger wohl angesehen, das Werden und Vergehen von Gesellschaften oder den Ausgang eines Krieges mit Hilfe von Eingriffen guter und böser Mächte zu deuten. Ein bestimmtes Denkmodell hat sich allenthalben durchgesetzt; es ist konstitutiv für das, was so gut wie alle Wissenschaftler, ausgenommen einige vereinzelte Theologen, als wissenschaftliches Vorgehen akzeptieren.

Im folgenden will ich zwei Denkmodelle betrachten, die in den Naturwissenschaften gleichfalls stark gewirkt haben und immer noch wirken, aber weniger unumstritten sind. Sie sind nicht auf die Geisteswissenschaften übertragen worden. In den letzten Jahren gibt es jedoch vermehrt Versuche in diese Richtung, getragen nicht zuletzt von der Vorstellung, wichtige, aber bislang eher spekulativ behandelte Fragen endlich einer Analyse zuzuführen, die wissenschaftlichen Ansprüchen genügt.

Das erste dieser Denkmodelle betrifft das Verhältnis von Determinismus und Willensfreiheit. In der Physik hat sich im Laufe des 18. Jahrhunderts die Vorstellung gefestigt, daß die physikalischen Erscheinungen durch das berechenbare Zusammenwirken einer begrenzten Anzahl von Faktoren gesteuert werden, die deterministisch wirken. Auch hier zählt Laplace zu den markantesten Exponenten einer solchen Auffassung. Seither ist es den Physikern gelungen, diese Faktoren auf vier Grundkräfte zu reduzieren: Schwerkraft, elektromagnetische Kraft, starke und schwache Wechselwirkung. Vielleicht wird es sogar gelingen, noch einen Schritt weiterzukommen, vielleicht wird man auch einen Schritt zurückgehen müssen – wie auch immer, es ist ein sehr erfolgreiches Programm. Kann man es auf andere Erscheinungen übertragen, deren Klärung uns am Herzen liegt – insbesondere auf das alte Problem der menschlichen Willensfreiheit?

Dagegen gibt es zunächst ein sehr naheliegendes Argument, den Umstand nämlich, daß zumindest ein wichtiger Teil der modernen Physik, die Quantenmechanik, wesentlich durch probabilistische Annahmen gekennzeichnet ist. Ich denke nicht, daß sich ein

eingeschworener Determinist davon irritieren ließe. Es kommt darauf an, ob man diese Annahmen ontologisch deutet ('der durch die Gleichungen beschriebene Ausschnitt der Welt ist nicht deterministisch') – oder epistemologisch ('wir wissen nicht sicher, wo ein Element mit einem bestimmten Impuls zu einer bestimmten Zeit ist, und wir können es auch nicht sicher wissen'). Letzteres ist genau die Auffassung von Laplace: er hat nicht sagen wollen, daß es seinen Dämon wirklich gibt. Ich weiß nicht, wie viele unter den Physikern Ontologen und wie viele Epistemologen sind und ob sie diese Frage überhaupt interessiert – aber auch ein Liebhaber des deterministischen Denkmodells kann mit probabilistischen Gleichungen leben, solange er glauben darf, daß sie nicht die Gesetze der Natur widerspiegeln, sondern das, was wir von ihnen wissen oder wissen können. Das muß man auch jenen konzederen, die deterministische Vorstellungen beim menschlichen Willen vertreten. Sie behaupten nicht unbedingt, daß man konkrete Entscheidungen voraussagen kann; es mag viel zu viele Parameter geben, es mag sogar angesichts naturgegebener Beschränkungen unseres Erkenntnisvermögens in vielen Fällen grundsätzlich unmöglich sein.

Das Problem einer Übertragung vom 'Reich der Natur' ins 'Reich des Geistes' liegt vielmehr darin, daß man überhaupt nicht sieht, in welcher Weise die vier Grundkräfte, die bei der Erklärung der physikalischen Natur mit so großem Erfolg isoliert und in ihrem Zusammenwirken beschrieben wurden, den menschlichen Willen bestimmen. Die Entscheidung, ob ich mir jetzt gleich noch einen Kaffee hole oder zu diesem Diskussionsbeitrag das Wort ergreife, hängt sicher von allerlei Faktoren ab. Aber die Schwerkraft spielt dabei keine irgendwie interessante Rolle, noch die schwache Wechselwirkung. Auch die Rolle der elektromagnetischen Kraft kann man nicht so recht dingfest machen. Diese Kräfte, wie viele es denn immer sein mögen, definieren gewisse Rahmenbedingungen, innerhalb derer menschliche Entscheidungen und Handlungen möglich sind. Der menschliche Wille wird von vielen Faktoren bestimmt; es ist sogar möglich, daß eine bestimmte Faktorenkonstellation zwangsläufig zu einer bestimmten Entscheidung führt. Aber es ist nicht zu sehen, wie eine bestimmte, quantifizierbare Konstellation der vier Grundkräfte in festlegbarer Weise darüber entscheidet, ob ich diesen Diskussionsbeitrag jetzt beende oder noch einen Satz hinzufüge. Oder zwei. Vielleicht ist der Wille dennoch determiniert – aber wenn, dann in ganz anderer Weise. Deterministische Vorstellungen aus den Naturwissenschaften, ihre Geltung dort einmal unterstellt, auf Fragen der Willensfreiheit zu übertragen, ist ein reines Glaubensbekenntnis.

Mein zweites Beispiel bezieht sich auf ein erfolgreiches Denkmodell aus der Biologie, das sich seit Mitte des 19. Jahrhunderts etabliert hat: die gewöhnlich Darwin zugeschriebene Idee der natürlichen Selektion als Erklärung für die Evolution. Nach Auffassung fast

aller Wissenschaftler, darunter auch ich selbst, glaubt kein Wissenschaftler – jedenfalls kein ernstzunehmender – an eine göttliche Schöpfung im Verlauf von sieben Tagen, so wie sie in der Bibel beschrieben ist. Dieses Denkmodell ist – jedenfalls in den Wissenschaften – außer Mode gekommen, obwohl es sicherlich in sich konsistent ist: Wenn man an einen allmächtigen Gott glaubt, dann ist es in keiner Weise unlogisch zu glauben, daß er die Welt, einschließlich der Fossilien, in sieben Tagen geschaffen hat. Die Vorstellung wird nur nicht mehr ernst genommen. In der akademischen Welt glaubt jeder an die Evolution. Die Frage ist nur, wie sie zu erklären ist. Das herrschende Denkmodell hier ist das des adaptiven Wertes – jener Idee, von der der Philosoph Daniel Dennett 1995 in seinem Buch „Darwin’s Dangerous Idea“ schrieb:

„If I were to give a prize for the single best idea anybody ever had, I’d give it to Darwin for the idea of natural selection – ahead of Newton, ahead of Einstein.“<sup>1</sup>

Nun mag man sich darum streiten, ob die darauf fußende Theorie der Entwicklung in der Biologie selbst so viel erklärt, wie manche Biologen und manche Nichtbiologen meinen. So wie Darwin selbst sie formuliert hat, entspricht sie sicherlich nicht den üblichen Kriterien der Wissenschaftlichkeit. Dazu ist sie viel zu vage, nicht nur gemessen an den Standards der Physik oder Chemie, sondern auch an denen der experimentellen Psychologie oder der empirischen Sozialwissenschaften. Daran hat sich heute nicht allzu viel geändert. Sie ist nach wie vor eher eine Argumentationsfigur denn eine falsifizierbare Theorie. Wie immer man dies einschätzt – „the single best idea anybody ever had“ macht keine Aussagen über die Entstehung von neuen Lebewesen. Neue Lebewesen kommen im wesentlichen durch nichtidentische Replikation zustande, die ihrerseits wiederum verschiedene Ursachen hat: Entscheidend für die Evolution ist die Variation, über die wir durch die Entwicklung der Genetik nunmehr sehr viel wissen, nicht die Selektion. Die Theorie der Selektion macht allenfalls Aussagen darüber, warum ein Lebewesen eher stirbt als ein anderes, und das in höchst unbestimmter und schwer nachprüfbarer Weise. Es ist keine Theorie des Entstehens, sondern eine Theorie des Verschwindens. Sie ist aber sicherlich eine der erfolgreichsten Theorien in den Naturwissenschaften überhaupt. Sie ist ein Erfolgsmodell, ein Umstand, den man vielleicht auch einmal mit darwinschen Kriterien untersuchen sollte.

Dies bringt mich nun auf den eigentlichen Punkt. Ist es sinnvoll und erfolgversprechend, ein solches Denkmodell in anderen Disziplinen zu übernehmen, insbesondere auf jene Entwicklungen zu übertragen, die traditionell in den Sozial- und Geisteswissen-

---

<sup>1</sup> Dennett, D.: Darwin’s Dangerous Idea, London: Penguin 1995, S. 7.

schaften studiert werden? Dies ist in der Tat immer wieder vorgeschlagen worden, zu Darwins Lebzeiten bis in die unmittelbare Gegenwart. Dennetts eben zitiertes Buch ist eines der meistdiskutierten Exempel aus neuerer Zeit. Mir scheint, jeder Versuch in diese Richtung führt zu völliger Vagheit und damit zur Aufgabe jedes ernsthaften Erklärungsanspruchs. Neue literarische Formen, neue Kunstwerke, neue sprachliche Konstruktionen, neue soziale Strukturen, neue Ideen gar kommen auf die unterschiedlichste Weise zustande, nie aber durch nichtidentische genetische Replikation. Und wenn sie wieder verschwinden oder auch nur an Bedeutung verlieren, so gibt es viele Gründe. Der adaptive Wert hat dabei ungefähr dieselbe Erklärungskraft wie Friedrichs des Großen Begründung des militärischen Erfolgs: „Gott ist immer bei den stärkeren Bataillonen“.

Ich habe zu Beginn gesagt, daß es in meinen Augen keine grundsätzlichen Unterschiede zwischen Geistes- und Naturwissenschaften gibt. Wenn man überhaupt von Wissenschaft reden können soll, dann müssen bestimmte elementare Kriterien erfüllt sein; dies gilt für die Physik ebenso wie für die Linguistik, für die Biologie ebenso wie für die Geschichtsforschung. Aber die Wissenschaftlichkeit eines Faches hängt nicht daran, daß es sich Methoden aneignet, die sich in einem anderen Fach bewährt haben. Und ebenso wenig hängt sie daran, daß es sich Denkmodelle aneignet, die sich in einem anderen Fach bewährt haben. Viele klassisch geisteswissenschaftliche Probleme, etwa Willensfreiheit, Bewußtsein oder auch Kausalität der Entwicklung harren einer befriedigenden Erklärung. Das ist kein Kompliment für jene, die sich bislang damit befaßt haben. Aber ich sehe zumindest im Moment nicht, wie die Übertragung von erfolgreichen Denkweisen aus den Naturwissenschaften zu einer besseren Erklärung beitragen kann. Das mag sich aber ändern.

Eberhard Knobloch

## Kurzdarstellung zum Thema „Modelle“

Im Rahmen der ersten „Quæstio“ soll zu drei Fragen aus wissenschaftshistorischer Sicht Stellung genommen werden:

### 1 Woher stammen die Vorstellungen und Bestandteile von Modellen?

Soweit es um Mathematisierungen geht, stammen Beschreibung, Veranschaulichung, Begrifflichkeit nicht aus der Lebenswelt, sondern aus der Mathematik. Als Beispiele mögen Ökonomie, (Meß-)Fehlertheorie, Dämmerungstheorie dienen. Im Falle der beiden ersten geht es um die Kalkülierung von Prozessen und Messungen, im Falle der Dämmerung um die Geometrisierung einer natürlichen Situation.

Mit der Modellierung verbindet sich das zentrale Problem, ob bzw. wie die Mathematisierung möglich ist. Die Möglichkeit einer Mathematisierung der Ökonomie wurde zu Beginn des 19. Jahrhunderts bestritten (die Brüder Say, W. Lexis). Die Durchführung der Mathematisierung der Ökonomie wie der Fehlertheorie wurde während des gesamten 19. Jahrhunderts von heftigen Kontroversen begleitet (Knobloch 1994, Knobloch 1992). Modellierung bedeutet Vereinfachung. Daraus ergibt sich zwingend zu klären, was wesentlich ist.

Im Falle der Ökonomie wurden zum Beispiel Nutzen (Dupuit), Wert (Borda), wirtschaftliches Gleichgewicht (Canard) vorgeschlagen. Im Falle der Dämmerung war unstrittig (Witelo, P. Nunes), daß die Erde bzw. Sonne als projizierte Kugeln, das heißt als Kreise, wiedergegeben wurden.

### 2 Wie entwickeln sich Modelle weiter?

Die Mathematisierung von Ökonomie und Fehlertheorie orientierte sich an Vorbildmodellen. Im Falle der Ökonomie war im 19. Jahrhundert Mechanik das Vorbild, erst im 20. Jahrhundert Statistik. Determinismus wurde also durch Probabilismus abgelöst.

Im Falle der Fehlertheorie war die axiomatische Grundlegung umstritten. Einigkeit herrschte nur insofern, als grundlegende Hypothesen möglichst einfach, möglichst we-

nig willkürlich sein und größtmögliche Übereinstimmung mit den üblichen Begriffen und der Erfahrung sicherstellen sollten.

### *3 Welche Instanz entscheidet über die Adäquatheit eines Modells?*

Entscheidend ist die Voraussetzung, daß sich die Akteure dessen bewußt sind, ein Modell zu verwenden, nicht unmittelbar die Realität; eine Tatsache, die im Falle der Fehlertheorie im Streit zwischen Laplace, Gauss, Encke usw. verdeckt zu werden drohte. Über die Adäquatheit entscheidet die Korrespondenz zwischen Theorie und Realität. Daran mußten sich die philosophischen Vorverständnisse, der Vorwurf der Willkür, die Forderung nach Evidenz, die Zulässigkeit von Prinzipien messen lassen.

Die Motive, ein Modell einem anderen vorzuziehen, lagen in der besseren Möglichkeit, Probleme zu lösen, in der höheren Prognosefähigkeit und im besseren Verständnis des Geschehens.

### *Literatur*

Knobloch, E.: Historical aspects of the foundations of error theory. In: Echeverria, J., Ibarra, A. & Th. Mormann (Hg.), *The space of mathematics, Philosophical, epistemological, and historical explorations*, Berlin u. a. 1992, S. 253–279.

Ders.: Das Vordringen der mathematischen Methode außerhalb der Naturwissenschaften im 19. Jahrhundert. In: Launhardt, Wilhelm, *Mathematische Begründung der Volkswirtschaftslehre, Vademecum zu einem Klassiker der Theorie der Raumwirtschaft*, Düsseldorf 1994, S. 85–102.

Ders.: Nunes's „Book on twilights“. In: Trabucho de Campos, L., Leitão, H. & J. F. Queiró (Hg.), *International Conference Petri Nonii Salaciensis Opera Lisbon-Coimbra, 24–25 May 2002, Proceedings*, Lisboa 2003, S. 113–140.

Heinz Duddeck

## Modelle in den Technikwissenschaften

### 1 Einleitung

Historiker erzählen, wie es war,  
Philologen, was Texte meinen.  
Physiker und Biologen erklären uns, wie die Welt ist,  
Philosophen, wie sie sein soll.  
Mathematiker verknüpfen logische Gebilde, die es gar nicht gibt.  
Und Astronomen sehen nur das, was längst Vergangenheit ist.  
Doch Ingenieure, die haben es ungleich schwerer: die arbeiten daran, was erst in der  
Zukunft *sein wird* – freilich beschränkt auf Artefakte.

Ingenieure setzen etwas in die Welt (Abb. 1), was vorher nicht existierte. Darum sind auch ihre Modelle zum Teil wesentlich anders als die der Naturwissenschaftler. Da, wo Naturwissenschaftler technische Konstrukte planen und fertigen, die sich in der zukünftigen Realität bewähren müssen – Weltraumsonden, Fusionsreaktoren, Produktionsverfahren der Chemie –, sind sie eigentlich Ingenieure. Sie wissen es oft nur nicht. Man erkennt es an den Bindestrich-Techniken: Laser-, Nano-, Bio- und Medizin-Technik. Um Technik vor Geisteswissenschaftlern zu legitimieren, sei Hans Blumenberg bemüht: Gottes Welterschöpfung hat einen „Spielraum des Unverwirklichten“ gelassen. Hier kann der Mensch – also der Ingenieur – „authentisch Neues“ ohne „Nachahmung der Natur“ realisieren.<sup>1</sup> – Wohl ironisch genug gestartet, muß ich es auch begründen. Ich will das exemplarisch an Teilen meines Faches tun.

### 2 Technische Entwurfsmodelle

Alles in Abbildung 2, im künstlichen Hafen von Nagoya, ist Technik. Alles war zunächst im Kopf, im Computer, auf Papier und wurde mit Modellen für das, was in 100, 200 Jahren geschehen kann, abgesichert. Auch die hypothetischen Gefährdungen: Explosion

---

<sup>1</sup> Blumenberg, H.: Nachahmung der Natur. In: Wirklichkeiten, in denen wir leben, Reclam 7715, 1981, S. 83.



Abbildung 1  
Türme der Welt



Abbildung 2  
Hafen Nagoya



Abbildung 3  
Normandie Brücke

eines Gasbehälters, Schiffsstoß gegen den Kai, Erdbeben. Technik erfordert auch funktionelle Modelle: für die Logistik der Verladeprozesse, den Betrieb der Öl-, Gas- und Silo-Anlagen. Bei der Normandie-Brücke (Abb. 3) erfassen Entwurfsmodelle unter anderem den Jahrhundertsturm mit Eisregen, LKW-Staus und Stöße bei Schlaglöchern, den Bruch einiger Kabel und die Auskolkungsgefahr der Pfeilerfundamente im Fluß.

Entwurfsmodelle bilden nicht die tatsächliche zukünftige Wirklichkeit ab. Sie überbieten sie mit Ansätzen in Fraktalen von Wahrscheinlichkeiten, mit Sicherheitsmargen. Wir untersuchen auch hypothetische Szenarien, für die es keine Erfahrungen gibt, wir keine Erfahrungen machen wollen: den GAU im Kernkraftwerk, Staudammgefährdung durch Jahrtausenderdbeben, den Brand im Tunnel, das Jahrtausendhochwasser im Hamburger Hafen. Beim Entwurf von Bauwerken (z. B. Abb. 1) koppeln wir mehrere Teilmodelle (Abb. 4): die für Einwirkungen (Sturm, Erdbeben), das mechanische Strukturmodell (der ganze Toronto-Tower ersetzt durch einen eindimensionalen Balken), Modelle für Bruch- und Sicherheitshypothesen (zweifache Sicherheit gegen Umfallen oder schon gegen Risse im Schaft).

Entwurfsmodelle haben spezifische Charakteristika: Sie sind keine Erklärungsmodelle der Realität. Ausnahmen: Wir suchen Schadensursachen oder wir sind – wie bei Stoffmodellen – der Physik nahe. Sie ersetzen die gesamte komplexe Realsituation durch

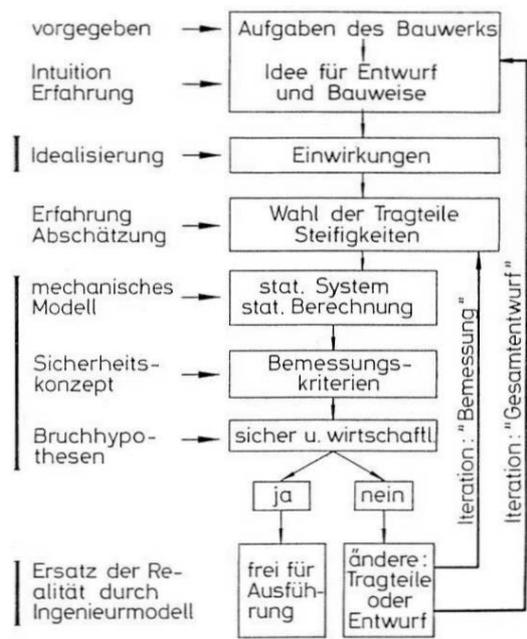


Abbildung 4 Entwurfsmodell

starke Reduktion auf wesentliche Phänomene. Naturgesetze findet man dagegen nur in künstlich geschaffener, auf einen Aspekt reduzierter Experimentiersituation. Entwurfsmodelle fangen die Realität, auf der sicheren Seite liegend, ein. Schon die verbal formulierten Szenarien möglicher Grenzsituationen sind Modelle. Technische Modelle haben meist Anwendungsgrenzen. Sie sind bei Zugewinn an Wissen offen für Revisionen. Technische Modelle wollen nicht wahr, sondern nur hinreichend zuverlässig richtig sein. Sie liefern Entscheidungskriterien für das Machbare, Verantwortbare; leider nicht für Wertefragen (ob sinnvoll, wünschenswert).

### 3 Asse-Tieflager für radioaktive Abfälle

Zukunft muß manchmal sehr komplex eingefangen werden. Im Salzstock Asse bei Wolfenbüttel (Abb. 5) wurde vor 30 Jahren (1967–1978) schwach radioaktiver Abfall eingelagert. Das Bergwerk (Abb. 6) mußte mit Salz und Lauge gefüllt und abgeschlossen werden. Es entstand das erste Endlager radioaktiver Abfälle in Deutschland.

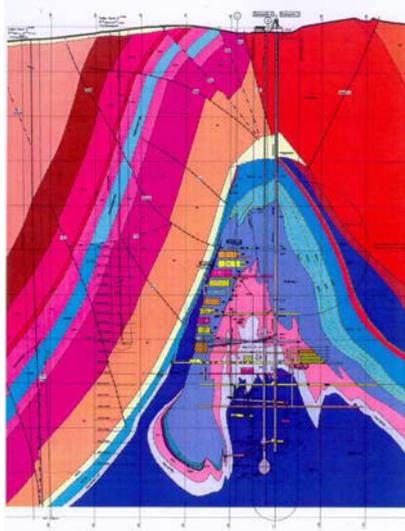


Abbildung 5  
Asse-Schnitt

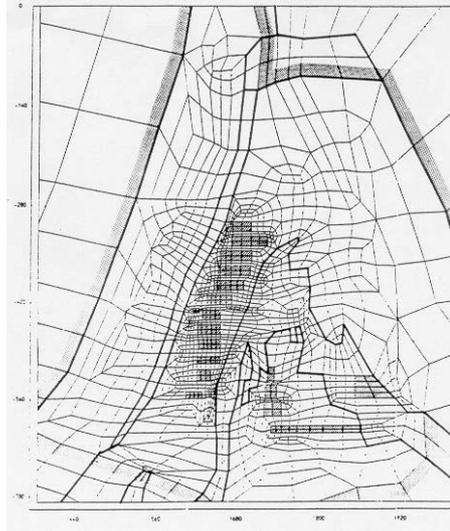


Abbildung 7  
FEM-Modell Asse

Ingenieure müssen Antworten geben, unter anderem auf folgende Fragen:

- Welche kritischen Szenarien sind in 10.000 Jahren mit welchen Wahrscheinlichkeiten möglich?
- Löst die Schutzlauge das Salz auf? Stürzt das Bergwerk ein?
- Wieviel kontaminierte Lauge wird durch die rheologische Salzkonzvergenz herausgepreßt, 100 ... 500 m<sup>3</sup> pro Jahr?
- Werden in 10, in 500, in 10.000 Jahren Nuklide in das Grundwasser austreten? Und in welcher Konzentration?
- Werden – fragt das Bergamt – Eiszeiten in zukünftigen 150.000 Jahren das Lager freilegen?

Antworten sind nur mit Modellen möglich. Die Wissenschaften müssen diese Modelle liefern. Dies sind unter anderem: Struktur- (Abb. 7) und Stoffmodelle für die Deformationen und Spannungen in den 10.000 Jahren, Prozeßmodelle für chemisch-physikalische Reaktionen der Abfallbehälter mit der Schutzlauge, hydrologische Modelle für innere Konvektions- und externe Bergwasserströme aus Dichtedifferenzen.

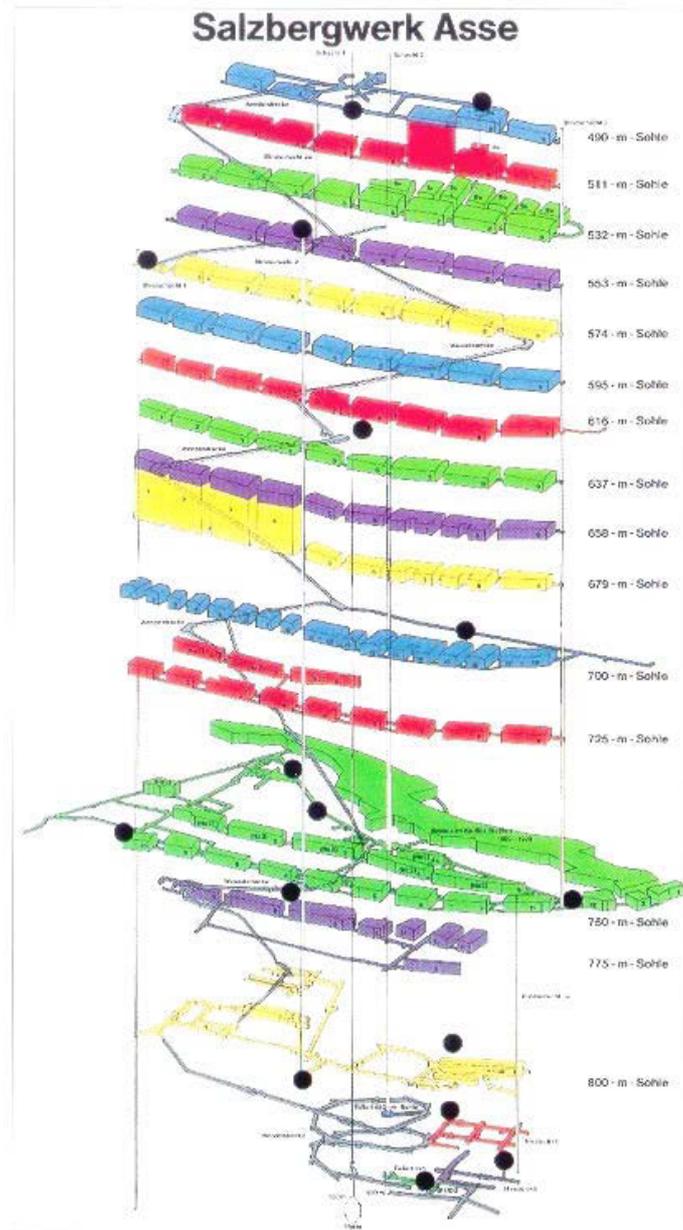




Abbildung 8  
Kläranlage

#### 4 Vielfalt der Modelle

Ingenieure müssen zuverlässig voraussagen, daß die entworfenen Werke ihren Zweck erfüllen und niemanden – auch nicht Natur und Gesellschaft – schädigen werden. Und sie haften dafür. Ganz im Gegensatz zu den Wirtschaftswissenschaftlern, den fünf Weisen des Bundeskanzlers, die jährlich die Ergebnisse ihrer Modellberechnungen vorlegen. Wenn Historiker – oder Hegel und Marx – es wagten, Modelle für die Zukunft zu entwerfen, scheiterten sie sehr. Auch Religionen bieten Zukunftsaussagen an. Freilich, Heilsmodelle sind gegen Verifizierungsversuche immun.

Die technischen Modelle sind so vielfältig wie die technischen Projekte. Sie sind sehr spezifisch an die technischen Ziele angepaßt: biologisch-chemische für Abwassertechnik (Abb. 8), Modelle für computergesteuerte Fertigungstechnik in Produktionsstraßen (Abb. 9), Modelle für blackout-sichere Verbundnetze der Stromversorgung, Modelle für Funktion und Fertigung von Mikro-Chips. Im Gegensatz zu den Naturwissenschaften, die kumulativ an Erklärungsmodellen arbeiten, sind Ingenieure vielfach gezwungen, jeweils speziell für ein einzelnes Projekt eigene Modelle zu entwickeln. Das Finden zutreffender Modelle ist oft sogar Aufgabe der in der Praxis tätigen Ingenieure. Daher muß Ausbildung an den Technischen Universitäten das Finden und Absichern von Modellen lehren.



Abbildung 9  
Fertigungsstraße im Pkw-Werk

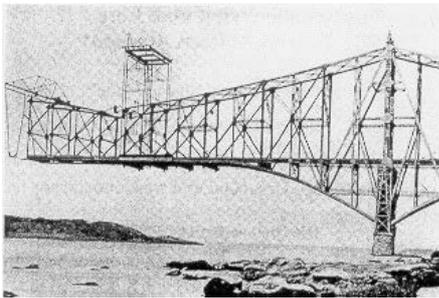


Abbildung 10  
Quebec-Brücke

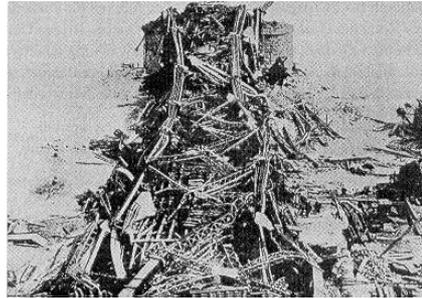


Abbildung 11  
Einsturz Quebec-Brücke

## 5 Antworten auf die gestellten Fragen

### 5.1 Wer ist Richter über die Adäquatheit der Modelle?

Technische Modelle unterliegen einem harten Realitätstest. Das Laborexperiment liefert eigentlich nur die Parameter der Modelle. Die Abbildungen 10 und 11 zeigen die Quebec-Brücke 1907 vor und nach dem Einsturz. Die Modelle des Ausknickens von Druckstäben waren noch nicht hinreichend entwickelt. Einstürze in Bauzuständen sind häufiger als in Endzuständen. Wenn der Realitätstest der Scharfrichter über Modelle ist, dann wäre dies William James Theorem „What works is correct.“ „True“ sagte er nicht.

Doch leider ist dies nicht so einfach: Für die Modelle hypothetischer Katastrophenfälle wollen wir auf keinen Fall Realitätstests erfahren (z. B. Flugzeugabsturz auf Kernkraftwerk). Hierfür bleiben nur Plausibilität und logische Konsistenz als „Richter“, weil wir in Unerfahrenes hinaus extrapolieren. Man kann auch in der Technik sehr wohl mit falschen Modellen richtige Ergebnisse erzielen, wenn man sie nur gut genug an Meßdaten kalibriert. Je ärmer an Erfahrung, desto reicher an Irrtümern beim Modell.

Die meisten Schadensfälle sind durch menschliches Versagen oder durch in den Modellen nicht erfaßte Einflüsse verursacht. Also suchen Ingenieure verzweifelt nach Modellen, mit denen sie das finden, was man später als 'vergessen' erkennt. Abbildung 12 zeigt den Bau der Hängebrücke in Osaka.



Abbildung 12  
Osaka-Brücke

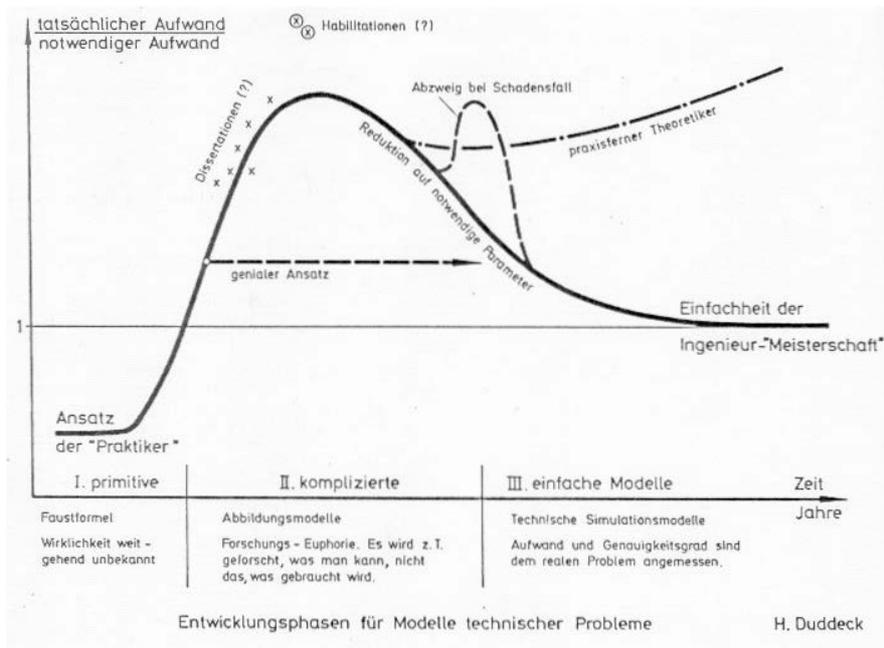


Abbildung 13  
Entwicklungskurve

## 5.2 Zur Entwicklung technischer Modelle

Die Entwicklung technischer Modelle läßt sich am besten mit der Aufwandskurve (Abb. 13) über den Zeitraum von zum Beispiel 30 Jahren erklären. Die Horizontale „1“ kennzeichnet die Meisterschaft: Der Aufwand an Modellkomplexität, an Intelligenz, Arbeit, Geld, Computerzeit entspricht genau dem für das Projekt erforderlichen Aufwand. Modellentwicklungen für zum Beispiel einen Roboter, eine Brücke, Anwendungen der Lasertechnik, Verfahrenstechnik der Müllverbrennung, vielleicht sogar für eine Nierentransplantation, beginnen mit einer primitiven Phase, in der das Werk gelingt, obwohl man nicht genau weiß warum. Wenn die Forschung das Problem entdeckt, steigt der Aufwand steil an: Es herrscht eine Euphorie des Forschens und Erklärens. Da wird oft auch erforscht, was man zufällig kann, nicht, was man braucht. Doktoranden beherrschen noch nicht die Kunst des richtigen Weglassens. Die Wissenschaften müssen jedoch dazu beitragen, daß die Modelle auch in die Meisterschaft abschwingen. Dies ist die Phase der Entwicklung hinreichender technischer Modelle. Tritt ein Schadensfall ein (z. B. beim Brückeneinsturz), gibt es Millionen an Forschungsgeldern. Ausnahme-Begabungen ge-

lingt ein genialer Ansatz. Freilich weiß man erst sehr viel später, daß dieser genial war. Da gibt es aber auch die unbeirrten praxisfernen Theoretiker, die noch dann an Verfeinerungen des Modells arbeiten, wenn dies niemand braucht, weil Meister-Ingenieure das Problem längst auf ein Modell reduziert haben, das einfach und zugleich korrekt ist.

### 5.3 Ist ein Modell „wissenschaftliche Wahrheit“?

Technische Modelle sind nicht auf Welterklärung aus, sondern auf In-die-Welt-Bringen. Sie sind „wahr“, oder besser „richtig“, wenn sie zu Artefakten führen, die alle Erwartungen erfüllen.

### 5.4 Werden Modelle durch ihre Erfinder geprägt?

Der starke Realitätsbezug vereinheitlicht Modelle international: Tunnel werden in Japan genauso berechnet wie in Europa. Doch beim Methodischen gibt es auch in der Technik die von Thomas Kuhn aufgedeckte Bindung an zeitliche Paradigmen. „Wer einen Hammer hat, sieht überall Nägel“, sagt Neil Postman bei einem Vortrag in der Technischen Universität Braunschweig im Jahre 1995. Wer finite Elemente beherrscht, berechnet auch Herzklappenflattern mit finiten Elementen und den erlernten Modellen. Vielleicht kann man dies als eine gewisse Fesselung ansehen. „Etablierte“ Modelle verführen Ingenieure, sie für die Wirklichkeit zu halten. Ihre blinde Anwendung (das Rechnen) läßt das Denken verkümmern. Und wenn Architekten auch zu den Ingenieuren zählen: Sie leiden eher an der Fesselung durch den jeweiligen modischen Zeitgeist. Doch das ist eher Baukultur und Mode, nicht Modell.

## 6 Schluß

Das Erfinden und das Entwickeln von geeigneten Modellen – oft für sehr spezielle Einzelprobleme – sind wesentliche Aufgaben der Technikwissenschaften. Daher träumen wir Ingenieure davon, daß die Informatik uns alle Mühen des Berechnens abnimmt, damit Ingenieure endlich das tun, was ihre eigentliche Aufgabe ist: das Hans Blumenbergsche „authentisch Neue im Spielraum des Unverwirklichten“<sup>2</sup> zu erfinden. Und die Modelle dazu, die sichern, daß das Neue nicht nur richtig, sondern vielleicht sogar gut ist, also Modelle für Werteprobleme. Doch wahrscheinlich träumen wir davon noch in 100 Jahren.

---

<sup>2</sup> Blumenberg, ebenda, S. 83.

### *Bildnachweis*

Abb. 1: Heinke, E. & F. Leonhardt: Türme aller Zeiten aller Kulturen, DVA 1988.

Abb. 2, 3, 12: Structural Engineering International, IABSE, Zürich.

Abb. 5, 6: GSF – Jahresberichte, Institut für Tieflagerung.

Abb. 9: Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik, TU Braunschweig.

Abb. 10, 11: Tarkow, J.: A disaster in the making, 1986.

Jürgen Mittelstraß

## Anmerkungen zum Modellbegriff

Werden Begriffe in einem disziplinären Kontext verwendet, ist ihre Bedeutung in der Regel klar; werden Begriffe in unterschiedlichen disziplinären Kontexten verwendet, ist ihre allgemeine Bedeutung in der Regel nicht klar. Eben dies ist beim Modellbegriff der Fall. Dieser findet Verwendung in so unterschiedlichen disziplinären Kontexten wie der Logik, der Mathematik, der Physik, der Chemie, der Biologie, der Ökonomie, der Soziologie und der Kunsttheorie. Aufgabe der Philosophie, speziell der Wissenschaftstheorie, ist es angesichts dieses Umstandes, entweder die unterschiedliche disziplinäre Semantik des Modellbegriffs festzustellen und zu beschreiben oder einen Kernbegriff zu bestimmen, als dessen Varianten (qua Analogiebildung) die unterschiedlichen disziplinären Ausprägungen gelten können. Die erste Möglichkeit ist enzyklopädisch, die zweite systematisch und konstruktiv. Beides ist in fünf Minuten nicht zu leisten. Deshalb beschränke ich mich auch auf wenige Hinweise in Richtung beider Möglichkeiten.<sup>1</sup>

Als allgemeine Rahmenvorstellung mag gelten: Modelle sind Nachbildungen eines realen oder imaginären Gegenstandes mit dem Ziel, etwas über diesen oder mit diesem zu lernen. Der betreffende durch das Modell repräsentierte Gegenstand entzieht sich gewöhnlich einem unmittelbaren Zugang sowohl unter einer lebensweltlichen als auch unter einer wissenschaftlichen Perspektive. Bei dem Prozeß der Nachbildung sind zwei Aspekte besonders hervorzuheben: *Vereinfachung* (komplexer Strukturen) und *Veranschaulichung* (abstrakter Strukturen). So wurden astronomische Modelle (z. B. in Form von Armillarsphären) im Sinne der ersten Bedeutung (Vereinfachung komplexer Strukturen) angesehen, physikalische Modelle (z. B. in Form von Atommodellen) im Sinne der zweiten Bedeutung (Veranschaulichung abstrakter, unanschaulicher Strukturen), mechanische Modelle allgemein (z. B. in Form von Korpuskularmodellen) in beider Sinne (Be-

---

<sup>1</sup> Zum Folgenden die informativen Kurzdarstellungen: Bailer-Jones, D. & St. Hartmann: Modell. In: Sandkühler, H. J. (Hg.), Enzyklopädie Philosophie, Hamburg 1999, S. 854–859; Mäki, U.: Models, Metaphors, Narrative, and Rhetoric: Philosophical Aspects. In: Smelser, N. J. & P. B. Baltes (Hg.), International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences XV, Amsterdam etc. 2001, S. 9931–9937; Wolters, G.: Modell. In: Mittelstraß, J. (Hg.), Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie II, Mannheim, Wien, Zürich 1984, Stuttgart, Weimar 1995, S. 911–913.

schreibung anschaulicher, aber erklärungsbedürftiger Gegebenheiten durch die Grundbegriffe Raum, Zeit, Masse und Kraft).

Doch nicht immer sind Modelle einfach und anschaulich. Auch das Umgekehrte ist der Fall, etwa wenn in der Logik eine Interpretation  $I$  eines Ausdrucks  $A$  einer formalen Sprache  $S$  genau dann als ein 'Modell von  $A$ ' bezeichnet wird, wenn  $A$  bei Interpretation  $I$  zu einem wahren Satz wird, oder wenn in der Mathematik unter dem Modell einer Theorie eine Struktur verstanden wird, die die Axiome der betreffenden Theorie erfüllt. Hier sind Modelle im Unterschied zu formalen Systemen oder Sprachen, deren Modelle sie sind, nicht-sprachliche und selbst wiederum unanschauliche, abstrakte Entitäten, die in der Modelltheorie Gegenstand metamathematischer Untersuchungen sind (etwa unter den Gesichtspunkten der Vollständigkeit und der Definierbarkeit mathematischer Theorien).

Unterschieden wird in der Regel neben einem logisch-mathematischen Modellbegriff zwischen Skalarmodellen, Analogmodellen und theoretischen Modellen. *Skalarmodelle* sind vergrößerte oder verkleinerte Duplikate realer oder imaginärer Gegenstände, zum Beispiel in Form von so genannten Modelleisenbahnen oder einer dreidimensionalen Darstellung des DNA-Moleküls ('Doppelhelix'). *Analogmodelle* bilden einen Gegenstand in einem strukturähnlichen (homomorphen) anderen Gegenstand ab, zum Beispiel in Form des Planetenmodells des Atoms oder von Computermodellen des Gehirns in der Philosophie des Geistes. *Theoretische Modelle* schließlich bestehen aus einer Menge von Annahmen und Gleichungen, mit denen die wesentlichen Eigenschaften eines Gegenstandes oder Systems erfaßt werden sollen, zum Beispiel (im anschaulichen Fall) in Form des Bohrschen Atommodells oder des Billardkugelmodells kinetischer Gase.

Zu den Funktionen der Modellbildung gehört neben den hervorgehobenen allgemeinen Zwecken der Vereinfachung (komplexer Strukturen) und der Veranschaulichung (abstrakter Strukturen) ihre Rolle als Instrument (1) zur Konstruktion von Theorien, (2) zur Anwendung und Prüfung von Theorien, (3) zur Vermittlung zwischen Theorie und Realität, (4) zur Aufbereitung von Daten, (5) zum besseren Verständnis abstrakter Theorien und Formalismen und (6) zu didaktischen Zwecken. In diesem Sinne sind sie heute selbstverständlicher Teil wissenschaftlicher Forschung und Darstellung. Damit tritt, bezogen auf den Modellbegriff, neben eine semantische Vielfalt, die eine einheitliche Definition erschwert, eine funktionale Vielfalt, die unterschiedliche Formen der Forschung mit unterschiedlichen Formen der Darstellung (wissenschaftlicher Forschung) verbindet. Klassifikationen, nicht Definitionen scheinen angesagt.

Hinzu kommt, daß sich am Modellbegriff auch die wissenschaftstheoretischen Geister scheiden. So spielt der Modellbegriff in den wissenschaftstheoretischen Debatten um

den so genannten wissenschaftlichen Realismus, das heißt in der Frage, ob Modelle rein theoretische Konstrukte sind, die sich im wissenschaftlichen Wettbewerb durchgesetzt haben, oder ob sie sich realistisch interpretieren lassen, das heißt, ob sie als wahre Repräsentationen realer Gegenstände oder Systeme begriffen werden können, eine wesentliche Rolle. Im (mathematischen) Intuitionismus und Konstruktivismus tritt die Existenz konkreter Modelle als Bedingung der Möglichkeit von Strukturuntersuchungen überhaupt auf, eine Bedingung, die zum Beispiel für Teile der transfiniten Arithmetik, die ihrerseits auf der transfiniten Mengenlehre beruht, nicht erfüllt ist.

Derartige wissenschaftstheoretische Fragen werden bereits von dem Wissenschaftstheoretiker Pierre Duhem diskutiert (1906), den im übrigen die Vieldeutigkeit des Modellbegriffs und seiner Funktionen zu einem hübschen Vergleich unterschiedlicher wissenschaftlicher und wissenschaftstheoretischer Mentalitäten bzw. Stile veranlaßte: Während der kontinentale Physiker 'abstrakte Begriffe und allgemeine Sätze' bildet, „die in der klaren und genauen Sprache der Geometrie und Algebra formuliert, und die durch die Regeln einer strengen Logik untereinander verbunden sind“, insistiert der englische Physiker auf mechanischen Modellen. In seinen Theorien (als Beispiel werden Theorien der Elektrizität angeführt) ist „nur die Rede von Seilen, die sich auf Rollen bewegen, sich um Walzen winden, durch kleine Ringe hindurchgehen und Gewichte tragen [...]; wir glaubten in die friedliche und sorgfältig geordnete Behausung der deduktiven Vernunft einzutreten, und befinden uns in einer Fabrik“<sup>2</sup>. Wieder geht es, wie man sieht, um unterschiedliche Auffassungen über die Rolle von Modellen im Forschungsprozeß – diesmal bezogen auf unterschiedliche Wissenschaftsstile und in forschungsethnologischer Perspektive. Im übrigen sind – auch wenn dies gegenwärtig in der Literatur durchaus kontrovers diskutiert wird – Modelle weder wahr noch falsch, sondern anwendungsstark oder anwendungsschwach, das heißt, sie leisten, wozu sie entwickelt wurden, oder sie leisten eben dies nicht. Es ist ein *pragmatisches* Kriterium, kein Wahrheitskriterium, das sie bestimmt.

---

<sup>2</sup> Duhem, P. : La théorie physique, son objet et sa structure, Paris 1906, <sup>2</sup>1914, S. 100 (dt. : Ziel und Struktur der physikalischen Theorien, ed. L. Schäfer, Hamburg 1978, S. 87f.).

Hans-Jörg Rheinberger

## *Überlegungen zum Begriff des Modellorganismus in der biologischen und medizinischen Forschung*

Mit den folgenden Bemerkungen über Modellorganismen in der biologischen und medizinischen Forschung des 20. Jahrhunderts aus wissenschaftshistorischer Perspektive ist eine doppelte Behauptung verbunden. Die erste betrifft das In-Existenz-Treten von Organismen als Modellorganismen, die zweite die Verwendung von Modellorganismen in der Medizin. Schließen möchte ich dann mit einer allgemeinen Überlegung zu Modellen in der Wissenschaft. Es ist klar, daß sehr viel mehr Bedeutungen mit dem Begriff des Modells verbunden sind, als sie im zusammengesetzten Begriff des Modellorganismus zum Ausdruck kommen. Ich kann mich hier auf ihn beschränken, weil viele andere Aspekte des Modellbegriffs in weiteren Statements angesprochen werden. Ich möchte nur eines gleich zu Beginn sagen, nämlich daß es mir scheint, daß die experimentelle Tätigkeit als solche immer schon in einem gewissen und ganz fundamentalen Sinne eine Modellaktivität ist, insofern jedes notwendigerweise partikuläre Experiment als ein solches immer schon als *pars pro toto* zu nehmen ist. Und insofern das Experiment als das Wahrzeichen der modernen Wissenschaft gilt, ist Modellieren grundsätzlich Bestandteil der wissenschaftlichen Tätigkeit.

Ich komme zu meinem ersten Punkt. Daß der Begriff des Modellorganismus im letzten Jahrhundert überhaupt aufkommen konnte, setzt das Bewußtsein und die Anerkennung voraus, daß es so etwas wie eine allgemeine Biologie gibt, mit anderen Worten: daß es grundlegende Eigenschaften des Lebendigen gibt, die für alle Lebewesen charakteristisch sind. Es ist historisch besehen wohl kein Zufall, daß während der ersten Jahrzehnte des 20. Jahrhunderts die disziplinäre Spezialisierung, die ihre Wurzeln in der Entwicklung der Biowissenschaften im 19. Jahrhundert hat, nicht mehr nur als eine Voraussetzung für den Zuwachs an Erkenntnissen über den Schichtenbau des Organischen und über spezielle Organismen gesehen wurde, sondern daß sie auch zu einem erneuten Interesse an den allgemeinen Aspekten der lebenden Welt führte. So waren „Allgemeine Biologien“ in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts an der Tagesordnung. Um nur ein Beispiel anzuführen, möchte ich aus Max Hartmanns „Allgemeiner Biologie“ von 1927 zitieren,

der diese definiert als „die Lehre von den Vorgängen, die sich an den lebenden Körpern abspielen“.<sup>1</sup> Der klassische Graben zwischen Botanik und Zoologie einerseits und die im 19. Jahrhundert etablierte Kluft zwischen den an den verschiedenen Ebenen der Lebensäußerungen orientierten biologischen Disziplinen andererseits sollte in dieser Perspektive keine Rolle mehr spielen.

Im 17. und 18. Jahrhundert waren es gerade die Differenzen zwischen den Organismen, die das Interesse der Forscher erweckten, die in der Tradition der Naturgeschichte standen und das Ziel hatten, das ganze Tableau der Diversität der Lebensformen zu entfalten. Biologie um 1800, als dieser Begriff erstmals Einzug in die Wissenschaft hielt, bedeutete zu fragen, was Lebewesen im Gegensatz zu nicht-lebenden Dingen auszeichnete; Biologie um 1900 bedeutete, zu fragen, was allen Lebewesen als solchen gemein ist. Unter dem Regime der allgemeinen Biologie verschwanden nun diese Unterschiede zwar nicht, aber sie wurden zu Werkzeugen, die man dazu verwenden konnte, um die allgemeinsten Eigenschaften von Lebewesen aufzuklären. Aus dieser neuen Perspektive sind Besonderheiten einzelner Organismen nicht mehr als solche interessant, sondern nur insofern, als sie die Suche nach verallgemeinerbaren Eigenschaften ermöglichen. Im Prinzip bedeutet das, daß einzelne Organismen nicht mehr um ihrer selbst willen analysiert werden, sondern aufgrund eines Erkenntniszieles, das jenseits aller besonderen Lebewesen liegt. Unter diesen Erkenntnisbedingungen sind der Begriff und die gegenwärtige Bedeutung des Ausdrucks „Modellorganismus“ entstanden. Man könnte wohl sogar behaupten, daß die allgemeine Biologie sich Modellorganismen geradezu schaffen mußte, um selbst eine experimentelle Wissenschaft zu werden.

Ein Modellorganismus läßt sich also definieren als ein – experimentell zugerichtetes – Lebewesen aus dem Reich der Pflanzen, Tiere oder der Bakterien, dessen Manipulation zu Einsichten in die Konstitution, das Funktionieren, die Entwicklung oder die Evolution einer ganzen Klasse von Organismen, wenn nicht gar zu ubiquitär gültigen Einsichten über Organismen führt. Als operationale Kriterien gelten nach Richard Burian die vergleichsweise leichte Zugänglichkeit des fraglichen Phänomens, einfache Handhabung sowie bereits vorhandenes weiteres Wissen über den betreffenden Organismus. Diese Kriterien werden sinnfällig, wenn wir etwa die Serie von Modellorganismen betrachten, welche die Entwicklung der klassischen und der molekularen Genetik im Laufe des 20. Jahrhunderts bestimmten. Bei diesen Organismen lassen sich Trends in einigen Charakteristika feststellen, die keine essentielle Beziehung zur genetischen Fragestellung selbst be-

---

<sup>1</sup> Hartmann, M.: Allgemeine Biologie, Jena: Gustav Fischer, 1927, S. 11.

sitzen, die jedoch entscheidend für die Labormanipulation sind. Das sind etwa die Größe des Organismus und seine Reproduktionszeit. Beide nehmen in der Reihenfolge von Erbsen oder Mais zu *Drosophila*, zu *Escherichia coli* und zu Viren wie dem Tabakmosaikvirus und den T-Phagen ab. Es trifft sich jedoch, daß dabei auch genetikrelevante Größen wie die Zahl der Chromosomen abnehmen. Das Vorhandensein von Riesenchromosomen in den Speicheldrüsen von *Drosophila* zeigt hingegen für die Zytogenetik eine umgekehrte Größenabhängigkeit. Neben diesen gibt es andere Charakteristika, die enger mit einem bestimmten Forschungsprogramm verbunden sein können. Wenn man etwa das Genkartierungsprogramm von Thomas Hunt Morgan und seinen Mitarbeitern mit *Drosophila* und das Programm einer physiologischen Genetik von Alfred Kühn und seinem Team mit *Ephestia* vergleicht, sieht man, daß die geringe Chromosomenzahl von *Drosophila* (4) für die Kartierung von entscheidender Bedeutung war, während die große Chromosomenzahl von *Ephestia* (30) am Beginn der Bestimmung von Genwirkketten keine Bedeutung hatte – hier kam vielmehr die Eignung der Mehlmotte zur Gewebetransplantation vorteilhaft ins Spiel.

In beiden Fällen zeigt sich auch, daß Modellorganismen eine zeitlich begrenzte Rolle spielen, die wesentlich von der Konjunktur der Entwicklung des betreffenden Forschungsfeldes abhängt. *Drosophila* war entscheidend für die Grundlegung der klassischen formalen Genetik mit ihrer Kartierung und relativen Lokalisierung von Gen-Orten; die Fruchtfliege wurde jedoch im darauffolgenden goldenen Zeitalter der molekularen Genetik marginalisiert; und sie erstand erst wieder als Modellorganismus im Kontext der rezenten molekularen Entwicklungsbiologie. Die Mehlmotte *Ephestia* war ein ideales Analyseobjekt für die Etablierung der grundlegenden Beziehungen einzelner Gene zu Abschnitten von Stoffwechsellaskaden, in diesem Falle zum Aufbau von Pigmenten; sie wurde aber ihrerseits marginal, als George Beadle und Edward Tatum *Neurospora* einführten: Der Pilz erlaubte es, ganze Stoffwechselfade durch ein systematisches Screening von Mangelmutanten der Ernährung zu kartieren.

In der Geschichte der Molekularbiologie zeigt sich noch ein anderer Trend: der Übergang zu immer einfacheren Systemen. In der Phagenforschung der 1940er und 1950er Jahre resultierte die Miniaturisierung der lebenden Systeme in deren Kollaps mit der physikalischen Charakterisierung von Genen selbst. Die Biologie ist immer noch traumatisiert vom Erfolg dieses Kollapses, an dem wir die subversive Bedeutung von Claude Lévi-Strauss' Bemerkung ermessen können, nämlich daß im Modell „die Erkenntnis des

„Ganzen dem Verständnis der Teile vorangeht“.<sup>2</sup> Der Teil ist nämlich in diesem Fall ganz einfach zum Ganzen geworden. Dieses *quid pro quo* wird dort zum Problem, wo die Wahrnehmung eines Ganzen in einer Welt, die bequem übersehen werden kann, zurückprojiziert wird in die Welt komplexer Systeme, aus denen sie ausgesondert worden war. Das passierte grosso modo im Alltagsverständnis der molekularen Genetik und hat in den letzten Jahrzehnten unter dem Etikett des genetischen Reduktionismus, als dessen einsame Spitze man das „selfish gene“ von Richard Dawkins betrachten kann, so viel Aufsehen erregt.

Noch eine andere Eigenart bestimmter Modellorganismen wäre zu erwähnen. Sie können nämlich auch besondere Forschungsprogramme überleben, weil über sie schon so viel Hintergrundwissen angesammelt wurde. Als Beispiel dafür möge der Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* dienen. Er wurde zunächst von Sidney Brenner als ein Modellorganismus ausgewählt, um Zelllinien in der Entwicklung vollständig auszuzählen. Danach avancierte er zu einem der ersten Organismen, dessen Genom vollständig sequenziert wurde. Heute ist er zu einem Modell für das Studium des biologischen Alterns und des Zelltodes geworden. An dieser Stelle kann auch nochmals auf *Drosophila* verwiesen werden, die zunächst ein Modell für Genkartierung war und dann nach einer Zwischenpause zum Modell für molekulare Embryogenese wurde.

Ein besonders interessanter Fall in dieser Hinsicht ist die sich über ein ganzes Jahrhundert hinziehende Tabakmosaikvirus-Forschung. Wenn man etwa die von Karen-Beth Scholthof, John Shaw und Milton Zaitlin 1999 herausgegebene Sammlung von Originalarbeiten durchblättert,<sup>3</sup> sieht man den Modellorganismus Tabakmosaikvirus (TMV) in vier verschiedene, mit Unterbrechungen aufeinanderfolgende Konjunkturen eingebettet. In den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts war TMV ein Modell für eine ultrabakterielle, auf Infektion beruhende Pflanzenkrankheit. Während der 1930er Jahre wurde TMV zum Emblem eines Objekts auf der Grenze zwischen dem Lebenden und dem Nichtlebenden, zu einem Organismus mit dem Charakter eines kristallisierbaren Proteins und gleichzeitig einem Modellobjekt zur Kalibrierung der neuen Instrumente der Molekularbiologie wie Ultrazentrifuge, Elektrophorese und Elektronenmikroskop. Während der 1950er Jahre avancierte das Virus zu einem Modellobjekt für das Studium der Beziehungen zwischen Nukleinsäuren und Proteinen, der molekularen Assembly und des genetischen Codes.

---

<sup>2</sup> Lévi-Strauss, C.: *La pensée sauvage*, Paris: Plon, 1962, S. 35.

<sup>3</sup> Scholthof, K.-B. G., Shaw, J. G. & M. Zaitlin (Hg.): *Tobacco Mosaic Virus. One Hundred Years of Contributions to Virology*, St. Paul: APS Press, 1999.

In den vergangenen zwei Jahrzehnten schließlich wurde es zu einem Modell der gentechnologischen Resistenzerzeugung in Pflanzen.

Nun möchte ich noch kurz auf meinen zweiten Punkt eingehen. Soweit ich es sehen kann, werden Modellorganismen in der Medizin aufgrund eines prinzipiell anderen epistemologischen Regimes als in der biologischen Forschung ausgewählt, und sie spielen dort auch eine andere Rolle. Denn wenn biologische Modellorganismen aufgrund ihres Potentials zur Aufklärung von allgemeinen oder *ubiquitären Charakteristika* von Lebewesen zum Einsatz kommen, so selektiert man Modellorganismen in der medizinischen Forschung im allgemeinen aufgrund ihrer *spezifischen Nähe* zur menschlichen Kondition. Hier sind sie nicht Werkzeuge zur Schaffung eines allgemeinen biologischen Wissens, sondern sie sind vielmehr möglichst spezifische Substitute für das Experimentieren, und sie kommen aufgrund ihrer Besonderheit und Eignung in gerade dieser Hinsicht zum Zuge. Natürlich spielen auch hier bis zu einem gewissen Grad extrinsische Überlegungen eine Rolle – so zum Beispiel eine bequeme Versuchstierhaltung –, aber im wesentlichen stellt im medizinischen Bereich ein Modellorganismus epistemologisch ein Surrogat dar. Mäuse werden dazu verwendet, menschliche Krankheiten zu imitieren, und Probleme entstehen hier, wenn die Übereinstimmung zwischen dem Tiermodell und dem Menschen sich als defizient erweist. Ich wollte auf diesen Punkt als eine Herausforderung zum Nachdenken hinweisen, denn er deutet auf möglicherweise grundlegende Differenzen in biologischen und medizinischen Forschungstraditionen.

Das bringt mich zu einer abschließenden allgemeinen Bemerkung über Modelle. Modelle stehen in einem basalen Sinne niemals für sich selbst, sie sind immer Modelle für etwas anderes. Es liegt in der Natur der Modelle, daß sie in einer Repräsentationsbeziehung zum Modellierten stehen. Diese Beziehung ist nun genau der interessante Punkt. In Anlehnung an Georges Canguilhem, der einmal gesagt hat, daß Modelle konstitutiv auf der Ebene einer gewissen Verarmung arbeiten, habe ich argumentiert, daß Modelle genau so lange forschungsrelevant sind, als sie etwas zu wünschen übrig lassen.<sup>4</sup> Vom Standpunkt des Forschungsprozesses aus betrachtet sind und bleiben sie Modelle gerade so lange, wie die Repräsentationsrelation noch etwas im Unbestimmten liegt, noch etwas in der Schwebe ist. Wir brauchen sie als Modelle nur so lange, wie wir eben noch keine volle Kenntnis dessen haben, wofür sie stehen. Denn genau in dem Moment, in dem eine solche Gewißheit sich einstellt, kollabiert die Funktion des Modells. Dann nämlich ist der Punkt erreicht, da für diese bestimmte Frage kein Modell mehr nö-

---

<sup>4</sup> Vgl. Rheinberger, H.-J.: *Experimentalsysteme und epistemische Dinge. Eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas*, Göttingen: Wallstein, 2001.

tig ist. Hierin liegt auch der Grund dafür, daß wir Erbsen nicht mehr als Modelle für die Mendelschen Vererbungsbeziehungen brauchen – vielleicht mit Ausnahme von einführenden Lehrbüchern.

*Herfried Münkler*

## *Modelle im politisch-militärischen Bereich*

### *Vorbemerkung*

Die Modelle, um die es im politisch-militärischen Bereich geht, sind fast immer solche, die den wissenschaftlichen Beobachter und den politisch-militärischen Akteur zusammenführen, die das wissenschaftliche Beobachten orientieren und den Blick fokussieren, gleichzeitig aber auch die strategischen Akteure über ihre eigenen Optionen informieren, ebenso wie über die des Gegners. Politisch-militärische Modelle stellen also eine Verbindung zwischen der nachträglichen Rekonstruktion und vorausschauenden Prognose des Wissenschaftlers sowie der operativen Orientierung des Akteurs dar. Darin dürften sich diese Modelle von den anderen hier verhandelten Modelltypen unterscheiden. Ihre Funktion besteht im wesentlichen darin, die Fülle der für Entscheidungen notwendigen Informationen zu reduzieren und gleichzeitig Präferenzen für bestimmte Optionen aufzubauen. Sie sind also die Antwort auf ein Problem, das von Wolf Singer kürzlich als das der Planbarkeits- und Beherrschbarkeitsdefizite von Systemen aufgrund der nichtlinearen Dynamik lebensweltlicher Prozesse und der begrenzten kognitiven Fähigkeiten der Steuernden bezeichnet worden ist.

*I*

Wir alle kennen die Modelle einer Schlacht, etwa den berühmten Sandkasten mit Zinnsoldaten: Sie sind eine Veranschaulichung des situativ Fugitiven. Die Betrachter finden in ihnen entweder die Ausgangsdispositionen der beiden Seiten vor Beginn der Kampfhandlungen oder aber, was schwieriger und anspruchsvoller darzustellen ist, den Kulminationspunkt des Geschehens, also den Augenblick, in dem die Entscheidung zugunsten der einen oder der anderen Seite fällt. Aber der Kulminationspunkt des Kampfgeschehens läßt sich in der Regel nicht als reales Geschehen abbilden, sondern ist eine rekonstruktive Größe, die Verdichtung einer Fülle von Entwicklungen zu dem Punkt, an dem sich der Ausgang der Schlacht entscheidet. Für den operativen Planer hat das Modell der beiderseitigen Dispositionen freilich eine andere Funktion: Es ist die Sichtbarmachung der Optionen, die ihm und dem Gegner zur Verfügung stehen oder sich unter bestimmten

Bedingungen eröffnen können. Es ist die Visualisierung der sich in der Zeit entwickelnden Vorgänge im Raum. Im Modell antizipiert der Planer mögliche Verläufe des Geschehens. Er sucht die Kreativität des Gegners zu ergründen, um sie erfolgreich durchkreuzen zu können, und er schult die eigene Kreativität derart, daß sie für die Gegenseite überraschend und verwirrend ist.

Die Entwicklung solcher Modelle ist ein kriegs- wie militärgeschichtlich folgenreicher Vorgang: Er markiert den Übergang vom Heerführer zum Feldherrn.<sup>1</sup> Dieser Vorgang läßt sich auch als Komplementierung des reinen Kriegercharismas durch analytische und antizipatorische Rationalität von Intellektuellen beschreiben. Im Gefolge dieser Entwicklung wird dem Feldherrn ein Stab zur Seite gestellt, dessen Aufgabe in der Modellentwicklung und Modellpräzisierung, vor allem aber in der Modellbewirtschaftung besteht. Werden diese Schlachtenmodelle noch weiter abstrahiert und schematisiert, so lassen sie sich in Brettspiele übersetzen, in denen beide Seiten unter idealtypisch gleichen Bedingungen gegeneinander antreten. Diese Brettspiele dienen dem Training bei der Kombination von Rationalität und Spontaneität, der Verbindung von Gesamtüberblick und Konzentration auf begrenzte Entwicklungen: Bevor sie zu einer gesellschaftlichen Unterhaltung wurden, dienten sie der Ausbildung von *professionals* der Politik und des Krieges.<sup>2</sup>

## //

Im Modell, zumal im Brettspiel, dominiert eine starke Tendenz zur Symmetrierung beider Seiten. Dementsprechend sind auch die beiden Seiten verfügbaren Optionen symmetrisch. Politik- wie militärgeschichtlich ist Symmetrie jedoch extrem voraussetzungsvoll und darum eher unwahrscheinlich. Sie ist angewiesen auf spezifische politische, ökonomische und kulturelle Rahmungen, die nur unter bestimmten Bedingungen gegeben sind.

Durch Symmetrie wird das Gesetz des Handelns begrenzt. Das läßt sich zeigen an den Überlegungen, die Clausewitz in Buch I, Kapitel 1 seines Hauptwerks „Vom Kriege“ angestellt hat, als er drei Faktoren der Eskalation und drei Faktoren der Moderation der Gewaltanwendung voneinander unterschieden hat.<sup>3</sup> Dabei ist er von der Annahme ausgegangen, daß die Eskalationsfaktoren den konfligierenden Parteien tendenziell *gleicher-*

---

<sup>1</sup> Vgl. Münkler, H.: Das Blickfeld des Helden. Zur Darstellung des Römischen Reiches in der germanisch-deutschen Heldendichtung, Göppingen 1983, S. 73ff.

<sup>2</sup> Dazu Hilgers, P. von: Räume taktischer Kriegsspiele. In: Martus, S. u. a. (Hg.), Schlachtfelder. Die Codierung von Gewalt im medialen Wandel, Berlin 2003, S. 249–263.

<sup>3</sup> Siehe Clausewitz, C. von: Vom Kriege, 19. Aufl., hrsg. von W. Hahlweg, Bonn 1990, S. 192ff.

maßen zur Verfügung stehen. Nur unter dieser Voraussetzung ist davon auszugehen, daß die Faktoren der Moderation überhaupt ins Spiel kommen.

Symmetrische Verfügung über die Faktoren der Eskalation kann zu *Rüstungsspiralen* führen, ebenso aber auch zu einer Umstellung des Handelns auf Moderation, also zum Abschluß von *Rüstungsbegrenzungsabkommen*. Symmetrie ist die Bändigung des Unwahrscheinlichen, und vor allem führt sie zu einer Entdramatisierung der eigenen Informationsdefizite: Wir können das Handeln der Gegenseite antizipieren, ohne uns dafür alle wesentlichen Wissensvoraussetzungen verschaffen zu müssen. Das von Wolf Singer angesprochene Problem der Planbarkeits- und Beherrschbarkeitsdefizite von Systemen sowie der begrenzten Informationen und kognitiven Fähigkeiten der Akteure wird durch die auf Symmetrie gepolten Modelle entschärft. Modelle der Symmetrie sind also eine Methode – Methode, weil vollständige Symmetrie in der Realität selten gegeben ist, sie also *angenommen* werden muß –, um Informations- und Planbarkeitsdefizite beherrschbar zu machen. In der Regel kennen wir die Motive und Absichten der Gegenseite nur unzureichend. Feindaufklärung und Spionage haben die Funktion, dieses Nichtwissen zu minimieren. Aber die auf diese Weise zusammengebrachten Informationen sind bruchstückhaft und unzuverlässig. Erst durch ihre Einfügung ins Modell erlangen sie Bedeutung und Gewicht. Und wo Informationen fehlen, kann dies durch symmetrische Spiegelung kompensiert werden.

Modelle der Symmetrie begrenzen nicht nur die möglichen Optionen, sondern sorgen auch für eine Gleichverteilung von Zeit. In den im Laufe der letzten Jahre veröffentlichten Strategiestudien wird diesem Aspekt fast immer eine zu geringe Bedeutung zugemessen, was wahrscheinlich daran liegt, daß in diesen Studien Symmetrie durchweg als gegeben unterstellt wird.<sup>4</sup> Das mag für den klassischen zwischenstaatlichen Krieg zutreffend gewesen sein, galt aber schon nicht mehr für den Partisanenkrieg, wie er erstmals von den Spaniern gegen die napoleonische Besatzung geführt worden ist. Der entscheidende Effekt der Gleichverteilung von Zeit ist die Symmetrierung der Risikoperzeptionen wie der Rationalitätsstandards beider Seiten.

Dies wiederum ist die Voraussetzung dafür, daß der Lernprozeß beider (potentiellen) Konfliktparteien in symmetrischen Bahnen verläuft. So entstehen zwar Abstände und Vorsprünge einer Seite, die jedoch für die zurückgebliebene Partei bei entsprechenden

---

<sup>4</sup> So auch Luttwak, E.: *Strategie. Die Logik von Krieg und Frieden*, Lüneburg 2003.

Anstrengungen stets aufzuholen sind – zumal errungene Erfolge bei Militärapparaten zu Konservatismen führen, die der Gegenseite regelmäßig die Chance des Aufholens geben.<sup>5</sup>

Symmetrien müssen stabilisiert werden, um dauerhaften Bestand zu haben, und nur unter dieser Voraussetzung kann mit symmetrischen Modellen erfolgversprechend gearbeitet werden. Vorderhand lassen sich drei Bereiche nennen, die für die Aufrechterhaltung politisch-militärischer Symmetrien bzw. ihre Erosion von entscheidender Bedeutung sind: Ethos, Recht und Technologie.

- In einem bestimmten Ethos wird von den *professionals* der Kriegführung Symmetrie verinnerlicht. Nur gegen Gleiche zu kämpfen bringt Ehre, Ungleichartige zu bekämpfen dagegen Schande. In der europäischen Geschichte hat dieses Ethos im Begriff der Ritterlichkeit seinen Namen bekommen. Ritterlichkeit ist ethisierte Symmetrie.
- Im Kriegsrecht, insbesondere im *ius in bello*, wird dieses Ethos juristisch unterbaut: Symmetrien werden abstrahierend beschrieben und normiert; Asymmetrien werden entschärft, indem für die asymmetrisch Unterlegenen besondere Schutzvorschriften erlassen werden. Gewaltanwendung wird auf Kombattanten beschränkt, Nonkombattanten werden nach Möglichkeit von der Gewaltanwendung ausgenommen.
- In der Technologie des militärischen Geräts darf keine Seite einen Vorsprung erlangen, der sie für den Gegner unerreichbar und damit unangreifbar macht. Symmetrie beruht auf der relativen Gleichverteilung der Chancen zu töten und getötet zu werden, und die technologische Entwicklung stellt eine permanente Bedrohung dieser Gleichverteilung dar. Die Felder von Symmetrie und Asymmetrie werden durch jede *Revolution in Military Affairs* neu geordnet. Nur wenn mindestens zwei Akteure daran partizipieren, kann von Symmetrie gesprochen werden.

Während Ethos und Recht prinzipiell eher symmetriekonservierend sind, tendiert die technologische Entwicklung notorisch zur Auflösung von Symmetrien.

### III

Asymmetrische Konstellationen lassen sich modelltheoretisch ungleich schwerer erfassen als symmetrische. Sie beruhen auf einer nichtlinearen Vervielfachung der Optionen beider Seiten. Aus der Sicht der Akteure ist die Herstellung von Asymmetrien attraktiv,

---

<sup>5</sup> Dazu Rosen, S. P.: *Winning The Next War. Innovation and the Modern Military*, Ithaca, London 1991.

da sie geeignet ist, nachhaltige Vorteile zu verschaffen. Die Bildung von Imperien etwa beruht auf der strategischen Nutzung asymmetrischer Überlegenheiten. Im Imperium werden Asymmetrien auf Dauer angelegt.<sup>6</sup> Gleichzeitig führen Asymmetrien aber auch zur Verselbständigung von Bedrohungsängsten, die präventive Eskalationen zur Folge haben. Befördern Symmetrien kalkulierende Rationalität, die in entsprechenden Modellen inkorporiert wird, so setzen Asymmetrien Beherrschungs- wie Bedrohungsphantasien frei, und da eine modelltheoretische Domestikation von Asymmetrie kaum möglich ist, haben Bedrohungsphantasien und korrespondierende Sicherheitsneurosen auch eine tendenzielle Berechtigung. Gegnerisches Handeln ist unter asymmetrischen Bedingungen nicht antizipierbar; Ort und Zeitpunkt des Angriffs sind nicht vorhersehbar. Die Eskalationsdynamik von Asymmetrien ist somit eine grundlegend andere als die von Symmetrien. Dementsprechend sind symmetrische Modelle auf sie nicht anwendbar. Die modelltheoretische Vergegenwärtigung von Asymmetrien ist gegenwärtig eines der größten Probleme der politischen Theorie wie der politisch-militärischen Praxis.

Freilich folgen auch asymmetrische Akteure erkennbaren Rationalitäten. So geht es der asymmetrisch überlegenen Seite darum, den errungenen Vorsprung aufrechtzuerhalten und auszubauen. Sie führt Kriege nicht nur, um einen bestimmten Gegner zu besiegen, sondern um potentiellen Gegnern deutlich zu machen, daß für sie gewaltsames Gegenhandeln aussichtslos ist. Abschreckung besteht also nicht mehr, wie unter symmetrischen Konstellationen, in der Bereitstellung eines militärischen Apparats, der den Erfolg eines Angriffs unwahrscheinlich, zumindest fraglich macht, sondern in der gelegentlichen Führung von Kriegen, die einer unbestimmten Anzahl potentieller Gegner die unendliche Überlegenheit, zugleich aber auch Entschlossenheit, von ihr Gebrauch zu machen, vor Augen führt.

Demgegenüber läuft die strategische Rationalität der asymmetrisch unterlegenen Seite darauf hinaus, die Konfrontation mit dem überlegenen Militärapparat der Gegenseite nach Möglichkeit zu meiden und den Angriff auf Bereiche zu konzentrieren, in denen das Maß der Überlegenheit entweder geringer ist oder in denen die sonstige Überlegenheit sogar in Schwäche umschlägt. Ein Beispiel dafür ist die labile psychische Infrastruktur der westlichen Welt, die leicht anzugreifen und schwer zu schützen ist. Zur Asymmetrie gehört in diesem Fall auch, daß vergleichbare Angriffe gegen die Zivilbevölkerung der Herkunftsländer der (terroristischen) Akteure nicht in Frage kommen, weil dies – erstens – den Werten und dem Selbstverständnis westlicher Gesellschaften nicht entspricht und

---

<sup>6</sup> Dazu Münkler, H.: Imperien. Die Logik der Weltherrschaft vom Alten Rom bis zu den Vereinigten Staaten, Berlin 2005.

weil es – zweitens – keine identifizierbare Zivilbevölkerung gibt, die mit dem terroristischen Netzwerk so eng verbunden ist wie reguläres Militär mit den Bürgern eines Staates. Die Formierung von Kriegsakteuren in Form von Netzwerken, also ohne feste Territorialität, ist danach ein weiterer Schritt der Asymmetrierung. Das muß hier nicht weiter ausgeführt werden.<sup>7</sup>

Auch wenn asymmetrische Konstellationen vorerst nicht in einem Modell gefaßt werden können, zeigt doch die Beschreibung der jeweiligen Handlungsrationaltäten überlegener wie unterlegener Akteure, daß hier die Optionen beider Seiten unendlich viel größer sind als unter den Bedingungen von Symmetrie.<sup>8</sup> Daraus dürften zusätzliche Risiken erwachsen. Ob sie modellanalytisch zu begrenzen sind, wird sich zeigen.

---

<sup>7</sup> Dazu ausführlich Münkler, H.: Wandel der Weltordnung durch asymmetrische Kriege. In: Schröfl, J. & T. Pankratz (Hg.), *Asymmetrische Kriegführung – ein neues Phänomen der Internationalen Politik?*, Baden-Baden 2004, S. 85–93; ders.: Ältere und jüngere Formen des Terrorismus – Strategie und Organisationsstruktur. In: Weidenfeld, W. (Hg.), *Herausforderung Terrorismus. Die Zukunft der Sicherheit*, Opladen 2004, S. 29–43.

<sup>8</sup> Dazu Beyerchen, A.: Clausewitz, Nonlinearity, and the Unpredictability of War. In *International Security* 17 (1992) 3, S. 59–90.

Peter Költzsch

## *Zum Problem der Modelle aus der Sicht der Technikwissenschaften\**

Im folgenden sollen aus dem Bereich der Technikwissenschaften Antworten zu den Quæstiones disputatae (vgl. Rundbrief, S. 9ff.) gegeben werden, und zwar insbesondere zu:

Sind es Vorstellungen und Bestandteile unserer Lebenswelt, die wir zur Modellbildung verwenden? Wer ist der Richter darüber, daß ein Modell sich dem Ziel der Erkenntnis „angenähert“ hat? Ist ein überprüftes, adäquates Modell die „wissenschaftliche Wahrheit“ und damit das Produkt und Ziel der Wissenschaft? Was macht die Wissenschaft mit den Modellen?

In den Technikwissenschaften werden Modelle weitestgehend aus der realen „Lebenswelt“ abgeleitet. Wir unterscheiden dabei im wesentlichen folgende Modelltypen:

- Physikalisch ähnliche Modelle
- Physikalisch analoge Modelle
- Funktionsmodelle
- Computermodelle

### *1 Physikalisch ähnliche Modelle*

Vom gegenständlichen bzw. ideellen, fiktiven Original (Wirklichkeit) wird ein gegenständliches Modell in derselben physikalischen Grundqualität abgeleitet, zum Beispiel ein Innenraummodell der historischen Semperoper Dresden für akustische Messungen im Modellmaßstab (siehe Abb. 1).

Als weitere Beispiele aus der akustischen Praxis der letzten Jahre lassen sich die Modelle eines Konzertsaaes, eines Schalldämpfers für ein Gasturbinenkraftwerk, eines Hubschraubers bzw. eines Flugzeuges und dessen Komponenten (z. B. Tragflügel) sowie das Modell eines Tunnels mit Kraftfahrzeugverkehr anführen.

---

\* Der vorliegende Beitrag beruht auf einem Vortrag, der im Februar 2003 in der Sitzung der Mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse gehalten wurde. Er war nicht Gegenstand des Streitgespräches. Er wurde zusätzlich in die Dokumentation aufgenommen.



Abbildung 1  
Raumakustisches Modell der historischen Semperoper (Maßstab 1:20)

Folgende Merkmale charakterisieren diese physikalisch ähnlichen Modelle: Es handelt sich nicht (nur) um Strukturmodelle und um Modelle, die in Ausnahmefällen zu ästhetischen Beurteilungen genutzt werden, sondern vor allem um operationelle Modelle, an denen „gearbeitet“ wird. Sie dienen zum Experimentieren, zur Untersuchung des Funktionsablaufes, zur exakten Messung und zur experimentellen Optimierung. Diese Modelle sind von gleicher physikalischer Grundqualität wie das Original. Es werden dabei nicht nur Geometrien modelliert (im allgemeinen: Verkleinerung), sondern auch Zeiten, Frequenzen, Strömungsgeschwindigkeiten, Fluideigenschaften, Werkstoffgrößen, Temperaturen und anderes mehr. Die Modelle unterliegen Zwangsbedingungen für ihre geometrische und physikalische Gestaltung, das heißt, die sogenannten Ähnlichkeitskennzahlen  $\pi$  müssen im Original und im Modell denselben Zahlenwert besitzen ( $\pi = \text{idem}$ ). In der Praxis kann meist nur partielle Ähnlichkeit realisiert werden. Die Ergebnisse der im Modell durchgeführten Experimente werden mit Hilfe der Ähnlichkeitskennzahlen ( $\pi = \text{idem}$ ) auf die Funktionsgrößen umgerechnet, die für das fiktive Original erwartet werden können.

## 2 Physikalisch analoge Modelle

Vom gegenständlichen bzw. ideellen, fiktiven Original (Wirklichkeit) wird ein gegenständliches oder ideelles Modell in einer anderen physikalischen Grundqualität abgeleitet, das heißt, es findet ein Wechsel der physikalischen Ebene statt. Als Beispiel sei die Analogie zwischen einem akustischen, einem mechanischen und einem elektrischen Netzwerk genannt (siehe Abb. 2).

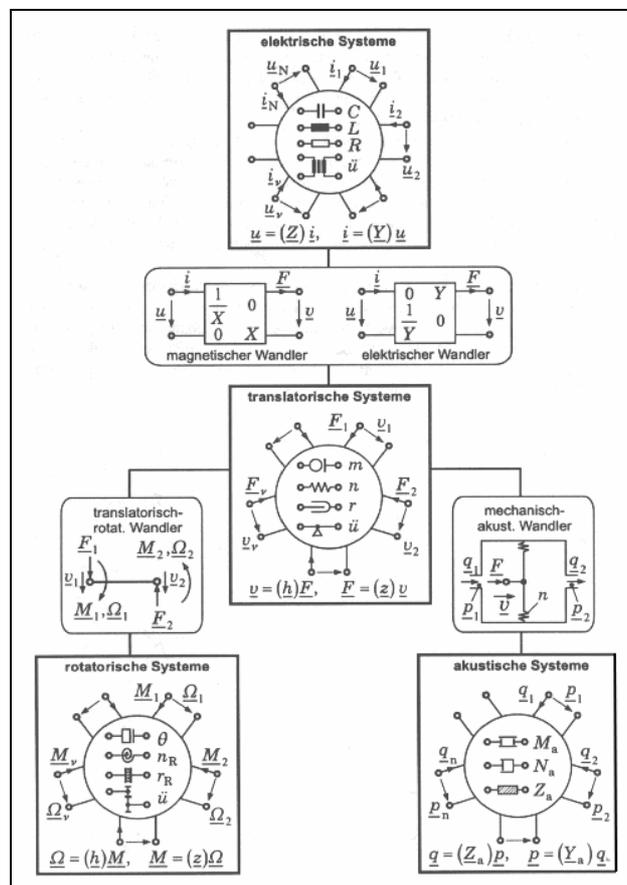


Abbildung 2  
Analoge Netzwerkstrukturierung linearer dynamischer Systeme (nach Lenk)

Aus dem Bereich der Strömungsmechanik und der Akustik können weitere Beispiele angeführt werden: Die Analogie zwischen dem Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch in der Strömungsmechanik bzw. Verfahrenstechnik, die Analogie zwischen der dreidimensionalen Schallausbreitung in Fluiden und den zweidimensionalen Oberflächenwellen im Flachwasserbecken (aktuelle Nutzung z. B. bei der physikalischen Erklärung der Schallerzeugung von Hubschrauberrotoren) sowie die sogenannte Seifenhautanalogie, die die Höhenkoordinate einer gespannten Seifenhaut und die Stromfunktion einer ebenen, hydrodynamischen Potentialströmung in ein analoges Verhältnis setzt.

Diese physikalisch analogen Modelle werden durch folgende Merkmale charakterisiert: Auch hier handelt es sich um strukturelle und operationelle Modelle. Sie sind jedoch im Gegensatz zu den physikalisch ähnlichen Modellen von unterschiedlicher physikalischer Grundqualität. Allerdings besitzen sie – und das begründet ihre analoge Betrachtungsweise – die gleiche Struktur in den beschreibenden Differentialgleichungen und in den Randbedingungen. Sie kombinieren damit Erkenntnisgebiete aus grundverschiedenen Bereichen der Physik: Zum Beispiel verbinden sie bei Betrachtung eines Resonators die Grundgrößen der Elektrotechnik mit den Grundgrößen mechanischer Wellenleiter und den Grundgrößen eines Schallfeldes.

Die Modelle unterliegen Zwangsbedingungen für ihre geometrische und physikalische Gestaltung (Analogiebeziehungen). Die analogen Modelle können als gegenständliche Modelle, als fiktive Netzwerkmodelle oder als Computermodelle realisiert werden.

Das Arbeiten mit dem analogen Modell bedeutet seine Auslegung, die Durchführung von Experimenten am Modell (gegenständlich oder fiktiv) sowie die Rückübertragung der „Betriebsergebnisse“ vom Modell auf das zu gestaltende, fiktive Original.

### *3 Funktionsmodelle*

Vom gegenständlichen bzw. ideellen, fiktiven Original (Wirklichkeit) wird ein Funktionsmodell geschaffen, das „lediglich“ den in der betreffenden Struktur stattfindenden Vorgang modelliert, zum Beispiel die Modellierung der Raumakustik eines Konzertsaaes durch ein synthetisches Schallfeld im schalltoten Raum (siehe Abb. 3).

Folgende Merkmale kennzeichnen die Funktionsmodelle: Aus der Realität wird nur der Vorgang an sich modelliert, nicht aber die tatsächliche Struktur. Damit kann einseitig die Funktion des Vorganges optimiert werden. Es erweist sich aber für die Praxis als unabdingbar, Funktion und Struktur für eine Optimierung des realen Vorganges letztendlich gemeinsam zu betrachten.



Abbildung 3

Großer schallreflexionsarmer Raum mit synthetischem Schallfeld, hier mit einem Versuchsaufbau zur subjektiven Ermittlung der scheinbaren Quellbreite (nach Blau)

#### 4 Computermodelle

Vom gegenständlichen bzw. ideellen, fiktiven Original (Wirklichkeit) wird für einen Wirklichkeitsausschnitt ein abstraktes physikalisches Modell geschaffen, zu dessen Beschreibung eine mathematische Abbildung (mathematisches Modell) dient. So führt zum Beispiel das physikalische Modell eines realen Strömungsvorganges bei bestimmten Voraussetzungen zur mathematischen Abbildung in Form der Navier-Stokes-Gleichungen, die das physikalisch modellierte Strömungsfeld beschreiben.

Die mathematische Abbildung stellt also das Raum-Zeit-Verhalten der relevanten physikalischen Größen unter bestimmten Anfangs- und Randbedingungen dar.

Die mathematischen Gleichungen werden gelöst, die Ergebnisse werden mit Meßwerten validiert. Damit wird auch die gewählte physikalische/mathematische Modellbildung bewertet.

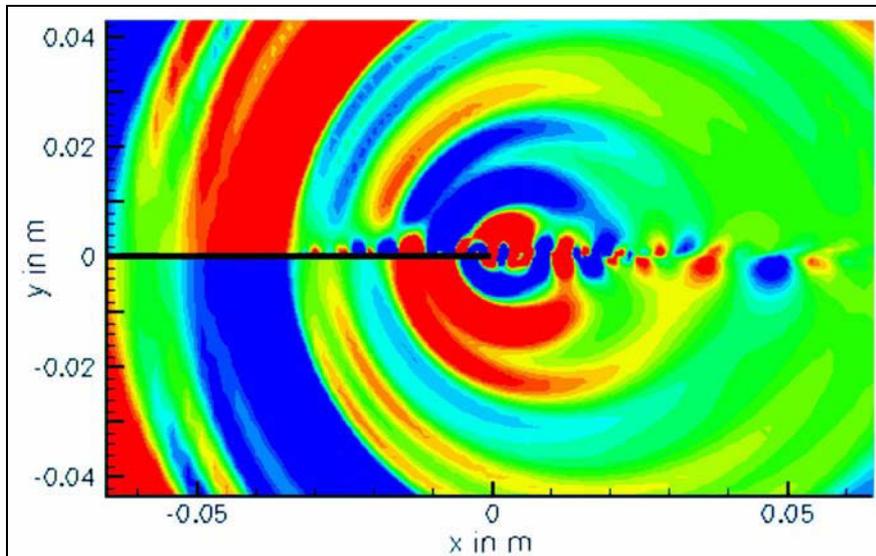


Abbildung 4  
Computersimulation der Schallerzeugung an der Hinterkante  
einer von links überströmten Platte (nach Bauer)

Charakterisiert werden diese Computermodelle durch folgende Eigenschaften: Es sind physikalisch-mathematische Abbildungen der Wirklichkeit, die durch Differentialgleichungen beschrieben werden. Die numerischen Simulationen am Computermodell schaffen damit virtuelle Realisationen der Wirklichkeit in der Form der Modellnachbildung. Die mit Hilfe der modernen Computertechnik möglichen Visualisierungen führen scheinbare Abläufe des wirklichen Geschehens vor. Die damit verbundene Bildhaftigkeit des Modellvorganges bewirkt stark faszinierende, aber eben pseudoreale Darstellungen der tatsächlichen physikalischen Vorgänge (siehe Abb. 4).

Die ständig anwachsenden Leistungen der Computer, insbesondere hinsichtlich Rechengeschwindigkeit und Speichervermögen, führen dazu, daß die Abstraktionen der Modelle immer wirklichkeitsnäher gestaltet werden können.

Allerdings gibt es gegenwärtig (mindestens) zwei Nachteile der Computermodelle bzw. -simulationen: einerseits die Verführung, hinter den Visualisierungen der Modellergebnisse die Wirklichkeit zu sehen. Dabei handelt es sich jedoch um eine Täuschung, der der Laie, die Öffentlichkeit und der Außenstehende erliegen. Andererseits gibt es Schwierigkeiten, die durch die Computermodelle und die numerischen Lösungen der Differentialgleichun-

gen selbst erzeugt werden, zum Beispiel Raum-Zeit-Diskretisierung, Stabilitätsprobleme, Einfluß leicht variierender Anfangsbedingungen, nichtphysikalische Wirkung der Ränder, Dämpfungen, Genauigkeit der Berechnung und anderes mehr. So führen beispielsweise die Ungenauigkeiten im strömungsmechanischen Computermodell der numerischen Aeroakustik zu verfahrensbedingten, scheinbaren Schallquellen, das heißt, es wird „numerisch“ Lärm erzeugt. Das numerische Verfahren erzeugt künstlichen Lärm, das Computermodell wird zur Schallquelle und schafft damit neue Wirklichkeiten!

### 5 Beispiel: Modellierungen in der Raumakustik

Am Beispiel der Raumakustik für einen Konzertsaal soll gezeigt werden, daß zu einem Problem der Wirklichkeit mehrere, sehr verschiedenartige Modellvarianten existieren, daß die Wege der Modellierung also vielfältig sein können. Alle Modelle dienen jedoch einem Zweck, nämlich der Gestaltung der sogenannten „guten Akustik“ des Konzertsales.

*Experimentelle raumakustische Modellmeßtechnik mit physikalisch ähnlichen Modellen:*

- Helmholtz-Zahl  $He = idem$
- Verkleinerung der Geometrie des Raumes und der Schallwellenlängen, das heißt reziproke Frequenztransformation zum geometrischen Verkleinerungsmaßstab
- üblicher Maßstab: 1:20
- Impulsmeßmethode
- Akustische Modellierung der Reflexion/Absorption an den Raumboberflächen
- Schallquellen: Knallfunkensender mit wählbaren Abstrahlcharakteristiken
- Empfänger: Modellkunstkopf, mit zwei Schalldruckempfängern
- Aufnahme von Raumimpulsantworten
- Berechnung der gewünschten raumakustischen Kriterien (z. B. Nachhallzeit, Deutlichkeitsmaß u. a.)
- Möglichkeit der Auralisation („Hineinhören“ in das Modell)
- Modell und Versuche: sehr teuer, zeitaufwändig
- Vorteile: Anschaulichkeit des Modells, wodurch die Zusammenarbeit der Akustiker mit dem visuell orientierten Architekten verbessert wird
- Optimierung von Details, zum Beispiel Neigung von Wand- und Deckenabschnitten, Oberflächengestaltung
- Physikalisch exakte Nachbildung von Beugungs- und Streuvorgängen (Problemfälle der Computersimulation)

*Experimentelle raumakustische Modellmeßtechnik mit physikalisch analogen Modellen:*

- Wasserwellenmodelle: (siehe z. B. bei Cremer),
- Grundlage: Analogie zwischen den Oberflächenwellen im Flachwasser und der Schallausbreitung in Luft
- Beobachtung in der Schnittebene des Raumes (zweidimensional)
- Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wasserwellen: (20...30) cm/s, zeitlicher Ablauf kann mit dem Auge verfolgt werden
- Günstigste Wasserhöhe: (7...8) mm
- Aufnahme der Wellenbilder von den Reflexionen in zeitlich versetzten Augenblicken ergibt einen groben Überblick über die Wellenfronten

*Computersimulation mit dreidimensionalen (digitalisierten) Raummodellen*

- Geometrische Raumakustik
- Spiegelquellenmethode, Strahlverfolgungsverfahren (ray tracing), Schallteilchensimulationsverfahren (Monte Carlo)

Ziele:

- Raumimpulsantwort
- Auralisation: Hörbarmachung des Schallfeldes am Ort des Zuhörers im virtuellen Raum, erfolgt mit Raumimpulsantworten, mit „trocken“ (echofrei) aufgenommenen Schallsignalen (z. B. Musik) sowie mit Ohrübertragungsfunktionen, ermöglicht das „Hineinhören“ in fiktive Räume (nur im Rechner existent)

*Synthetisches Schallfeld als elektroakustisch produziertes Funktionsmodell (Modellschallfeld) des Raumes*

- Nachbildung natürlicher Schallfelder mit elektroakustischen Anlagen im reflexionsarmen (schalltoten) Raum (z. B. „Klonen“ der Semper-Oper nach Kraak)
- Erzeugung eines synthetischen Schallfeldes mit Hilfe von Lautsprechern

Vorteil:

- Systematische Änderungen einzelner Schallfeldkomponenten
- subjektive Beurteilung des Einflusses dieser Änderungen auf die raumakustische Qualität

## Zusammenfassung

Modelle in den Technikwissenschaften werden im allgemeinen aus der Wirklichkeit abgeleitet. Sie gehören sowohl zur Kategorie „Modell von etwas“ (Pinkau: Modell als vereinfachter Vertreter der Außenwelt) als auch zur Kategorie „Modell für etwas“ (Pinkau: Modelle als Hilfsmittel auf dem Weg zur Wirklichkeit).

Modelle in den Technikwissenschaften sind, auch wenn es sich häufig – wie in der Architektur und im Bauwesen – um gegenständliche Modelle handelt, immer operationelle Modelle, das heißt, an ihnen wird experimentiert, simuliert, gemessen. Es gibt in den Technikwissenschaften sogar reine Funktionsmodelle, die von der Struktur der Wirklichkeit entkleidet sind.

Modelle in den Technikwissenschaften unterliegen starken Zwangsbedingungen. Betroffen sind davon die Abbildung der Wirklichkeit in das Modell, die Prozeßbedingungen und der Prozeßablauf, die Computersimulationen und auch die experimentelle Nachprüfung. Das drückt sich sowohl in den Bedingungen der physikalischen Ähnlichkeit ( $\pi = \text{idem}$ ) aus als auch in den analogen Beziehungen bzw. der mathematischen Abbildung (z. B. Differentialgleichungen) für die physikalische Modellierung. Dabei verfügt die subjektive Gestaltung nur über geringe Einflußmöglichkeiten, so zum Beispiel bei der pragmatischen Entscheidung für eine partielle Ähnlichkeit gegenüber einer nur theoretisch möglichen, vollständigen physikalischen Ähnlichkeit. Offensichtlich ist aber diese subjektunabhängige Stringenz der Modellbildung der „Preis“ (der gern gezahlt wird!) für die „sehr genauen“ Lösungen der Probleme der Wirklichkeit mit Hilfe der Modellbildung in den Technikwissenschaften.

Als „Richter“ darüber, inwieweit sich ein Modell weiterentwickelt und dabei dem Ziel der Erkenntnis angenähert hat, also die Wirklichkeit nachbildet, entscheidet in den Technikwissenschaften einzig und allein das Experiment, das heißt die meßtechnische Nachprüfung am Original (Wirklichkeit).

Es gibt zahlreiche, grundsätzlich unterschiedliche Möglichkeiten der Modellbildung. Selbst bei einem Problem ist es meist zweckmäßig, verschiedenartige Möglichkeiten der Modellbildung zu realisieren und die dabei gewonnenen Erkenntnisse zur optimalen Gestaltung des Gegenstandes oder Prozesses zu kumulieren (siehe obengenanntes Beispiel der „guten Akustik“ eines Konzertsaaes).

In den Technikwissenschaften schaffen die verschiedenartigen Modellbildungen häufig neue Wirklichkeiten, die als Hindernisse oder auch als Vorteile beim Erkenntnisprozeß auftreten können.

## Diskussion

### Vorbemerkung

Das akademische Gespräch „Modelle in der Wissenschaft“ wurde eröffnet durch „einführende“ Vorträge von Horst Bredekamp (etwa 30 Minuten Dauer) sowie Martin Quack und Jürgen Ehlers (je etwa 15 Minuten Dauer). Unmittelbar im Anschluß an diese Vorträge sollten Fragen zur inhaltlichen Klärung gestellt und beantwortet werden.

Das eigentliche Gespräch sollte die Form der *Quæstiones disputatae* haben und seine Struktur aus der Beantwortung der folgenden Fragen beziehen:

#### *Quæstiones disputatae zum Thema Modelle*

*Erste Frage:* Sind es Vorstellungen und Bestandteile unserer Lebenswelt, unseres täglichen Umgangs, die wir zur Modellbildung verwenden? Wie werden Modelle weiterentwickelt, wer ist der Richter darüber, daß ein Modell und seine Fortentwicklung adäquat sind, das heißt sich zum Beispiel dem Ziel der Erkenntnis „angenähert“ haben?

*Zweite Frage:* Ist ein überprüftes, adäquates Modell die „wissenschaftliche Wahrheit“ und damit das Produkt und Ziel der Wissenschaft? Sind die Modelle unabhängig von den Menschen, die sie entwickeln, haben sie deshalb eine allgemeine Bedeutung? Ist die „wissenschaftliche Wahrheit“ kumulativ?

*Dritte Frage:* Was macht die Wissenschaft mit den Modellen? Kann die Fesselung überwunden werden, und wie?

Zu Frage 1 folgten die „eingeladenen Kurzdarstellungen“ von Detlev Ganten, Wolfgang Klein und Eberhard Knobloch, zu Frage 2 von Heinz Duddeck und Jürgen Mittelstraß und zu Frage 3 die Beiträge von den Hans-Jörg Rheinberger und Herfried Münkler. Die Diskussion in Form „Spontaner Beiträge“ ermöglichte eine Diskussionsbeteiligung aller Mitglieder.

Diese Diskussion ist nicht den ursprünglichen Vorstellungen gefolgt. Vielmehr brach sofort nach Beendigung der „einführenden Vorträge“ eine inhaltliche Diskussion aus, die dann nur mühsam in die Disziplin der *Quæstiones* gebracht werden konnte. Die folgende Dokumentation ist daher der Bericht über ein Experiment, so wie es stattgefunden hat. Vor dem Hintergrund einer lebendigen Darstellung des akademischen Streitgespräches wird die Diskussion weitgehend wörtlich wiedergegeben. Wir haben uns nicht

dazu entschließen können, die Individualität der Beiträge durch ihren Einbezug in einen narrativen Text zum Verschwinden zu bringen.

**Klaus Pinkau**, Leiter der Diskussion, eröffnet die Sitzung:

In der heutigen Veranstaltung geht es darum, die Denkansätze und Denkstrukturen bloßzulegen, die in den verschiedenen Wissenschaften, in den verschiedenen Disziplinen am Anfang unserer wissenschaftlichen Arbeit stehen. Um das zu realisieren, haben wir das Problem in einem Rundbrief vom 12. November 2003 an die Mitglieder (vgl. S. 9ff.) beschrieben und wollen uns heute vornehmen, die dazu auftretenden Fragen und Problemstellungen gemäß den drei großen, Ihnen bekannten Fragenkomplexen zu behandeln.

Die Struktur unserer Veranstaltung folgt dem Vorschlag der Geisteswissenschaftlichen Klasse: Zu jeder Frage sind zwei oder manchmal auch drei eingeladene Kurzbeiträge von fünf Minuten Dauer vorgesehen. Der Rest der Diskussionszeit ist für spontane Beiträge freigehalten – Fragen, Statements, die hier aus der Versammlung an den jeweiligen Vorsitzenden gestellt werden können.

(Beschluß: Die Versammlung stimmt dem Vorschlag Klaus Pinkaus zu, die Veranstaltung zu dokumentieren und auf Magnetband aufzuzeichnen.)

Nach den Vorträgen von **Horst Bredekamp**, **Martin Quack** und **Jürgen Ehlers** eröffnet **Klaus Pinkau** die Diskussion:

**Klaus Lucas**: Anhand der naturwissenschaftlichen Beiträge ist mir noch einmal deutlich geworden, daß die Frage nach dem Realitätsgehalt der Modelle möglicherweise so gar nicht gestellt werden kann. Wenn ich insbesondere an die mechanischen Molekülmodelle, die Herr Quack uns vorgestellt hat, denke, dann weiß ich, daß Moleküle keine mechanischen Gebilde im eigentlichen Sinne sind. Sie stellen eher Ladungswolken, also hoch dynamische Gebilde dar. Andererseits wissen wir, wenn wir die klassische oder auch die Quantenmechanik auf solche Abstrakte anwenden, daß wir Eigenschaften errechnen, die in perfekter Übereinstimmung mit dem Experiment stehen. Etwa die Wärmekapazität bei Rotationsfreiheitsgraden und dergleichen, die wir in den Ingenieurwissenschaften sehr oft brauchen. Das heißt, es kommt wohl darauf an, welche Fragen wir im einzelnen stellen, um zu entscheiden, ob ein Modell adäquat ist oder nicht; so daß doch vielleicht die Frage entsteht, ob das Modell ein Abbild der Realität ist oder ob es in all seiner Unvollkommenheit in der Lage ist, gewisse Aspekte der Realität abzubilden, wenn wir es denn richtig anwenden.

**Martin Quack:** Selbstverständlich. Heute ist es so, daß die Chemiker zwar diese alten Modelle praktisch tagtäglich weiter benutzen, aber die Begründung dafür hat sich geändert: Wir halten diese Modelle für Näherungen der Theorie, das heißt, die Theorie kann gleichsam vereinfacht werden, und dann ist ein solches Modell ein Abbild einer vollständigen Theorie. Wobei sich nunmehr wiederum die Frage stellt, ob diese Theorie richtig ist – nach meinem Dafürhalten eine sehr gefährliche Frage.

**Jürgen Ehlers:** Eine Bemerkung zur Realität von Theorien bzw. Modellen. Wenn wir sagen, „die Temperatur im Zentrum der Sonne beträgt 15.000.000 Grad“, so bedeutet das: Die Anwendung physikalischer Gesetze auf ein Gaskugel-Modell der Sonne ergibt zusammen mit einigen Meßwerten diese Zentraltemperatur. Insofern dieser Wert auch zu anderen Folgerungen und Meßdaten paßt, betrachten wir ihn als eine Aussage über den „wirklichen“ Zustand des Sonneninneren.

Von einer Ähnlichkeit des Modells mit der Wirklichkeit kann man nicht sprechen, denn das Innere der Sonne ist uns nicht anders zugänglich als über die Konstruktion eines Modells mittels Theorie und Messung.

**Klaus Pinkau:** Erstaunlich ist es aber doch, um auf Herrn Lucas' Frage nochmals einzugehen, daß Modelle, die im Zusammenhang mit einer spezifischen Fragestellung entwickelt worden sind, plötzlich Antworten geben auf Fragen, die damit überhaupt nicht mehr zusammenhängen. Und daraus entwickelt sich dann doch schon das Gefühl oder die Begründung für einen gewissen Realitätsgehalt.

**Christoph Marksches:** Herr Bredekamp hat die Modellbildung der Kunstgeschichte und der Biologie in dem Punkt verglichen, daß eine ungeheure Menge von Phänomenen durch ein Modell abgebildet werden kann und hat dazu eindruckliche Zahlen aus dem Thieme/Becker vorgetragen. Mir scheint ein weiterer Vergleichspunkt zu sein, daß Modelle auch gebildet werden, weil die Zahl der Phänomene so gering ist; weil zum Beispiel aus archäologischen Phasen so wenig Dinge vorhanden sind und sich so wenig beobachten läßt. Und das trifft dann den Quackschen Punkt des „vermuteten Bildes“. Mir scheint – um es zusammenzufassen –, daß Modelle gebildet werden, wenn die Zahl der Phänomene ungeheuer groß ist; sie werden aber auch sehr häufig entwickelt – und das verbindet Natur- und Geisteswissenschaften –, wenn die Zahl der Phänomene nicht ausreicht.

**Helmut Schwarz:** Ich glaube, der Zusammenhang zwischen den Vorträgen von Bredekamp, Quack und Ehlers ist sehr viel enger, als man es gemeinhin annimmt. Denn

auch die Naturwissenschaft beschreibt nicht die Wirklichkeit. Die Naturwissenschaft beschreibt die Bilder, die wir uns von der Realität machen. Nicht mehr und nicht weniger. Und deshalb gibt es auch je nach Art der Fragestellung, je nach Art des Experimentes verschiedene Antworten. Aber sie beschreiben nicht die Wirklichkeit.

**Mitchell G. Ash:** Ich denke, diese Diskussion ist zum Teil – vielleicht zu einem wesentlichen Teil – eine Diskussion über das Verhältnis von Medium und Gegenstand. Ich erinnere an die Formulierung von Boltzmann – die uns geschickt wurde –, ein Modell wäre „a tangible representation“ von etwas. Das meine ich hier. Das Interessante dabei ist, dass nicht alle „tangible representations“ im selben Verhältnis zum Gegenstand stehen. Weniger abstrakt formuliert: Man kann im allgemeinen zwischen Modellen ‘von etwas’ und Modellen ‘für etwas’ unterscheiden.

Das ist in der Wissenschaftstheorie geläufig. Modelle ‘von etwas’ wären zum Beispiel die Flugzeugmodelle, die kleine Jungs früher sehr oft gekauft oder sich haben kaufen lassen – es gibt sie immer noch. Dies sind jedenfalls maßstabgetreue Repräsentationen, eben „tangible representations“ von einem Gegenstand, so wie das Modell von St. Peter auch bei Herrn Bredekamp sein sollte – zumindest in der Intention.

Die mathematischen Modelle, von denen Herr Ehlers gesprochen hatte, sind das aber eben gerade nicht. Sie sind Modelle ‘für etwas’ und nicht Modelle ‘von etwas’. Genauer formuliert im Sinne der Unterscheidung, die ich eingangs machen wollte: Mathematische Ableitungen werden nach den Regeln der Mathematik formuliert und sind eben gerade daher keine Abbildungen von physikalischen oder chemischen Vorgängen.

**Jürgen Ehlers:** Mir scheint, daß die Unterscheidung von Modellen ‘von etwas’ und ‘für etwas’ wohl von den meisten meiner Kollegen und auch von mir so nicht angenommen werden würde. Die Modelle der Atome, die ich skizziert habe, werden aufgefaßt als Modelle *für etwas*, das es in der Wirklichkeit gibt.

Mir ist klar, daß dieses Reden von Wirklichkeit problematisch ist und man könnte sich wissenschaftstheoretisch lange darüber unterhalten. Aber derjenige, der in einem Laboratorium mit Atomen experimentiert, sieht sich einem Naturgegenstand gegenüber. Dieser Naturgegenstand wird in seiner formalen quantitativen Struktur durch die Quantenmechanik erfaßt. Insofern hat es einen Sinn zu sagen, das sind Modelle *für etwas*, für bestimmte Naturgegenstände.

**Mitchel G. Ash:** Das habe ich aber gerade sagen wollen. Sie sind jedoch nicht Modelle von diesen Gegenständen.

**Martin Quack:** Damit bin ich aber nicht ganz einverstanden, daß man sagt, das Modell ist ein Bild, aber wie ich mein Bild male, da bin ich frei. Ich habe hier die Bilder gezeigt, die im 19. Jahrhundert von den Molekülen gemacht wurden, die man sich auch sehr leicht wie Ihre Flugzeugmodelle vorstellen kann. Aber im Prinzip, wenn man diese auf Papier malt, sind sie zunächst einmal – und auch Berzelius hat darauf immer bestanden – sehr viel abstrakter gemeint. Wenn ich aber in dieser Weise abstrahieren kann, dann kann ich auch die Schrödingergleichung hinschreiben und als Bild dieser Moleküle auffassen. Es ist mir nicht verboten! Herr Ehlers hat die Schrödingergleichung aufgeschrieben. Das kann ich ebenso für ein Molekül tun, und das ist dann ein Abbild. Wenn man als theoretischer Physiker daran gewöhnt ist, mit solch abstrakten Gebilden zu operieren, dann kann man sich darunter auch etwas vorstellen – und das wird sehr „tangible“.

**Wolfgang Klein:** Ich möchte dieser letzten Frage eine etwas andere Wendung geben, nämlich: Wie zwangsläufig sind eigentlich Modelle? Nicht wie richtig sind sie, sondern wie zwangsläufig könnte man sich ganz andere Modelle vorstellen. Und ich will das aufgreifen anhand der Rechts-Links-Asymmetrien, von denen Herr Quack gesprochen hat.

Es gibt einen Bereich, in dem rechts-links relativ gut definiert ist: die Sprache. Interessant ist zunächst einmal, daß es sehr viele Sprachen gibt, die diesen Unterschied nicht kennen. Zur Richtungsbestimmung sagt man irgendwie „dort wo die Sonne aufgeht“. Es gibt aber kein Wort, das „links“ ausdrückt. Vielleicht ein Drittel aller Sprachen kennt diese Unterscheidung gar nicht. Aber bei jenen Sprachen, die sie besitzen – zu denen auch die unsere zählt –, beruhen die Systeme der räumlichen Orientierung immer auf Körperasymmetrien. Man hat sozusagen eine starke und eine schwache Hand, oder die Seite, auf der bei den meisten Menschen das Herz schlägt, die Seite, auf der sich die Füße befinden, oder jene, wohin man blickt und dergleichen mehr. Jede Orientierung beruht auf Körperasymmetrien. Beobachter und ihre Position sind immer relativ.

Die Frage ist nun: Kann man sich eine Entwicklung der Modelle denken, die in Richtung einer zunehmenden Beobachterrelativität geht? Womit hier ja eine ganz andere Denkweise angesprochen wäre, als die etwa von Herrn Ehlers am Schluß dargestellte.

**Martin Quack:** Zunächst kann man sich also fragen, in welchen Kulturen Rechts-Links-Asymmetrien überhaupt thematisiert werden, und es war sehr interessant zu hören, daß es Sprachen gibt, die dieses Problem nicht diskutieren. Zugleich kann man sich die Frage stellen: Wo ist diese Unterscheidung rechts-links das erste Mal in der Literatur dokumentiert? Nun, das erste Beispiel, das ich kenne, habe ich hier zitiert. Es gibt eine Stelle in

Jona in der Bibel, wo es heißt: „Und mich sollte nicht jammern Ninive, eine große Stadt, in der mehr als 120.000 Menschen sind, die nicht wissen, was rechts oder links ist und dazu noch viele Tiere“.<sup>1</sup>

Beim Lesen habe ich mich gefragt, was der Autor mit diesen Zeilen eigentlich sagen wollte. Es gibt verschiedene Interpretationen: Die erste geht davon aus, daß es „dumme“ Kulturen gibt, die rechts und links in ihrer Sprache nicht unterscheiden können, wie Wolfgang Klein bemerkt. Der Autor als Hebräer, dessen Sprache die Unterscheidung kennt, würde sich damit absetzen von den Bewohnern der Hauptstadt Ninive des assyrischen Reiches am Tigrisufer, die diese Unterscheidung vielleicht wirklich nicht in ihrer Sprache ausdrücken konnten.

Eine andere Interpretation ergibt sich aus dem Vergleich der Texte in der Zwingli-Bibel (hier der Zürcher Bibel von 1931) und der Luther-Bibel, die ich vorher zitiert habe. In der Zürcher Bibel steht „... die zwischen rechts und links *noch* nicht unterscheiden können, dazu die Menge Vieh“. Hier ist also das Wort „noch“ zusätzlich enthalten, was zum Ausdruck bringt, daß es dort 120.000 Kinder unter etwa 3 bis 5 Jahren gab, die bekanntlich die Unterscheidung noch nicht beherrschen. Eine Stütze für diese Interpretation ist die gleichzeitige Erwähnung von einer „Menge Vieh“, wobei sowohl Kinder- als auch Viehreichtum den Reichtum der Stadt zum Ausdruck bringen sollten. Bei der Überprüfung etwa des Textes der Septuaginta findet man keine gute Rechtfertigung dafür, hier ein „noch“ einzufügen. Es ist also eine freie, interpretierende Übersetzung, während der Luther-Text, wo das „noch“ fehlt, wörtlich näher am Originaltext zu sein scheint. Man findet übrigens noch ganz andere freie Übersetzungen. In einer amerikanischen Bibel habe ich gefunden „who live in utter spiritual darkness“. Mit solcher Freiheit könnte man aus heutiger Sicht auch nach einem von mir einmal scherzhaft gemachten Vorschlag übersetzen: „die die Paritätsverletzung in der Natur noch nicht kennen“. Damit würde man interpretieren, daß der Autor sagen wollte: „die eine fundamentale Unterscheidung der Rechts-Links-Struktur des Raumes durch die Paritätsverletzung noch nicht erkannt haben“ (was Gott selbstverständlich auch damals schon wohlbekannt war). Bekanntlich waren noch van't Hoff und Einstein von der exakten Rechts-Links-Symmetrie überzeugt, wobei dann eben „rechts“ oder „links“ einer fundamental nicht beobachtbaren Größe entspricht. Die Unterscheidung „Rechts“ und „Links“ wäre dann nur eine Konvention, bezogen auf den Beobachter, der diese willkürlich festlegen kann. Aber nach heutiger Kenntnis ist das ja nicht mehr so. Wir können „rechts“ oder „links“ absolut angeben

---

<sup>1</sup> Jona 4, Vers 11.

aufgrund der Paritätsverletzung. Wenn man allerdings noch einen Schritt weitergeht und die Existenz der CPT-Symmetrie akzeptiert (von charge conjugation, parity, time), dann gibt es innerhalb dieser drei immer noch eine Eigenschaft, die fundamental nicht beobachtbar ist. Nur bei Verletzung der CPT-Symmetrie wären die drei dazu gehörenden Eigenschaften (Materie–Antimaterie, Rechts–Links, Zeitrichtung vorwärts oder rückwärts, Vergangenheit–Zukunft) alle absolut beobachtbar. Ich verweise hierzu auf die in meinem Beitrag zitierte Literatur.

**Horst Bredekamp:** Ich möchte in bezug auf mein Eingangsstatement, in dem ich zwischen „Modellen für etwas“ und „Modellen von etwas“ unterschied, nochmals betonen, daß beide Varianten etwas ermöglichen, aber auch defizitär sind. Ob sie auf etwas zu Rekonstruierendes vorverweisen oder eine unübersehbare Fülle von Phänomenen, wie sie in der Natur vorkommen, durch Verkleinerung begreiflich machen: es bleibt immer eine Lücke. Hier ist Herrn Schwarz beizupflichten.

Es fällt dem Menschen aber intuitiv nicht leicht, sich jederzeit klarzumachen, daß ein in seiner Schönheit berücksichtigendes Modell auch und vor allem sich selbst repräsentiert. Diese Distanz gegenüber dem Repräsentierten einzugestehen, bedeutet Machtverlust, und dieser ist schwer erträglich. Meine Frage an die Biologen wäre gewesen, ob in der Weigerung, ein obsoletes Modell wie den „Baum des Lebens“ über Bord zu werfen, nicht ein derartiges Motiv zu erkennen ist.

Ähnlich würde ich auf die Äußerung von Herrn Ehlers antworten, daß es ein großer Fortschritt sei, vom Bild zur Formel zu kommen. Zu fragen wäre, inwieweit auch Formeln in gewisser Weise Bilder sind. Herr Aigner hat uns dargelegt, wie Formeln nach ihrer ästhetischen Erscheinung bewertet, verworfen oder auch befürwortet werden. Zudem kann man immer wieder den umgekehrten Weg, von der Formel zum Bild, bestaunen. Niels Bohr hat ein Atommodell gezeichnet, von dem er selbst wußte, daß es so nicht existiert. Aber es ist das populärste Modell bis heute.

Ähnliches gilt für die Nanotechnologie. Sie ist an sich unanschaulich, bringt aber eine ungeheure Produktion von visuellen Modellen hervor, die ihren Modellcharakter zu negieren versuchen. Die naturwissenschaftlichen Zeitschriften sind überschwemmt mit Bildprodukten, die zwischen Schönheit und Kitsch schwanken, und die genau dieses Problem offenbaren.

**Julian Nida-Rümelin:** Ich hätte eine Anmerkung zum Verhältnis Modell und Theorie, vor allem an die beiden naturwissenschaftlichen Referenten. In der Wissenschaftstheorie gibt es unterdessen eine relativ starke Strömung, die Modell und Theorie noch enger

verkoppelt, als dies in Ihren Vorträgen deutlich wurde. Die Beispiele, die Sie gaben, sprechen aber, wie ich finde, für diese enge Verkopplung. Ich will es ganz kurz schildern:

In der Physik existiert ein jeweils theoretischer Kern, der in mathematischer Sprache formuliert wird. Dieser erlangt aber erst dadurch seine Bedeutung, daß man einzelne Modelle oder Paradigmen – wie immer man das nennt – zur Illustration dessen, was da beschrieben werden soll, heranzieht. Die Theorie insgesamt zeichnet sich dadurch aus, daß sie ein bestimmtes intendiertes Anwendungsgebiet hat. Man testet nun, wie weit die Analogien reichen, wie weit man mit dem theoretischen Kern, interpretiert an bestimmten Paradigmen oder Modellen, in diesem intendierten Anwendungsbereich kommt. Und hier sind wir relativ flexibel. Deswegen gibt es nicht die harten Falsifizierungen wie bei Popper.

Meine Nachfrage wäre: Ist Ihnen dieses Bild sympathisch oder Herr Quack – bei Ihnen war die Differenzierung zwischen Modell und Theorie stärker als bei Herrn Ehlers – wollen Sie das doch stärker getrennt halten?

**Martin Quack:** Ich glaube, das ist zum Teil ein sprachliches Problem. Ich habe versucht klarzumachen, daß beides ineinander übergeht: Also man kann sagen, ein Modell ist eine Theorie; vielleicht keine so gut ausgeformte oder vollständige Theorie. Man kann aber auch sagen, eine Hypothese ist eine Theorie. Wo will man die Grenze ziehen? Die Grenzen sind nicht ganz scharf. Zum anderen ist dies zum Teil einfach eine Frage des Sprachgebrauchs. Ich würde sagen, es sind Mittel, die Natur abzubilden.

Aber auch in bezug auf einige der anderen Diskussionen würde ich meinen, die Theorie wird allgemein doch so verstanden, daß sie den Anspruch hat, eine Abbildung in der Weise zu liefern, daß diese ganz präzise ist. Und wenn sie diesen Anspruch nicht erfüllt, dann sagen wir eben, sie ist falsch. Für ein Modell behaupten wir das eigentlich nie; hier sagen wir, das Modell ist nicht gut. Wir sagen nicht, es ist falsch, denn wir wissen, daß es falsch ist. In diesem Zusammenhang darf ich Sie an das von mir in meinem Vortrag verwendete Pasteur-Zitat<sup>2</sup> erinnern: Pasteur ist auf der extremen Seite der Leute, die sagen, auch die Theorien sind eigentlich nur Modelle. Sie sind nie richtig, es kommt darauf an, daß sie fruchtbar sind; die Wahrheit aber können wir nicht erkennen.

Mit der Wahrheit ist es natürlich eine ganz gefährliche Sache. Was ist Wahrheit? Das ist sehr schwierig! Allerdings gibt es doch irgendwie so etwas. Jeder kennt die folgende Situation: Wenn jemand vor Gericht steht, eine Aussage macht, und man weiß, daß er

---

<sup>2</sup> Siehe Seite 24, insb. Anm. 2.

lügt, dann ist es eben doch nicht die Wahrheit; und selbst wenn zum Beispiel ein Zeuge, der nicht lügt, möglichst getreu die Dinge berichtet, kann man auch davon ausgehen, daß das vielleicht nicht ganz der Wahrheit entspricht; aber es ist der Wahrheit in der Regel doch näher. Jeder weiß um dieses Phänomen, und ich denke, in den Naturwissenschaften gibt es das auch.

**Jürgen Ehlers:** Ich habe absichtlich schon aus dem Grund keine genaue Unterscheidung zwischen Modellen und Theorien zu benutzen versucht, weil in der Physik der tatsächliche Gebrauch der zwei Termini in dieser Unterscheidung so nicht vorkommt. Wenn man zum Beispiel vom Standardmodell der Teilchenphysik redet, dann wäre es nach meinem Gefühl von der überkommenen Sprachregelung her sehr viel gescheiter, es eine Theorie zu nennen. Denn es stellt ein sehr umfassendes, logisch wohlgeordnetes System von Aussagen mit vielen experimentellen Tests dar. Aber so ist es nun einmal, man pflegt in dieser Hinsicht nicht mehr genau zu unterscheiden. Wenn man vom Standardmodell des Universums redet, könnte man auch eher von der Theorie des Universums sprechen.

Ihre Bemerkung über die aus der Wissenschaftstheorie kommende Vorstellung von einem Kern, um den sich dann allerlei herumrankt, ist – so glaube ich – eine nützliche Vorstellung. Ob sie allerdings wirklich hilfreich ist, um zu sagen, was eigentlich eine physikalische Theorie und ihren Wirklichkeitsbezug ausmacht, daran habe ich meine Zweifel.

**Martin Grötschel:** Ich möchte Herrn Bredekamps Vortrag kurz kommentieren. Seine Darbietung hatte, besonders durch die Bildersprache und die Beispiele wirkend, für mich so etwas Sakrales an sich. Ich denke, wir Mathematiker sind beim Thema „Modelle“ nüchterner. Meiner Ansicht nach treten am Ende des Denkprozesses, wenn man sich genügend lange mit der theoretischen Durchdringung einer Fragestellung beschäftigt hat, Modelle in der Regel als mathematische Modelle in Erscheinung. Selbst in der Architektur ist heute ein Trend zur Mathematisierung sichtbar. Auch hier werden inzwischen die meisten Modelle im Computer gefertigt und nicht mehr in Holz, Ton oder Gips. Hierdurch läßt sich die Konstruktion nicht nur beschleunigen, sondern auch deutlich verbessern.

Was wir beim (mathematischen) Modellieren eigentlich tun, ist Folgendes: Wir beobachten/sehen/erahnen die Wirklichkeit – was immer das auch ist – oder spielen mit unserer Phantasie. Von unserer Vorstellung erzeugen wir ein mathematisches Abbild, das zum Beispiel die Form von Gleichungs- oder Ungleichungssystemen annehmen kann.

Wir haben dabei bestimmte Gesichtspunkte im Sinn. So formulieren wir etwa ein Modell mit dem Ziel, ein Naturphänomen zu verstehen, eine ökonomische Entwicklung vorherzusagen oder ein statisch sicheres Gebäude zu errichten. Beim Modellieren lassen wir viele Aspekte weg, weil wir sie nicht richtig beschreiben können, weil wir sie für nebensächlich halten oder weil uns schlicht Informationen fehlen. Ökonomen sagen in solchen Fällen häufig „*ceteris paribus*“. Wir wissen natürlich, daß dies zu Fehlern führen kann. Modelle müssen also kritisch geprüft werden. Drei Beispiele: – Bei der mathematischen Beschreibung eines Bauwerks können wir nie sicher sein, daß die beim Bau verwendeten Materialien genau die im Modell spezifizierten physikalischen Eigenschaften haben und daß die Handwerker die Vorschriften präzise einhalten. – Modelliert man den Verkehrsfluß einer Stadt mit dem Ziel einer besseren Verkehrssteuerung, so müssen die stochastischen Annahmen durch statistische Erhebungen überprüft und vom Nutzer an die Realität angeglichen werden. – Will man die Strömung von Luft um einen Flugzeugflügel zur Verminderung des Kerosinverbrauchs modellieren, so werden Parameter benötigt, die man zwar durch Experimente, aber niemals wirklich genau bestimmen kann.

Die Mathematik liefert ihren Anwendern etwas Besonderes. Sie bietet eine Vielzahl „allgemeiner“ mathematischer Modelle an, die über Fachgrenzen hinweg zur Beschreibung ganz unterschiedlicher Phänomene benutzt werden können. Verkehrsflüsse stellt der Mathematiker häufig durch sogenannte Mehrgüterflußprobleme, Luftströmungen durch die Navier-Stokes-Gleichung dar. Mehrgüterflußprobleme kommen aber auch bei der Optimierung des Durchsatzes von Pipelines oder der Umlaufplanung von U-Bahnen zum Einsatz, die Navier-Stokes-Gleichung findet bei vielen anderen Strömungsproblemen Verwendung. Hier müssen lediglich verschiedene Parameter der Gleichung dem Anwendungsfall angemessen festgesetzt werden.

Bei der ungestümen Entwicklung aller Wissenschaftsbereiche in der heutigen Zeit kommt es immer häufiger vor, daß man ein neues Phänomen oder eine neue Technologie mathematisch beschreiben möchte, aber die Mathematiker keine auf die vorliegende Fragestellung anwendbaren Modelle parat haben. Dann muß neue Mathematik her, zugeschnitten auf die neuen Probleme. In diesem Sinne gibt es ein Wechselspiel zwischen Praxis und Theorie, Experiment, Modell und Berechnung. Wir Mathematiker wissen, daß „unsere Formeln“ nur ein Werkzeugkasten zur Beschreibung unserer Umwelt sind. Kein Mathematiker ist der Meinung, daß sie die Wirklichkeit wirklich korrekt beschreiben. Was Wahrheit ist, wissen wir nicht. Wir versuchen, uns ein gutes Bild zu machen – ein mathematisches.

An der Visualisierung mathematischer Sachverhalte wird heftig gearbeitet. So richtig ist das Thema noch nicht verstanden. Immerhin gelingt es schon häufig, aussagefähige

Bilder von Lösungen approximativer mathematischer Modelle zu erzeugen und dadurch die Phänomene besser zu verstehen, die man eigentlich korrekt beschreiben möchte.

**Horst Bredekamp:** Das ist einerseits zutreffend, andererseits nehme ich es Ihnen absolut nicht ab. Die Durchsetzung gerade der digitalen Simulation war reinste Bildtheologie; hierin lag die Sakralität, nicht in meiner Beschreibung. Ich habe versucht, die frühen Formulierungen der mathematischen Simulation, etwa der Fraktale, mit dem byzantinischen Bilderkult zu vergleichen; es handelt sich um unerkannte Bildtheologie. Wenn Mandelbrot sagt: „Seeing is beliving“, dann ist dies neoplatonischer Gottesdienst.<sup>3</sup>

Auch die coole Seite der Anwendung von Modellen ist hiervon nicht frei. Jedes Programm ist eine Kreation, die sich gegen die Wirklichkeit setzt, und in die jeder Erzeuger als Produkt seiner selbst gleichsam verliebt ist. Das Problem liegt nicht in der Reaktion auf gegebene reale Anforderungen, sondern darin, daß Modelle ein Eigenleben entfalten. Ihnen ist die Überhöhung dem Wesen nach eingegeben.

**Adolf Heinrich Borbein:** Ich hatte den Eindruck, daß zumindest in der Chemie und Physik einmal aufgestellte Modelle im Lichte neuer Erkenntnis verbessert werden, während in den Geisteswissenschaften – Herr Bredekamp hat das am Beispiel der Kunstgeschichte gezeigt – Modelle, die sich eine Zeitlang bewährt und zu Erkenntnissen geführt haben, schließlich aufgegeben und durch neue ersetzt werden können, ja müssen. Das Festhalten an einmal akzeptierten Modellen könnte, auch wenn man diese ständig verbessert, die Gefahr mit sich bringen, daß man auf gebahnten Wegen einfach fortschreitet, ohne ein solches Verfahren grundsätzlich in Frage zu stellen. So kann man zum Beispiel die aufwendigen Teilchenbeschleuniger der heutigen Physik als Konsequenz eines Modells verstehen, das auf die griechischen Naturphilosophen zurückgeht; denn die „Atomisten“ postulierten zuerst, daß man zur Erklärung des Kosmos nach den kleinsten Elementen suche müsse. Meine Frage also: Wechseln auch die Naturwissenschaften ihre Modelle aus?

**Klaus Pinkau:** Ich würde die Antwort auf diese Frage zurückstellen wollen, denn sie gehört bereits, wenn nicht zum ersten großen Fragenkomplex (unter anderem: „Wie werden Modelle weiterentwickelt? Wer ist der Richter darüber, daß ein Modell und seine Fortentwicklung adäquat sind?“; vgl. S. 12) so doch zum zweiten, in dem es vor allem

---

<sup>3</sup> Bredekamp, H.: Der Mensch als „zweiter Gott“. Motive der Wiederkehr eines kunsttheoretischen Topos im Zeitalter der Bildsimulation. In: Dencker, K. P. (Hg.), Interface 1. Elektronische Medien und künstlerische Kreativität, Hamburg 1992, S. 134–147.

darum geht, ob wissenschaftliche Wahrheit kumulativ ist. Im Sinne der Disziplin unserer Diskussion würde ich Sie also bitten, Ihre Frage später noch einmal zu stellen und schlage vor, zunächst Herrn Ganten das Wort zu erteilen, den wir gebeten hatten, innerhalb Frage 1 einen Kurzbeitrag zu leisten. (Leider wurde die Frage später nicht noch einmal so explizit gestellt. Implizit findet sich eine Antwort in der Diskussion im Anschluß an den Vortrag von Herrn Mittelstraß auf Seite 108ff.)

**Detlev Ganten** spricht zur Modellentwicklung in der Medizin und leitet mit seinem Kurzvortrag gemäß der Struktur der Quæstiones disputatae den ersten Fragenkomplex (vgl. S. 41ff.) ein.

Unter der Leitung von **Klaus Pinkau** wird die Diskussion nunmehr zur Frage 1 fortgesetzt:

**Jochen Brüning:** Ich denke, was für mich hier am treffendsten war, ist Pasteurs Charakterisierung. Es ist sehr schwer, zwischen Modell und Theorie zu unterscheiden oder Modelle aus der Kunstgeschichte und der Physik zu vergleichen. Aber sicher ist, all dieses geschieht in einem kulturellen Prozeß. In dem Augenblick, da wir uns entscheiden, ein bestimmtes Modell schriftlich festzuhalten, ist bestimmt schon irgendeine Publikation in Arbeit oder gerade erschienen, die dieses Modell verändern wird. Das gilt sowohl für die Natur- als auch die Geisteswissenschaften.

Aber welche Gültigkeit das Modell hat, läßt sich nicht abstrakt bewerten, sondern das bewertet die Community, die dieses Modell verwendet. Und die Kriterien bzw. die Techniken, die die Veränderungen der Modelle herbeiführen, sind eben sehr unterschiedlich. Wenn ein Verkehrsmodell oder das Standardmodell der Teilchenphysik experimentell überprüft werden, und die Überprüfung einen Riesenunterschied zwischen Realität und Modell offenbart, wird man es nicht akzeptieren. Trotzdem ist auf der anderen Seite die Mathematik die logische Konsistenz der Modelle. Das ist eben das, was wir unter reiner Mathematik verstehen; insoweit kann man auch die Modelltheorie als die Theorie der Modelle in der Mathematik ansehen.

Zugleich werden Widersprüche auch toleriert; zum Beispiel das berühmte sich selbst beschleunigende Elektron, das jeder Physiker kennt und von dem er sagt, es störe uns eigentlich nicht, weil die Bereiche, die solide abgedeckt sind, so groß sind, daß wir uns davon nicht verabschieden würden. Und hier liegt nun der entscheidende Unterschied zwischen der Biologie und der Kunstgeschichte, in der solche Kriterien nicht vorkommen; wobei ich Horst Bredekamp absolut Recht gebe, daß es auch hier eine treibende Kraft der Modelle gibt – das Bild der Doppelhelix ist ein gutes Beispiel dafür – nämlich, die Sehnsucht danach, eine bestimmte Erkenntnis so unmittelbar wie möglich zu erlan-

gen. Nur wird diese Kraft immer durch eine kulturelle Gruppierung – also das, was wir die Scientific Community nennen – kontrolliert und betrieben.

**Klaus Pinkau:** Ein weiteres Kriterium der Entwicklung von Modellen ist – ich hatte es bereits hervorgehoben –, daß es nicht nur im engeren Bereich der Fachgenossen anerkannt wird, sondern daß sich plötzlich seine Applikabilität in einem völlig anderen, bisher nicht beachteten Zusammenhang erweist. Erst dadurch gewinnt das Modell eine Qualität, die über die Beantwortung einer enger gestellten Frage hinausgeht. Und das war bei der Quantentheorie in großem Umfang der Fall; auch sie hat ihre Probleme, zum Beispiel, wenn man sie mit der Gravitation verschmelzen will. Hier zeigt sich nunmehr der Wall, den Sie beschrieben haben. Das klassische Beispiel war allerdings immer der vom Baum fallende Apfel, der in der Konsequenz zur Theorie des Planetensystems führte. Insoweit wurde ein Konzept plötzlich aus einem engen Zusammenhang heraus applikabel für die Beantwortung einer völlig anderen Frage und damit übertragbar auf einen anderen Kontext. Und es ist diese Übertragbarkeit der Konzepte, die nach meiner Meinung den weiteren Anwendungsbereich beschreibt und die eine wichtige Eigenschaft ist. Bevor ich zum Schluß noch auf die Ähnlichkeiten zwischen den Vorträgen zu sprechen komme, gebe ich zunächst Herrn Gierer das Wort.

**Alfred Gierer:** Ich möchte kurz an die Ausführungen über die Doppelhelix anknüpfen und mit einer allgemeinen Bemerkung beginnen. Die Evolution des menschlichen Gehirns hat in besonderem Maße zu Fähigkeiten räumlicher Anschauung geführt. Dieses Vermögen macht einen wesentlichen Teil unserer Gehirnkapazität aus und ist außerordentlich erstaunlich. Wenn ein Löwe in diesen Raum stürzen würde, dann würden wir uns in Windeseile Fluchtwege durch das ganze Gebäude hindurch vorstellen und mehr oder weniger richtige Entscheidungen treffen. Und wie immer bei allgemeinen Fähigkeiten ist es so, daß ein „Überschuß an Möglichkeiten“ generiert wird, um Max Delbrück zu zitieren. In der Evolution wurde eben mehr geliefert als bestellt, was es uns erlaubt, nun diese Fähigkeiten für alle möglichen anderen Dinge, so auch für die Wissenschaft, anzuwenden: nämlich uns vorzustellen, wie die Natur sein könnte, diese Vorstellungen gegenüber anderen wirkungsvoll zu vertreten und Experimente zu planen, zu erklären usw.

Ich möchte an der DNS-Doppelspirale erläutern, wie wichtig ein solches Vorstellungsvermögen ist. Denn der Charme dieses Modells ist ja, daß wir verborgene Fähigkeiten im Gehirn haben, diese Spiralen im Geiste aufzuwinden, zu zerschneiden, wieder zusammensetzen und alle möglichen Operationen in drei Dimensionen in unserem Kopf auszuführen. Wenn wir das nicht so locker könnten, dann hätte das DNS-Doppelspiral-

modell auch nicht diesen fundamentalen Erklärungswert, der es schulgeeignet, lexikon-geeignet, mediengeeignet macht, um in die Genetik einzuführen. Es ist eng gekoppelt an die Superfähigkeit unseres Gehirns, räumliche Vorstellungen zu entwickeln. Und diese setzen wir wiederum in verschiedenen Zusammenhängen ein.

Der wissenschaftsphilosophisch so interessante Punkt ist aber, daß in der Wissenschaft dann das, was diese Vorstellung uns vermittelt – und das zeigt besonders die historische Entwicklung der Quantenphysik –, eben nicht die letzte Instanz ist. Im Gegenteil, wir müssen zuweilen radikalen Abschied von diesen Vorstellungen nehmen, um einen Schritt weiterzukommen. Und damit bin ich bei dem schönen Beispiel von Herrn Ehlers: Was berechtigt uns zu sagen, in der Sonnenmitte gäbe es eine Temperatur von 15 Millionen Grad? Das könnte man natürlich mit Diagrammen erläutern, und man macht das auch. Aber die letzte Instanz für die Richtigkeit der Erklärung sind solche Modelle nicht. Die letzte Instanz ist eben die zugrundeliegende, sehr viel abstraktere und zugleich allgemeinere Theorie physikalischer Prozesse.

**Axel Börsch-Supan:** Ich möchte generell etwas zu den Aufgaben von Modellen sagen; da scheinen mir nämlich eine ganze Menge zu fehlen. Bisher haben wir davon gesprochen, daß Modelle erstens der Visualisierung dienen. Sie haben allerdings noch andere Aufgaben, die jener der Visualisierung zum Teil völlig konträr gegenüberstehen. So fungieren sie zum zweiten als Instrumente zur Disziplinierung und dienen drittens darüber hinaus als Parabel.

Als Disziplinierungsinstrumente sind sie unter anderem in der Architektur nützlich. Bei der Konstruktion von Bauwerken weiß man zum Beispiel nicht immer sofort, ob eine Treppe in ein Gebäude noch hineinpaßt oder nicht. Anhand eines Modells sieht man dann, ob es geht oder nicht. Insbesondere in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften benutzt man Mathematik in Modellen bewußt, um sich zu fesseln. Hier droht man sehr leicht der Michelangelo-Illusion anheimzufallen, man wisse das alles im Kopf, so daß man die Fesseln braucht. Deswegen hat ein Modell hier auch einen völlig anderen Zweck: Es dient bewußt dazu, sich zu beschränken. Bewußt wird Mathematik angewendet, um logische Fehler auszuschließen.

Ihre Funktion als Parabel wird oft in der Wirtschaftswissenschaft genutzt, in der bis hin zur Absurdität Dinge isoliert werden, um einen einzigen Aspekt herauszuarbeiten – ähnlich in der Biologie. Modelle als Disziplinierungsinstrumente und als Parabeln erheben keinen Anspruch darauf, auch nur annähernd an die Wirklichkeit heranzukommen, sondern bewußt will man sich von ihr entfernen. Ich glaube, das ist etwas ganz Wichtiges in der Modelldiskussion.

**Volker Gerhardt:** Ich habe eine Frage an Herrn Ganten. Das Reizvolle dieser Debatte liegt auch darin, daß der Unterschied zwischen Wirklichkeit und Modell selbst schon wieder ein Modell darstellt. Es ist einfach mit einer solchen Differenz umzugehen, in der die Wirklichkeit in einer bestimmten praktischen oder pragmatischen Weise schon festgelegt ist und wir sie nicht mehr hinterfragen. Nehmen wir etwa das Flugzeug und das Modell des Flugzeugs, dann ist die Differenz zwischen Wirklichkeit und Modell offenkundig. Aber was ist, wenn wir entdecken, daß die Wirklichkeit selbst, so wie wir sie beschreiben – auch wenn wir das mit den von Herrn Quack angegebenen Kautelen tun – eine modellierte Wirklichkeit ist? Und das müssen wir doch, wenn wir uns mit der Wirklichkeit des Lebens beschäftigen, als eine inzwischen gut beschriebene Tatsache ansehen.

Die Gestaltpsychologie hat uns schon früh gezeigt, daß es immer ganz bestimmte Ganzheiten gibt, auf die wir in unserer Empfindung aus sind; daß wir Einheiten bilden und daß das, was wir zur Beschreibung von Wirklichkeiten annehmen, immer schon von ganz bestimmten Modellkonstruktionen unseres Organismus selber geprägt ist. Und meine Frage an Herrn Ganten ist, ob wir nicht eventuell soweit gehen müssen, dasjenige, was uns die Modelle überhaupt von dem liefern, was wir als eine Wirklichkeit bezeichnen – nämlich den Organismus selbst –, als ein Modell anzusehen, das jeweils in individueller Form von seinem genetischen Programm in mehr oder weniger zutreffender, überlebensfähiger, anpassungsfähiger Weise modelliert wird, und in dem Individuum selbst jeweils ein Modell dessen zu sehen, was im Programm einer Population angelegt ist. Und wenn wir das so festlegen müßten, dann hätten wir tatsächlich eine Vermittlung von Modell und Wirklichkeit, die uns letztlich zu dem Eingeständnis führte, daß wir diese Unterscheidung immer selber nur in ganz bestimmten Modellzusammenhängen treffen können.

**Detlev Ganten:** Das ist bei physikalisch meßbaren Phänomenen in der Tat eine ganz wichtige Frage: Wie weit bilden Modelle Wirklichkeit ab? Bei der Sonne und ihrer Temperatur läßt sich das zumindest theoretisch mit einiger Präzision messen oder erkennen. Aber aus welchen Perspektiven betrachten wir den Menschen? Ist er Modell oder ist er die Wirklichkeit? Was wissen wir denn selber objektivierbar Wesentliches über uns? Wenn wir den Menschen als subjektiv empfindendes Wesen sehen, und wenn es darum geht, in der Biologie an Modellen nachzuvollziehen, was dieses subjektive Empfinden ist – das kann zum Beispiel Gesundheit und Krankheit sein –, gibt es keine klaren Trennungen. Diese lassen sich wahrscheinlich gar nicht modellieren; das heißt, wir gelangen an Grenzen schlechthin, nicht mehr nur von Übertragbarkeit oder Beschreibbarkeit, sondern der Relevanz. Die Frage ist also, was wir überhaupt damit beschreiben können

und wollen? Ich glaube, daß hier die Grenzen der Semantik, aber nicht nur der Semantik, auch Grenzen der Modellbildung erreicht sind. Das heißt nicht, daß bei Analysen von speziellen Fragen Modelle ohne Wert wären; ganz im Gegenteil.

**Christoph Markschies:** Ich wollte an eine Bemerkung aus dem Gantenschen Kurzvortrag anknüpfen. Sie äußerten die schöne Vermutung, daß die Durchsetzung des Doppelhelix-Modells mit seiner Ästhetik zusammenhänge. Das würde ich gern unterstützen. Der Florentiner Renaissance-Künstler und Kunsttheoretiker Leon Battista Alberti hat uns eine Definition von Schönheit hinterlassen, die mir in diesem Zusammenhang sehr treffend scheint – Schönheit als etwas, von dem nichts weggenommen und dem nichts hinzugefügt werden kann.<sup>4</sup> Das läßt sich wunderbar mit den Aignerschen Beobachtungen verbinden: Ein Modell hat dann sehr hohe Chancen auf Durchsetzung, wenn es einerseits hinreichend komplex, aber auf der anderen Seite auch hinreichend einfach ist. Nimmt man Alberti beim Wort, so hat es auch eine bestimmte Ästhetik. Und das scheint mir etwas zu sein, was wiederum Natur- und Geisteswissenschaften stark verbindet und uns zu der Frage nach dem „Richter“ über die Durchsetzung von Modellen führt. Ästhetik ist offenbar etwas, das die Akzeptanz eines Modells innerhalb einer größeren Gruppe von Menschen stark beeinflußt bzw. bewirkt, wenn es denn hinreichend differenziert, aber eben auch einfach ist, und zwar ‘einfach’ im Sinne einer Eleganz.

**Detlev Ganten:** Ja, Durchsetzungsfähigkeit durch Ästhetik ist sicher zu bejahen, birgt aber auch eine Gefahr: Wenn wir das Modell der Gene auch als Modell des Verstehens von Leben betrachten, dann sehen wir, daß diese Attraktivität, die sich wesentlich festmacht natürlich an der Doppelhelix, dazu führt, daß wir von genetischen Programmen sprechen, die es ja überhaupt nicht gibt, und daß wir in eine Diskussion des genetischen Determinismus geraten, den es natürlich auch nicht gibt. Theoretisch lehnen das alle ab, die darüber nachdenken, aber in der Praxis ist die Diskussion von dieser Fehlleitung ganz wesentlich geprägt. Das heißt, die ganz im Bredekampschen Sinne große Gefahr, die von dieser Überzeugungskraft ausgeht, wird daran besonders deutlich. Der Irrglaube von einem genetischen Determinismus und die Überschätzung gentechnischer Methoden können eine Forschungsrichtung insgesamt gefährden. Inwieweit Modelle dazu beitragen, wäre eine wichtige Frage!

---

<sup>4</sup> Vgl. De re aedificatoria, Paris 1553, Buch IX, Kapitel 5, fol. 191f.

**Wilhelm Voßkamp:** Ich knüpfe an die Bemerkungen von Herrn Marksches und Herrn Ganten an und erinnere an einen Satz von Goethe: „Das Schöne ist eine Manifestation geheimer Naturgesetze, die uns ohne dessen Erscheinung ewig wären verborgen geblieben“.<sup>5</sup> An anderen Stellen spricht Goethe von Symbolen. „Das ist wahre Symbolik, wo das Besondere das Allgemeine repräsentiert ...“<sup>6</sup>

Wenn es so ist, daß das Besondere als Modell zugleich das Allgemeine repräsentiert, dann fragt man sich als Geisteswissenschaftler, ob das Ursachen hat, die mit der Natur selbst zu tun haben. Denn das ist die Annahme Goethes, daß in der Urpflanze oder in bestimmten Phänomenen, die er in der Natur beobachtet, so etwas wie Urphänomene sichtbar sind. Es gibt deshalb eine Art von Äquivalenz bzw. Korrespondenz zwischen Schönheit (im Sinne des Symbolischen) und dem, was Sie als Naturwissenschaftler beobachten, wenn Sie die Genstruktur oder das genetische Material unter die Lupe nehmen. Es entspräche der Goetheschen Vermutung, daß man etwas als schön empfindet, wenn es zu dieser Korrespondenz kommt.

**Klaus Lucas:** Mehrere Vorredner haben den Begriff der Grenzen der Modellierung bereits aufgegriffen. Ich möchte das anhand von Beispielen aus den Technikwissenschaften tun. Bei der Annäherung an die Realität gibt es Grenzen. In meiner Lebensspanne haben wir ja Entwicklungen erlebt, die durch das Aufkommen von Computern und einer ganz verfeinerten Experimentiertechnik gekennzeichnet sind. Je mehr wir diese Techniken anwenden und ins Detail von Modellen gehen, um so mehr ist zu beobachten, daß wir uns in gewissen Bezügen gar nicht weiter mehr der Realität nähern. Geht man nämlich genügend genau ins Detail, kommt man ganz offensichtlich in Bereiche, die grundsätzlich nicht wißbar, nicht modellierbar sind. Sie sind durch inhärente Unsicherheiten, chaotische Phänomene und dergleichen begrenzt. Wenn man diese Modelle, die im Detail – was man auch sieht – offensichtlich falsch sind, dann aber nach ganz groben, gemittelten Parametern abfragt, stellt man fest, daß sie im Grunde wiederum ganz gut sind.

Ich muß also erkennen, daß wir offensichtlich – wenn nicht ein ganz großer Paradigmenprung kommt –, zumindest mit unseren Computer- und experimentellen Anwendungen an Grenzen stoßen. Es hat deshalb Sinn zu fragen, ob man nicht im Groben bei der Fragestellung verbleiben sollte, die man den Modellen abverlangt. Festhalten muß man aber, und man sollte das auch der Öffentlichkeit nicht vorenthalten, daß es Grenzen der Modellbildung gibt. Diese zeigen sich auch darin, daß Unregelmäßigkeiten,

---

<sup>5</sup> Maximen und Reflexionen, Nr. 719.

<sup>6</sup> Maximen und Reflexionen, Nr. 752.

Unfälle, Katastrophen grundsätzlich nicht modellierbar sind. Sie resultieren daraus, daß sich kleine, an sich nicht modellierbare Effekte nicht statistisch verhalten. Denn sie schaukeln sich auf und führen zu den unvorhersehbaren Ereignissen.

Der erste Fragenkomplex wird mit den folgenden eingeladenen Kurzvorträgen abgeschlossen:

**Wolfgang Klein** spricht „Über den Nutzen naturwissenschaftlicher Denkmodelle für die Geisteswissenschaften“ (vgl. S. 45ff.), **Eberhard Knobloch** referiert kurz aus wissenschaftshistorischer Sicht zum Thema „Modelle“ (vgl. S. 51ff.).

Nach einer Pause führt **Horst Bredekamp**, der nunmehr die Leitung der Diskussion übernimmt, gemäß der Struktur der *Quæstiones disputatae* in den zweiten großen Fragenkomplex ein. Er übergibt das Wort an **Heinz Duddeck** (vgl. S. 53ff.), der sich zunächst Modellen in den Technikwissenschaften widmet und schließlich an **Jürgen Mittelstraß** (vgl. S. 65ff.), der sich grundsätzlich zum Modellbegriff äußert.

Die Diskussion wird fortgeführt:

**Martin Quack:** Das letzte (Jürgen Mittelstraß hatte abschließend festgestellt: „[Modelle sind] weder wahr noch falsch, sondern anwendungsstark oder anwendungsschwach [...] Es ist ein *pragmatisches* Kriterium, kein *Wahrheitskriterium*, das sie bestimmt.“, vgl. S. 67) löst die Frage überhaupt nicht, denn was entscheidet denn, was anwendungsstark und anwendungsschwach ist. Der Physiker würde sagen, wenn es falsch ist, ist es anwendungsschwach!

**Horst Bredekamp:** Man könnte sich fragen, ob die Wahrheitsfrage sich verlagert. Bei Modellen ist es die Frage nach der Angemessenheit, die sich an die Stelle der Wahrheitssuche setzt: Sind Modelle anwendbar oder sind sie es nicht? In dieser Frage ist das Problem ihres konstruktiven Eigengewichtes enthalten.

**Jürgen Mittelstraß:** Aber sie bleibt pragmatisch, und sie wird auch immer pragmatisch beantwortet und nicht ein für allemal – das ist das Entscheidende.

**Klaus Pinkau:** Aber Modellvorstellungen müssen schon Elemente in sich tragen, die sich in Zukunft nicht als unwahr herausstellen, wenn sie denn Wissenschaft genannt werden wollen. Sonst sind Modelle im Vorfeld der Wissenschaft heuristische Überlegungen, Spekulationen, aber noch nicht Wissenschaft. Deshalb trägt schon der Begriff Wis-

senschaft das in sich, was ich kumulativ genannt habe. Ob das nun die Wahrheit ist oder ob das die Modelle sind, spielt doch gar keine Rolle. Wir könnten uns ja dazu entschließen, ein Großteil dessen, was wir betreiben, nicht Wissenschaft zu nennen.

**Jürgen Mittelstraß:** Die Frage ist, ob wir für den Wissenschaftsbegriff wirklich den Wahrheitsbegriff benötigen. In der Regel sind es Rationalitätskriterien, (methodische) Standards der Disziplin, denen wir folgen. Wahrheit ist ein hehres Wort in diesem Zusammenhang. Es ist gewissermaßen das Versprechen der Wissenschaft in Geltungszusammenhängen, und es ist unsere wissenschaftliche Hoffnung. Wenn diese enttäuscht wird, oder wenn sich das, was wir als Wahrheit schon glaubten dingfest gemacht zu haben, als Irrtum erweist, gefährdet das die Wissenschaft und ihre Rationalität nicht.

**Klaus Pinkau:** Doch es geht an der Frage vorbei; denn ob ich das Wahrheit nenne oder begrifflich anders fasse, spielt meiner Meinung nach keine Rolle. Der Begriff des Wissens beinhaltet – und es gibt Beispiele aus der Physik –, daß ich bestimmte Erkenntnisse in der Zukunft nicht ohne weiteres als veränderbar bzw. überwindbar ansehen kann.

**Helmut Schwarz:** An Herrn Bredekamp und Herrn Mittelstraß: In den Naturwissenschaften ist die Frage nach der Zweckmäßigkeit eines Modells relativ leicht zu beantworten, man kann Kriterien benennen. Gilt das auch für die Kulturwissenschaften?

**Horst Bredekamp:** Natürlich sind die Kriterien, die die Qualität eines Kunstwerkes bestimmen sollen, „weicher“ und daher oft auch schwieriger zu handhaben als die Überprüfung anhand von Messungen. Dennoch habe ich gerade am Beispiel des Baummodells der Evolution zu zeigen versucht, daß die Makromodelle der Naturwissenschaften kaum weniger kulturell bedingt sind als die der Kulturwissenschaften. Hierin liegt die grundlegende Gemeinsamkeit.

Das soll die naturbedingten graduellen Unterschiede nicht verwischen, aber ich nenne nur ein Beispiel dafür, wie sich auf dem Gebiet der Kunstgeschichte die Frage nach den Kriterien, also nach dem „Richter“ im Sinne von Herrn Pinkau, stellt: Eine Skulptur kommt auf den Tisch und jemand, der sich ein Leben lang mit spätgotischer Skulptur beschäftigt hat, sagt, so schnell als seine Lippe sich bewegen können: „Geschaffen 1485 im Herbst, Würzburg“. Das ist eine Aussage, die aus jahre- oder jahrzehntelanger Übung im stilisti-

schen Baummodell der Entwicklung resultiert.<sup>7</sup> Diese Aussage kann durch Quellenstudien und möglicherweise auch durch Laboruntersuchungen dendrochronologischer Art überprüft werden. Schließlich spielt die Ökonomie eine Rolle. Wenn Sie eine Michelangelo-Zeichnung abschreiben, dann mindern Sie den Wert von etwa 15 Mio. auf vielleicht 40.000 Euro. Wenn ein Kollege nur Gefälligkeitsexpertisen macht, wird es ihm nicht weniger schlecht ergehen als einem Arzt, der ständig Kunstfehler begeht.

**Jürgen Mittelstraß:** Sie haben die Frage an die Kulturwissenschaften oder die Geisteswissenschaften gestellt. In dieser Form ist sie kaum beantwortbar. In unterschiedlichen Fächern, in unterschiedlichen Disziplinen der Geisteswissenschaften wird das, was hier gemeint ist, jeweils ganz anders gehandhabt. Häufig wird die Wahrheitsfrage auch gar nicht mehr gestellt. Auch von Modellen ist hier höchst selten die Rede. Sie müssen schon zur Kunsttheorie gehen, zur Kunstgeschichte, um auf sie zu stoßen. Der Modellbegriff – so behaupte ich – ist zunächst einmal in der Wissenschaftstheorie klar, jedenfalls dort, wo diese sich als Wissenschaftstheorie spezieller Disziplinen versteht. Ob das auch in der Geschichtswissenschaft, in der Literaturwissenschaft oder in der Sprachwissenschaft so ist, mag dann ganz anders aussehen.

Ich würde gern noch einmal kurz auf das, was Herr Pinkau sagte, reagieren: Ich glaube nicht, daß der Wahrheitsbegriff tatsächlich der entscheidende Begriff ist, der den wissenschaftlichen Status einer Aussage, eines Systems, einer Theorie bewertet. Den wissenschaftlichen Anspruch binden wir vielmehr an das Maß der Begründungs- und Beweis- oder Bestätigungsleistung, nicht so sehr an den Begriff der Wahrheit. Es ist uns dabei völlig unbenommen, eine Aussage als wahr zu bezeichnen, wenn eine Begründung geleistet oder ein Beweis vorgelegt wurde, aber immer gewärtig, daß in der weiteren Entwicklung die Begründung sich doch als unzureichend, der Beweis sich doch als fehlerhaft herausstellen könnte, womit dann auch der Wahrheitsanspruch wieder zurückgenommen werden muß.

Der Begriff des Wissens ist nicht mit dem Begriff der Wahrheit verheiratet, so daß wir behaupten müßten – und jetzt übernehme ich Ihre Terminologie, das heißt die Terminologie Thomas Kuhns –, das Wissen schreite kumulativ voran. Es gibt kumulative Teile des Wissens, jeder in seiner Disziplin vermag sie zu benennen; sie bilden in der Regel das, was wir als das Lehrbuchwissen einer Disziplin bezeichnen. Und es gibt nicht-kumulative Teile, in denen nach dem Verfahren von *trial and error* die Dinge jederzeit offen sind.

---

<sup>7</sup> Soeben ist die grundlegende Arbeit erschienen: Schmidt-Burkhardt, A.: *Stammbäume der Kunst. Zur Genealogie der Avantgarde*, Berlin 2005.

Die zentrale Position, die der Wahrheitsbegriff vielleicht einmal hatte – ich bezweifle, ob er wirklich in einem anderen als emphatischen Sinne derart mit der Wissenschaftsentwicklung verbunden war –, gibt es nicht mehr. Und so stellen sich für mich die Dinge sehr viel harmloser, allerdings auch sehr viel gemischter dar.

**Jürgen Ehlers:** Zu letzterem: Das Ziel der Physik und ihre Produkte sind nicht überprüfte adäquate Modelle, sondern adäquate Theorien für einen großen Erfahrungsbereich. Und es hat sich herausgestellt, daß es gewisse sogenannte abgeschlossene Theorien gibt – wenn ich Heisenbergs Terminus benutzen darf –, von denen man mit einem ziemlich starken Recht behaupten kann, sie seien endgültig wahr: nämlich in einem begrenzten Erfahrungsbereich mit einer oft sehr hohen, wenn auch nicht unendlich großen Genauigkeit. Von der klassischen Mechanik beispielsweise, kann man mit einigem Recht sagen, daß sie endgültig wahr ist in einem bestimmten Bereich. Die Quantenmechanik der Atome und Moleküle ist ebenfalls in einem weiten Bereich endgültig wahr. Zumindest in solch abgeschlossenen Theorien kann man – glaube ich – die Produkte der Physik sehen.

Daß diese Produkte von den Menschen, die sie erfunden haben, unabhängig sind, das scheint mir auch ganz klar zu sein. Es gibt ja sogar Fälle, bei denen der Urheber einer Theorie später gar nicht glücklich war über das, was aus der Theorie geworden ist. Aber die Menge der empirischen Erfolge ist eben so groß, daß man sich dem nicht entziehen kann. Die Theorien lösen sich also durchaus von ihren Urhebern, und sie sind in dem Sinne objektiv, als sie unabhängig von der einzelnen Person sind, die die Theorie beurteilt oder benutzt.

Trotz der Einschränkung – die mir einleuchtet – bezüglich der Aussage über kumulative Wissenschaft, es ist schon so: Dinge, die einmal mit einer abgeschlossenen Theorie in einem bestimmten Bereich erfaßt worden sind, die werden später niemals falsch. Durch die Quantenmechanik ist die klassische Mechanik nicht falsch geworden. Und hier sehe ich einen Fehler in der Kuhnschen Darstellung, auch in dem Übertreiben der Ablösung der Paradigmen durch neue.

**Julian Nida-Rümelin:** Es zeichnet sich hier ein wenig der Gegensatz zwischen eher instrumentalistischen und eher realistischen Sichtweisen ab. Die Unterscheidung, die Sie, Herr Mittelstraß, vorhin vorgenommen haben, halte ich für sehr sinnvoll. Sie behebt manche Konfusionen, die sich leicht in die Debatte einschleichen; bei unserem jetzigen Grundproblem jedoch – so glaube ich – hilft die Unterscheidung noch nicht. Man kann ja Realist sein und die regulative Idee der Wissenschaft, daß wir hier irgend etwas Reales versuchen, angemessen wirklichkeitsabbildend zu beschreiben, aufrechterhalten und trotz-

dem den Wahrheitsbegriff für ganz unergiebig ansehen. Ich bin in diesem Sinne Deflationist und der Auffassung, daß man vom Wahrheitsbegriff ablassen sollte; er ist philosophisch so vorbelastet, daß man auch ohne ihn auskommt.

Ich glaube aber nicht, daß man ohne Realismus auskommt. Insofern überschneidet sich das teilweise mit dem, was zuletzt von Herrn Ehlers nochmals gesagt worden ist. Ich will das plausibel machen, und zwar im Zusammenhang mit dem Modellbegriff. Nehmen wir die klassische Physik: Kraft = Masse x Beschleunigung. Das, was damit genau gemeint ist, wird erst klar am Beispiel bestimmter Modelle: der Pendelbewegung, der Planetenbewegung, was auch immer. Aber diese Modelle sind für uns deswegen so interessant, weil wir glauben, sie idealisierten etwas, das wir in der Natur vorfinden: Planetenbewegung ist klar, Pendelbewegung ebenso, was man ja auch am Pendel im Deutschen Museum sehr schön beobachten kann. Und damit kommt in diese Art der Verwendung von Modellen ein Schuß Realismus hinein.

Es mag andere Arten von Modellen geben, selbstverständlich, und ich verstehe sehr gut, daß gerade Physiker und auch andere Naturwissenschaftler an diesem Rest Realismus festhalten wollen, selbst wenn sie konfrontiert sind mit quantenphysikalischen Modellen, die sich der Veranschaulichung in einer merkwürdigen Form sperren. Man möchte eben festhalten: Wir haben hier nicht nur ein Instrument, um zum Beispiel bestimmte Prognosen zu erstellen, sondern es geht um mehr – wir beschreiben etwas mehr oder weniger adäquat.

**Jürgen Mittelstraß:** Möglicherweise sind wir viel näher beieinander, als wir denken. Und es wäre reizvoll, hier die Frage „wie wissenschaftlich ist der wissenschaftliche Realismus?“ zu diskutieren. Als Realist (mit konstruktivistischem Einschlag) verstehe ich mich erkenntnistheoretisch auch. Ich meine nur, daß sich dieses Verständnis nicht am Modellbegriff entscheidet. Ein einfacher Hinweis darauf, daß wir es in vielen Fällen mit äquivalenten Modellen zu tun haben oder mit Modellen, die sich ineinander transformieren lassen – Modellen ein und derselben Realität –, genügt hier vielleicht schon. Wie nah oder wie fern Modelle jener Realität stehen, die wir zu beschreiben beanspruchen, das wäre schon für sich genommen eine interessante Frage – allerdings wohl keine, die uns grundsätzlich auseinanderbrächte.

**Horst Bredekamp:** Zu Herrn Duddeck: Ich fand an Ihrem Beitrag hochinteressant, daß im Schema wie auch in Ihrer Schlußbemerkung der Begriff der Intuition und der Erfahrung bei der Bewertung und Erzeugung von Modellen eine markante Rolle spielte.

**Wolfgang Klein:** Ich würde gern noch einmal auf die Frage von Herrn Schwarz zurückkommen, weil die nämlich letzten Endes die Geistes- und Kulturwissenschaftler trifft, und dem müssen wir uns stellen. Es handelt sich nämlich nicht um die Frage nach der Wahrheit bzw. nach der letzten Wahrheit, sondern um die nach den Kriterien der Überprüfbarkeit. Wir haben heute morgen dieses schöne Zitat von Pasteur gehört, mit dem er sagt, die Fruchtbarkeit wäre eigentlich wichtiger als die Wahrheit.

Was das betrifft, befinden sich die Geisteswissenschaftler zuweilen in einer guten Position. Die gesamten postmodernistischen Theorien sind außerordentlich fruchtbar, aber die Frage der Wahrheit stellt sich hier in einem gewissen Sinne gar nicht, weil es nämlich keine Kriterien der Überprüfbarkeit gibt. Und sie haben zu Recht gesagt, Herr Mittelstraß, daß das in den einzelnen Disziplinen unterschiedlich aussieht. Aber wir müssen uns wirklich dieser – in meinen Augen – allerunbequemsten Herausforderung der Naturwissenschaft ernsthaft stellen. Können wir also vernünftige Kriterien der Überprüfbarkeit angeben?

Es folgen die eingeladenen Kurzvorträge von **Jörg Rheinberger** (vgl. S. 69ff.) und **Herfried Münkler** (vgl. S. 75ff.), die in den dritten großen Fragenkomplex überleiten. **Jörg Rheinberger** spricht zum Thema: „Überlegungen zum Begriff des Modellorganismus in der biologischen und medizinischen Forschung“, **Herfried Münkler** macht Ausführungen über „Modelle im politisch-militärischen Bereich“.

Unter Leitung von **Horst Bredekamp** findet die Diskussion ihre Fortsetzung:

**Martin Quack:** Die Frage nach den Kriterien der Überprüfbarkeit, die jetzt mehrfach angesprochen wurde, faßt die drei großen Fragen zusammen: Beantwortet werden soll, wer der Richter über die Modelle ist, welches die Beziehung zur Wahrheit ist und was die Wissenschaft damit macht.

Was nun die erste Antwort angeht, so ist Herr Ash der Auffassung, daß zum Schluß doch die Menschen die Richter über die Modelle sind. Ich bin mir da nicht so ganz sicher. In der Frage nach der Beziehung zur Wahrheit, können wir – glaube ich – nicht soweit gehen wie Herr Ehlers, der sagt, das Modell ist eine Wahrheit. Auch die Theorie ist nicht die Wahrheit, aber sie enthält eine Wahrheit, und zwar mehr oder weniger. Es handelt sich nicht einfach um eine Ja- oder Nein-Antwort, sondern um eine quantitative Frage. Und was nun den dritten Komplex betrifft: Max Planck hat gesagt, die falschen Theorien sterben nicht, weil ihre Vertreter vom Gegenteil überzeugt werden, sondern weil die Befürworter der falschen Theorien aussterben. Die Antwort auf Herrn Ash wäre: Na ja, wenn man eben Flugzeuge baut, die abstürzen, und wenn man sich nicht ernähren kann, dann stirbt man eben aus. Es gibt also einen solchen Richter.

**Christoph Markschies:** Ich würde noch einmal anknüpfen wollen an die Antwort von Herrn Mittelstraß auf die Frage von Herrn Schwarz und möchte dabei zum dritten Punkt, zur „Fesselung“, kommen. Herr Mittelstraß hatte ja die Vermutung geäußert, daß auch in Disziplinen, über die er nicht urteilen wollte – Geschichts- und Literaturwissenschaften –, Wahrheit eine relativ geringe Rolle spielt. Das würde ich für die Geschichtswissenschaft unterstützen. Dort gibt es eine Falsifikation auf ganz schlichter Ebene. Ein bestimmtes Phänomen, das bisher übersehen wurde – ich benutze absichtlich nicht das Wort ‘Quelle’ –, taucht auf und widerlegt auf diese Weise eine Theorie. Damit argumentiere ich in die Richtung, die Herr Nida-Rümelin eingeschlagen hat: Ich denke, daß eine Theorie über Modelle und Modellbildung, die nicht wenigstens den schwachen Realismus dieser Widerständigkeit der Phänomene in Rechnung stellt, problematisch ist.

Das bringt mich schließlich auf die im Augenblick eigentlich zentrale Fesselungsfrage. Ich finde es überaus erfreulich an der Wissenschaft, daß es beides gibt: Sowohl die von Herrn Bredekamp beschriebene Wut der Modellbildung, diese ungeheure Energie, die sich über alles hinwegsetzt und in der Begeisterung ein Modell konstruiert, als auch die Widerständigkeit der Phänomene, die einen glücklicherweise stolpern läßt. Die Antwort auf die Fesselungsfrage ist damit: Nein. Die totale Entfesselung wird es nie geben, vermutlich schon aus rein psychologischen Gründen. Aber man kann, wenn man sensibel für die Widerständigkeit der Phänomene ist, zumindest an der langen Leine gefesselt sein. Und das ist ja immerhin auch schon etwas.

**Wilhelm Voßkamp:** Was bedeuten die Modelle in der Literaturwissenschaft? Die Frage ist eindeutig zu beantworten unter Gesichtspunkten ihrer Fruchtbarkeit. Entsprechend einer Annahme von Friedrich Schlegel, wonach sich gute Literatur dadurch auszeichne, daß sie stetig und im besten Fall „unendlich“ auslegbar sei. Auf die Literaturwissenschaft angewandt: Modelle sollten die Gewähr dafür bieten, daß sie immer wieder neue Auslegungen und Interpretationen ermöglichen. Die Stärke der Interpretationswissenschaften bestünde dann darin, daß sie stets Entfesselungen von Modellen betreiben. Dies wäre auch eine Antwort auf Herrn Klein insofern, als die Postmoderne die eigentliche, radikale Entfesselung von Modellen liefert. Hier ist der Neostrukturalismus die Antwort auf den Strukturalismus, der die Modelle vorgab.

**Manfred Bierwisch:** Noch eine kurze Variante zu der Gretchenfrage von Herrn Schwarz nach den Kriterien für die Akzeptabilität von Modellen in den Kulturwissenschaften. Ich denke, daß sich diese Frage nicht einheitlich beantworten läßt. Man wird unterscheiden müssen zwischen Modellen, die hinsichtlich bestimmter Aspekte überprüfbar sind, und

solchen, bei denen die Überprüfbarkeit unbestimmt und offen ist, oder die überhaupt ganz anderen Spielregeln unterliegen, als sie in den Naturwissenschaften gelten. Ein Beispiel mit einigermaßen verbindlicher Überprüfbarkeit ist die Frage, ob das klar und explizit formulierte Modell des Konditionslernens als Modell für den Kenntniserwerb generell gelten kann. Diese durchaus ernsthaft vertretene Annahme läßt sich beispielsweise anhand des Spracherwerbs mittels klarer Kriterien und einschlägiger Daten falsifizieren.

Hier ist also an einem nicht trivialen Exempel die Gültigkeit von Modellen im Bereich der Geisteswissenschaften entschieden worden – im Sinne der begründeten Zurückweisung des Modells. In zahlreichen anderen Fällen ist eine solche Überprüfung anhand belastbarer Kriterien freilich nicht gegeben und oft eben auch gar nicht angestrebt.

**Jürgen Ehlers:** Nur noch kurz zum Begriff der Fesselung für den Bereich der sogenannten exakten Wissenschaften. Das Wort Fesselung deutet ja zunächst eine negative Bewertung an; wer mag schon gefesselt sein. Die Fesselung besteht jedoch in der Vorgabe eines bestimmten begrifflichen Rahmens, innerhalb dessen spezifische Erfahrungen beschrieben werden. Dieser Rahmen ermöglicht es überhaupt erst, daß eine Theorie widerlegt werden kann. Wenn man allzu vage und unbestimmt über die Dinge redet, dann kann man sie nicht widerlegen.

Seit Galilei ist der Fortschritt zumindest in der Physik zu einem wesentlichen Teil dadurch möglich geworden, daß man sich jeweils auf bestimmte Begriffssysteme festlegt, die immerhin so scharf umgrenzt sind, daß es einen Sinn hat zu sagen: Bestimmte Folgerungen aus der jeweiligen Theorie sind empirisch widerlegt. Durch diese Widerlegung wird dann eine Modifizierung möglich, und auch diese verbesserte Theorie wird schließlich widerlegt werden können. In dem Sinne spielt gerade die Fesselung und die Entfesselung in dem ganzen Prozeß der Verbesserung von Theorien und der Begriffssysteme eine sehr positive Rolle.

**Mitchell G. Ash:** Eine Frage an Herrn Münkler: Ich finde die Fesselungsformulierung in Ihrem Fall ganz besonders spannend und interessant. Vor allem, wenn man sich nicht nur nach dem Verhältnis zwischen zwei kriegsführenden Stäben richtet, wie Sie es getan haben, sondern auch danach fragt, wie es sozusagen im Inneren des Militärs oder der Kriegsführung aussieht. Pointiert gefragt: Gibt es innerhalb einer derart technisierten Kriegsführung oder der kriegsführenden Gruppe Widerstände? Gibt es nicht irgendwelche Befürworter der Intuition oder sind sie alle derart vom Planspiel gefangen – Stichwort Entfesselung –, daß diese Möglichkeit niemandem mehr einfällt? Das würde mich sehr interessieren.

Eine allgemeinere Frage: Herr Quack hat das Wort Abbild in einer früheren Wortmeldung verwendet, und ich habe die ganze Zeit darüber nachgedacht, was damit gemeint sein kann. Das schließt daran an, was Herr Mittelstraß vorhin unter terminologischer Vielfalt formuliert hat. In diesem Fall handelt es sich um das Wort „Abbildung“, das allerdings sehr viele Bedeutungen in den verschiedenen Disziplinen zu haben scheint. Etwas polemisch jetzt an Herrn Ehlers gefragt: Wovon sind die einzelnen Gleichungen des Theoriegebäudes, von dem Sie hier sehr anschaulich gesprochen haben, in welchem Sinne ein Abbild? Kann es sein, daß die einzelnen Gleichungen gerade nichts spezifisches „abbilden“, während das Theoriegebäude als Ganzes, also das System der Gleichungen zusammengenommen, zwar als Abbild von etwas in einem sehr abstrakten Sinne, aber keinesfalls als Eins-zu-eins-Abbildung von irgend einem Gegenstand oder Vorgang der Natur verstanden werden kann? Gerade das ist der Sinn des Boltzmannschen Zitats. Boltzmann steht an der Schwelle einer weitreichenden Entwicklung in den theoretischen Naturwissenschaften, nämlich der Abkoppelung sowohl der mathematischen als auch der physikalischen Theoriebildung von ihrer Abbildungsfunktion.

**Werner Hildenbrand:** Was machen die Wissenschaftler mit den Modellen, und zwar aus Sicht eines Wirtschaftswissenschaftlers? – Ich glaube, es gibt keine andere Disziplin, in der das Wort Modell so häufig benutzt wird wie in den Wirtschaftswissenschaften. Dennoch wurde über Modelle in den Wirtschaftswissenschaften bis jetzt nicht viel gesprochen. Die Wirtschaftstheoretiker jedenfalls bezeichnet man ja als Leute, die nur in Modellen denken können. Die ökonomischen Modelle sind sicherlich nicht das, was Herr Mittelstraß vorher als mathematisches Modell definiert hat. Im Gegenteil. Sie sind extrem künstliche Konstruktionen – Karikaturen muß man fast sagen – von realen Situationen, und sicherlich wäre das Wort Fiktion besser als der Begriff Modell.

Nun könnte man natürlich fragen, warum beschäftigen sich dann die Wirtschaftswissenschaftler mit Modellen: Zum einen gibt es eine Gruppe von Wirtschaftswissenschaftlern, die hoffen, daß man durch das Studium zahlreicher dieser Modelle doch irgendwann etwas über die reale Welt lernt. Diesem Glauben hängen viele an. Das ist vergleichbar mit der historischen Schule vor hundert Jahren, die auch davon ausging, durch Detailstudium, durch Sammeln von Daten usw. werde man eines Tages die große Einsicht in die Zusammenhänge gewinnen. Das sind die Optimisten, doch woher sie diesen Optimismus nehmen, weiß ich nicht. Zumindest liefert er die Begründung dafür, warum man die Modelle so feilt, ausbaut und analysiert.

Zum anderen gibt es Ökonomen – auch ich gehöre dazu –, bei denen diese Hoffnung nicht so ausgeprägt ist und die sehr skeptisch sind. Aber – und jetzt komme ich

zum Punkt – es gibt bei den Wirtschaftswissenschaftlern eine dritte Gruppe: Das sind die Berater für die Politik oder für die Wirtschaft. Diesen Leuten kommt es überhaupt nicht darauf an, ob ein Modell realistisch ist. Für diese Ökonomen ist das Modell ein Werkzeug der Argumentation.

Ein Beispiel: Eine bestimmte wirtschaftspolitische Maßnahme wird vorgeschlagen, die eine bestimmte Konsequenz haben soll. Jemand findet das nicht gut, er hat eine andere Vision. Was macht er? Er bastelt ein Modell, für das diese Folgerung der wirtschaftspolitischen Maßnahme nicht zutrifft. Er hat also ein Argument dagegen. Wäre er zufällig von der Gegenseite bestellt worden, dann hätte er natürlich genauso ein Modell konstruieren können, mit dem der erwünschte Effekt eingetreten wäre. Das heißt, hier werden Modelle als Argumentationswerkzeuge benutzt. Diese können sehr wirksam sein und können auch Gutes erreichen, wenn man die richtige Vision hat und mit solchen Modellen dann überzeugen kann.

Aber das ist natürlich zugleich ein gewisser Mißbrauch der Modelle oder der Wissenschaft. Man begründet Argumente mit einem scheinbar gesicherten Wissen. Dennoch sollte man die Wirtschaftswissenschaften wegen dieser Praxis nicht zu sehr kritisieren. Meines Erachtens gibt es schon eine Rechtfertigung dafür, sich auch in den Wirtschaftswissenschaften mit Modellen sinnvoll zu befassen.

**Hasso Hofmann:** Ich komme noch einmal auf den Anfang, also auf den ersten Komplex zurück. Ich habe mich gefragt und frage mich, auf welche Art von Geisteswissenschaft oder Geisteswissenschaften die vorgegebenen Fragen, so wie sie in Richtung Modellbildung, Modellentwicklung, Modifikationen und Verifikationen gestellt wurden, passen wollen oder sollen.

In der Rechtswissenschaft, die – was immer sie sein mag – jedenfalls keine Naturwissenschaft ist, spricht man zwar gelegentlich von Regelungsmodellen im Sinne von wirklichen oder möglichen Regelungszusammenhängen und Regelungssystemen oder man spricht von dogmatischen Konstruktionen und Theorien, aber die haben nicht die geringsten visuellen noch irgendwelche haptischen Qualitäten. Vielmehr verdichten sie rechtslogische, sprachanalytische, rechtssystematische und rechtsdogmatische Überlegungen. Dazu werden also keine Zitatvorstellungen, Bestandteile unserer Lebenswelt, sondern gesetzliche Anordnungen und deren lehrhafte Verarbeitung verwendet. Derartige juristische Gedankenkonstruktionen können sich allerdings – wie Modelle in anderen Disziplinen – von ihren Urhebern lösen, ein Eigenleben gewinnen und oft genug zur Fessel werden. Ihre Überwindung geschieht dann freilich ausschließlich durch neue Konstruktio-

nen oder Theorien eines höheren Nützlichkeitsgrades dank eines höheren internen Kohärenzwertes, aber nicht durch bessere Erkenntnis einer präexistenten Wirklichkeit.

Ferner habe ich in den vorgegeben Quæstiones keinen Leitfaden gefunden für den Bereich der praktischen Vernunft im allgemeinen und der Rechts- und Staatsphilosophie im besonderen. Man mag den herrschaftsfreien Diskurs der Diskurstheorie ein Modell nennen. In Wahrheit ist es eine kontrafaktische Annahme, deren Richtigkeit sich nicht in der adäquaten Wirklichkeitserfassung oder Abbildung, sondern in ihrer analytischen und hermeneutischen Leistungsfähigkeit für einen praktischen Konsens erweist.

Allerdings gibt es in dem jetzt angesprochenen Bereich ein historisches Beispiel des Modelldenkens von hoher – allerdings nurmehr geschichtlicher – Bedeutung. Es beruht auf der alten Legende von Naturzustand und ursprünglichem Vertragsschluß bei der Sozietätsbildung. Daraus hat im 17. Jahrhundert Hobbes tatsächlich das Modell einer Art von Physik der Vergesellschaftung und der Staatsbildung gemacht. Und Hobbes selbst hat das Modell im Titelkupfer seines „Leviathan“ visualisieren lassen. In dieser Repräsentation treffen sich die frühneuzeitliche mechanische Physik und die daran orientierte Sozialphilosophie des methodologischen Individualismus. Aber das blieb eine wissenschaftsgeschichtliche Episode. Schon bei Locke, Rousseau und Kant hat diese Theorie den Charakter eines visibilisierbaren Modells verloren. Und die Auferstehung dieses Gedankengangs in der außerordentlich einflußreichen Gerechtigkeitsphilosophie von John Rawls vor gut 30 Jahren ist ein Gedankenexperiment zur Darstellung der Konsensfähigkeit von Handlungsmaximen. Überprüfbarkeit, Weiterentwicklung, Adäquanz sind dafür keine angemessenen Kategorien. Heuristische Fiktionen sind keine Modelle 'von etwas'.

Also noch einmal: Auf welche Art von Geisteswissenschaften zielt die vorgegebene Fragenkette? Meine These: Nur auf solche Geisteswissenschaften, die es mit Repräsentationen von wirklichen oder imaginären Gegenständen zu tun haben. Darauf deutet schon die einleitungsweise gegebene Definition des Modells durch den Physiker Boltzmann hin, die – wie man sieht – um den Begriff der Repräsentation kreist. Darauf verweist die anschließende Anrufung Leibniz' in eben diesem Papier, dessen Metaphysik und Erkenntnistheorie ihren Schlüsselbegriff bekanntlich in der Repräsentation haben. Und das zeigte sich schließlich heute morgen in den vielen Beiträgen, die wir gehört haben, für die Repräsentation ebenfalls ein Schlüsselbegriff ist. Ich verweise nur auf das Papier von Herrn Ehlers, letzter Absatz „Repräsentation konkreter Sachverhalte“.

Meine These ist also, wo – anders als in Erkenntnistheorie und Kognitionswissenschaft, da spielt der Terminus eine zentrale Rolle –, also: wo – anders als in Kunstwissenschaft und insbesondere auf dem heutigen Stand der Bildwissenschaft oder in der Vor- und Darstellung experimenteller naturwissenschaftlicher Erkenntnis – der Begriff der Repräsen-

tation keine zentrale Bedeutung hat, da bleibt auch die Berührung mit den vorgegebenen Quæstiones in dieser Form semantisch zufällig und damit ohne Erkenntniswert.

**Horst Bredekamp:** Zunächst zu Herrn Münkler: Martin Warnke hat gerade einen Artikel publiziert über die Einführung genau dessen, was Sie beschrieben haben.<sup>8</sup> Er hat die Geometrisierung und Rationalisierung der Militärstrategie untersucht und kam zu dem Schluß, daß theologische Überlegungen in diesem Prozeß mitwirken. So ist in der Modellbildung des Militärs das Problem der Unerklärbarkeit nicht diskutiert worden: Warum gibt es das Reich des Satans, als welches der Krieg formuliert worden ist? Als absoluter Gegenpol zur Schöpfung kann der Krieg in der Schöpfungstheorie nicht rationalisiert werden. Als Kompensation – dafür sprechen viele Quellen – hat es die Überlegung gegeben, daß im Krieg wenigstens eine Form von geometrischer Rationalität strategischer Art eingesetzt werden muß. Das heißt, die Einführung der Stäbe und des Prozesses, den Sie beschrieben haben, ist eine Funktion, die nicht allein aus dem Militärischen kommt, sondern möglicherweise aus der Reflektion dessen, was als göttliche Schöpfung definiert werden kann. Und wenn dieser Gedanke in der von Ihnen beschriebenen Entfesselung jetzt zu einem Ende kommt, dann wäre in der Asymmetrie der Kriegsführung in der Argumentation des 17. Jahrhunderts das Reich des Satans tatsächlich existent. Dies würde den oftmals spürbaren religiösen Charakter der Diskussion nachvollziehbar machen, so schwer es uns fällt. Dies wäre vielleicht ein Ansatzpunkt für die Weiterführung der Diskussion.

Zu Herrn Hofmann: Der Spruch eines der frühen amerikanischen Präsidenten, John Quincy Adams, daß die Demokratie auf Bilder verzichte, ist selbst ein Modell, ein protestantisch-ikonoklastisches.<sup>9</sup> Ich würde dies mit der Anregung einwenden wollen, die Modelldiskussion möglicherweise zu einem späteren Zeitpunkt fortzuführen und aus diesem Anlaß jene Fächer und Disziplinen zu hören, die hier heute nicht zu Wort kamen: unter anderen die Ökonomie, Recht, Theologie und Stadtplanung.

Das heutige Streitgespräch war natürlich auch ein Modell, und ob es sich als solches bewährt hat, mag fraglich sein; vielleicht war es überorganisiert. Ohne zusammenfassen und ohne harmonisieren zu wollen, kann man feststellen, daß es zahlreiche Übereinstimmungen gibt. Dies zeigen auch die letzten Äußerungen von Herrn Voßkamp und Herrn

---

<sup>8</sup> Vgl. Warnke, M.: Raumgreifende Graphik. In: Bildwelten des Wissens. Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik, Bd. 1.1, 2003, S. 79–88.

<sup>9</sup> Vgl. Müller, M. G.: Politische Bildstrategien im amerikanischen Präsidentschaftswahlkampf 1828–1996, Berlin 1997, S. 23.

Ash. Sie liegen in der Gemeinsamkeit der Frage, inwieweit Modelle öffnen und zugleich verengen.

**Klaus Pinkau**, der am Morgen die Debatte eröffnete, schließt das Streitgespräch mit folgenden Worten:

Ich möchte Ihnen allen sehr herzlich danken. Mir hat es sehr viel Spaß gemacht. Sie kennen ja sicher den Spruch: „Die ernste Sache ist das wahre Vergnügen“. Nun, dieses wahre Vergnügen habe ich heute morgen schon genießen dürfen. Geplant war die Sache als akademisches Gespräch; ich glaube, das ist es gewesen. Gemeinsam haben wir versucht, zu den Wurzeln unseres Denkens in den verschiedenen Wissenschaften vorzudringen. Das ist uns teilweise gelungen. Wenn es nunmehr als Frucht dieser Veranstaltung noch weitere Debatten gibt, dann wäre ich sehr glücklich.

Wie bereits erwähnt, haben wir die Rechtswissenschaften und die Rechtsprechung heute gar nicht behandelt. Es ging auch nicht um eine vollständige Berücksichtigung aller Disziplinen, die in unserer Akademie vertreten sind, sondern eben darum, daß wir uns gegenseitig erzählen, warum wir was machen, und uns dabei vielleicht auch durch Fragen in eine Situation geführt fühlen, in der wir uns rechtfertigen müssen. Und solche Zustände des sich Rechtfertigmüssens sind immer Anlässe für Reflexion, für neue Ideen. Ich danke Ihnen sehr herzlich.

*Autoren*

*Ash, Mitchell G.*, Prof. Dr., geb. 1948; Ordentlicher Universitätsprofessor für Geschichte der Neuzeit, Universität Wien; Hauptfachrichtung: Neuere und Neueste Geschichte; dienstlich: Universität Wien, Institut für Geschichte, Karl-Lueger-Ring 1, A-1010 Wien, Tel.: 00 43/1/4 27 74 08 37, Fax: 00 43/1/42 77 94 08, e-mail: mitchell.ash@univie.ac.at

*Borbein, Adolf Heinrich*, Prof. Dr. Dr. h. c., geb. 1936; em. o. Professor der Klassischen Archäologie; Hauptfachrichtung: Klassische Archäologie; dienstlich: Freie Universität Berlin, FB Geschichts- und Kulturwissenschaften, Institut für Klassische Archäologie, Otto-von-Simson-Straße 11, 14195 Berlin, Tel.: 0 30/83 85 37 12, Fax: 0 30/83 85 65 78, e-mail: borbein@zedat.fu-berlin.de

*Börsch-Supan, Axel*, Prof. Dr., geb. 1954; o. Professor an der Universität Mannheim und Direktor des Mannheimer Forschungsinstituts Ökonomie und Demographischer Wandel; Hauptfachrichtung: Wirtschaftswissenschaft; dienstlich: Universität Mannheim, Mannheimer Forschungsinstitut Ökonomie, und Demographischer Wandel, 68131 Mannheim, Tel.: 06 21/1 81 18 61, Fax: 06 21/1 81 18 63, e-mail: axel@boersch-supan.de

*Bredenkamp, Horst*, Prof. Dr., geb. 1947; Professor für Kunstgeschichte an der HU Berlin und Permanent Fellow am Wissenschaftskolleg zu Berlin; Hauptfachrichtung: Kunstgeschichte als historische Bildwissenschaft; dienstlich: Humboldt-Universität zu Berlin, Philosophische Fakultät III, Kunstgeschichtliches Seminar, Dorotheenstraße 28, 10117 Berlin, Tel.: 0 30/20 93 44 98, Fax: 0 30/20 93 42 09, e-mail: horst.bredenkamp@culture.hu-berlin.de

*Brüning, Jochen*, Prof. Dr., geb. 1947; Professor für Mathematik; Hauptfachrichtung: Geometrische Analysis und Spektraltheorie; dienstlich: Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Mathematik, Rudower Chaussee 25, 12489 Berlin, Tel.: 0 30/20 93 25 22, Fax: 0 30/20 93 27 27, e-mail: bruening@mathematik.hu-berlin.de

*Duddeck, Heinz*, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h., geb. 1928; Emeritus; Hauptfachrichtung: Bauingenieurwesen; dienstlich: Technische Universität Braunschweig, Institut für Statik, Beethovenstraße 51, 38106 Braunschweig, Tel.: 05 31/3 91 36 67, Fax: 05 31/3 91 81 16, e-mail: h.duddeck@tu-bs.de

*Ehlers, Jürgen*, Prof. Dr., geb. 1929; Emeritus; Hauptfachrichtung: Theoretische Physik; dienstlich: Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, Am Mühlberg 1, 14476 Golm, Tel.: 03 31/5 67 71 10, Fax: 03 31/5 67 72 97, e-mail: [juergen.ehlers@aei.mpg.de](mailto:juergen.ehlers@aei.mpg.de)

*Ganten, Detlev*, Prof. Dr., geb. 1941; Gründungsdirektor des Max-Delbrück-Centrums für Molekulare Medizin (MDC) Berlin-Buch, Vorstandsvorsitzender der Charité – Universitätsmedizin Berlin; Hauptfachrichtung: Molekulare Medizin, Pharmakologie, Klinische Pharmakologie; dienstlich: Charité – Universitätsmedizin Berlin, Schumannstraße 20/21, 10117 Berlin, Tel.: 0 30/4 50 57 00 01, Fax: 0 30/4 50 57 09 00, e-mail: [ganten@charite.de](mailto:ganten@charite.de)

*Gerhardt, Volker*, Prof. Dr., geb. 1944; Hochschullehrer; Hauptfachrichtung: Philosophie; dienstlich: Humboldt-Universität zu Berlin, Philosophische Fakultät I, Institut für Philosophie, Unter den Linden 6, 10099 Berlin, Tel.: 0 30/20 93 28 31, Fax: 0 30/20 93 28 19; e-mail: [gerhardtv@philosophie.hu-berlin.de](mailto:gerhardtv@philosophie.hu-berlin.de)

*Gierer, Alfred*, Prof. Dr., geb. 1929; Direktor emeritus am MPI für Entwicklungsbiologie; Hauptfachrichtung: Biophysik; dienstlich: Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie, Spemannstraße 35, 72076 Tübingen, Tel.: 0 70 71/60 14 10, e-mail: [alfred.gierer@tuebingen.mpg.de](mailto:alfred.gierer@tuebingen.mpg.de)

*Grötschel, Martin*, Prof. Dr., geb. 1948; Professor an der TU Berlin, Vizepräsident des Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin und Sprecher des DFG-Forschungszentrums MATHEON „Mathematik für Schlüsseltechnologien: Modellierung, Simulation und Optimierung realer Prozesse“; Hauptfachrichtung: Angewandte Mathematik; dienstlich: Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin, Takustraße 7, 14195 Berlin, Tel.: 0 30/84 18 52 10, Fax: 0 30/84 18 52 69, e-mail: [groetschel@zib.de](mailto:groetschel@zib.de)

*Hildenbrand, Werner*, Prof. Dr., geb. 1936; Emeritus; Hauptfachrichtung: Wirtschaftstheorie; dienstlich: Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Institut für Gesellschafts- und Wirtschaftswissenschaften, Lennéstraße 37, 53113 Bonn, Tel.: 02 28/73 92 42, Fax: 02 28/73 79 40, e-mail: [fghildenbrand@uni-bonn.de](mailto:fghildenbrand@uni-bonn.de)

*Hofmann, Hasso*, Prof. Dr. Dr. h. c., geb. 1934; Emeritus; Hauptfachrichtung: Öffentliches Recht, Rechts- und Staatsphilosophie; dienstlich: Humboldt-Universität zu Berlin,

Unter den Linden 6, 10099 Berlin; Tel.: 09 31/8 73 88, Fax: 09 31/78 32 88, e-mail: info@hasso-hofmann.de

*Klein, Wolfgang*, Prof. Dr., geb. 1946; Direktor am MPI für Psycholinguistik; Hauptfachrichtung: Sprachwissenschaft; dienstlich: Max-Planck-Institut für Psycholinguistik, Wundtlaan 1, NL-6525 XD Nijmegen, Tel.: 00 31/24/3 52 14 53, Fax: 00 31/24/3 52 12 13, e-mail: klein@mpi.nl

*Knobloch, Eberhard*, Prof. Dr., geb. 1943; Universitätsprofessor/Akademieprofessor; Hauptfachrichtung: Geschichte der exakten Wissenschaften und der Technik; dienstlich: Technische Universität Berlin, Institut für Philosophie, Wissenschaftstheorie, Wissenschafts- und Technikgeschichte, Ernst-Reuter-Platz 7, 10587 Berlin, Tel.: 0 30/31 42 40 16, Fax: 0 30/4 01 36 13, e-mail: eberhard.knobloch@tu-berlin.de

*Költzsch, Peter*, Prof. Dr.-Ing. habil., geb. 1938; Emeritus; Hauptfachrichtung: Akustik; dienstlich: Technische Universität Dresden, Institut für Akustik und Sprachkommunikation, Mommsenstraße 13, 01069 Dresden, Tel.: 03 51/46 33 30 41, Fax: 03 51/46 33 70 91, e-mail: peter.koeltzsch@ias.et.tu-dresden.de

*Lucas, Klaus*, Prof. Dr.-Ing., geb. 1943; Universitätsprofessor; Hauptfachrichtung: Maschinenbau; dienstlich: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, Schinkelstraße 8, 52062 Aachen, Tel.: 02 41/8 09 53 80, Fax: 02 41/8 09 22 55, e-mail: lucas@lft.rwth-aachen.de

*Markschies, Christoph*, Prof. Dr., geb. 1962; Ordinarius für Ältere Kirchengeschichte (Antikes Christentum); Hauptfachrichtung: Kirchengeschichte; dienstlich: Humboldt-Universität zu Berlin, Theologische Fakultät, Lehrstuhl für Ältere Kirchengeschichte, Hausvogteiplatz 5-7, 10117 Berlin, Tel.: 0 30/20 93 47 35, Fax: 0 30/20 93 47 36, e-mail: christoph.marschies@rz.hu-berlin.de

*Mittelstraß, Jürgen*, Prof. Dr. Dr. h. c. mult., geb. 1936; Hochschullehrer; Hauptfachrichtung: Philosophie; dienstlich: Universität Konstanz, FB Philosophie und Zentrum IV, Philosophie und Wissenschaftstheorie, 78457 Konstanz, Tel.: 0 75 31/88 24 98, Fax: 0 75 31/88 25 02, e-mail: juergen.mittelstrass@uni-konstanz.de

*Münkler, Herfried, Prof. Dr., geb. 1951; Universitätsprofessor; Hauptfachrichtung: Politikwissenschaft; dienstlich: Humboldt-Universität zu Berlin, Philosophische Fakultät III, Institut für Sozialwissenschaften, Unter den Linden 6, 10099 Berlin, Tel.: 0 30/20 93 14 24, Fax: 0 30/20 93 13 24, e-mail: herfried.muenkler@rz.hu-berlin.de*

*Nida-Rümelin, Julian, Prof. Dr., geb. 1954; Inhaber des Lehrstuhls für Politische Theorie und Philosophie; Hauptfachrichtung: Philosophie; dienstlich: Ludwig-Maximilians-Universität München, Geschwister-Scholl-Institut, Lehrstuhl für Politische Theorie und Philosophie, Oettingenstraße 67, 80538 München, Tel.: 0 89/21 80 90 20, Fax: 0 89/21 80 90 12, e-mail: julian.nida-ruemelin@lrz.uni-muenchen.de*

*Pinkau, Klaus, Prof. Dr. rer. nat. h. c., PhD., DSc., geb. 1931; Emeritus; Hauptfachrichtung: Physik, Astrophysik, Fusionsforschung; privat: Meistersingerstraße 52a, 81927 München, Tel.: 0 89/91 29 90, Fax: 0 89/92 09 13 22, e-mail: pinkau-muenchen@t-online.de*

*Quack, Martin, Prof. Dr., geb. 1948; Ordinarius für Physikalische Chemie; Hauptfachrichtung: Physikalische Chemie; dienstlich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Laboratorium für Physikalische Chemie, Wolfgang-Pauli-Straße 10, CH-8093 Zürich, Tel.: 00 41/1/6 32 44 21, Fax: 00 41/1/6 32 10 21, e-mail: martin@quack.ch*

*Rheinberger, Hans-Jörg, Prof. Dr., geb. 1946; Direktor am MPI für Wissenschaftsgeschichte; Hauptfachrichtung: Wissenschaftsgeschichte; dienstlich: Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, Wilhelmstraße 44, 10117 Berlin, Tel.: 0 30/22 66 71 61, Fax: 0 30/22 66 71 67, e-mail: rheinbg@mpiwg-berlin.mpg.de*

*Schwarz, Helmut, Prof. Dr., geb. 1943; Professor der Chemie; Hauptfachrichtung: Chemie; dienstlich: Technische Universität Berlin, Institut für Chemie, Straße des 17. Juni 135 - Sekr. C 4, 10623 Berlin, Tel.: 0 30/31 42 34 83, Fax: 0 30/31 42 11 02, e-mail: helmut.schwarz@mail.chem.tu-berlin.de*

*Voßkamp, Wilhelm, Prof. Dr., geb. 1936; Universitätsprofessor, Emeritus; Hauptfachrichtung: Allgemeine Literaturwissenschaft und Neuere deutsche Literatur; dienstlich: Universität zu Köln, Kulturwissenschaftliches Forschungskolleg, 50969 Köln, Tel.: 02 21/ 4 70 67 60, Fax: 02 21/4 70 67 73, e-mail: w.vosskamp@uni-koeln.de*