

**Simulation und Erkenntnis.
Über die Rolle computergenerierter Simulationen
in den Wissenschaften**

Sybille KRÄMER (Berlin)

Mit 2 Abbildungen



Zusammenfassung

Der Begriff ‚Simulation‘ hat einen Doppelcharakter: lebensweltlich meint er ein vortäuschendes, modelltheoretisch aber ein erkenntniserzeugendes Verhalten. Gibt es ein gemeinsames Band beider Begriffsverwendungen? Dieses besteht in der Erzeugung einer Zeichenwelt, deren Ziel die nachbildende Hervorbringung des Oberflächenverhaltens eines Systems ist: simuliert werden Phänomene ohne die ihnen zugrundeliegende Tiefenstruktur. Schon am Beginn abendländischer Geistesgeschichte hat PLATON mit seinem ‚Liniengleichnis‘ darauf aufmerksam gemacht, dass die Wissenschaft nicht auskommt ohne die sinnliche Repräsentation ihrer Gegenstände mit Hilfe von Zeichenwelten, jedoch eines bildkritischen Bewusstseins um die Differenz von ‚Urbild‘ und ‚Abbild‘ bedarf. Was nun ist neu und innovativ an den computergenerierten Simulationen? Vier Springquellen computergenerierter Simulationstechniken lassen sich identifizieren: Es ist die Quadriga aus Mathematisierung, Modellierung, Visualisierung und Digitalisierung. Numerische Simulationen werden nötig, wenn das nichtlineare Verhalten von Systemen zu modellieren ist. Mathematisch beruhen sie auf der Diskretisierung eines kontinuierlichen Zeitverlaufs, so dass an die Stelle der analytisch exakten Beschreibung einer kontinuierlichen Bewegung eine getaktete lokale Berechnung tritt, deren ‚Zwischenräume‘ dann dunkel bleiben (müssen). Diese Simulationen stellen eine neuartige Vermittlung dar zwischen Theorie und Experiment. Sie können als Computerexperimente mit Theorien gekennzeichnet werden.

Abstract

The concept of simulation presents a double face: whilst in everyday life it suggests that something is ‘fake’, in science, on the other hand, it indicates knowledgeable ‘insight’. Is there a connection between these two uses of the concept? Their mutual dimension resides in the production of symbolic worlds, which aim to imitate the surface behavior of a system. Phenomena are simulated without their underlying deep structure. Going back to the beginning of the Western history of ideas, to PLATO’S ‘simile of the line’, we learn that the indispensable symbolic representation of scientific subjects requires consciousness of the difference between real world and symbolic world. Otherwise we would identify a fake with an insight. What is at stake and what is innovative within the realm of computer simulations? Modern simulations originate in the crossing of four developments: mathematization, modeling, visualization, digitalization. These four tendencies build the ‘quadriaga’ of modern simulations. Such simulations are necessary when the nonlinear behavior of a system has to be modeled. Mathematically they are grounded in the discretization of a continuous process: instead of the analytically precise and global description of a movement, a discrete, local calculation is given, the intervals of which remain opaque. Computer simulations can be characterized as a new kind of mediation between theory and experiment, as ‘computer experiments with theories’.

1. Zur Doppeldeutigkeit von ‚Simulation‘

Das Wort ‚Simulation‘ führt ein augenfälliges Doppelleben: Einerseits ist damit umgangssprachlich die ‚Verstellung‘ und das ‚Vortäuschen eines Sachverhaltes‘ gemeint. Von der lateinischen Begriffsgeschichte herkommend, bedeutet ‚simulatio‘ dann ‚Heuchelei‘ bzw. ‚Verstellung‘ und bezieht sich auf die täuschende Vorspiegelung von etwas, das gar nicht vorhanden ist.¹ Denken wir, was es bedeutet, eine Krankheit zu simulieren, statt tatsächlich krank zu sein: Durch die Imitation von Symptomen wird dabei die Erscheinungsform von etwas suggeriert, das ‚hinter‘ oder ‚unter‘ dieser Erscheinung gar nicht vorhanden ist. Einem Oberflächenverhalten korrespondiert keine entsprechende Tiefenstruktur. Andererseits bedeutet seit den 1950er Jahren ‚Simulation‘ die Modellierung dynamischer Systeme durch ein Computerprogramm, und diese bildet heute ein zentrales Erkenntnisinstrument der Wissenschaften. Als Herbert A. SIMON den computerbezogenen modelltheoretischen Simulationsbegriff 1956 eingeführt hat, scheint er zu diesem Zeitpunkt von der pejorativen Bedeutung der vortäuschenden Simulation kein Bewusstsein gehabt zu haben.² Die Semantik von ‚Simulation‘ birgt somit eine merkwürdige Gegensinnigkeit zwischen Vortäuschung und Erkenntnis, zwischen kritisch-abschätzigem und positiv-produktivem Sinn. Gibt es nun eine Gelenkstelle, die beide Wortgebräuche miteinander verbindet? Haben die Simulation als ‚Vortäuschung‘ und die Simulation als ‚computergenerierte Erkenntnisteknik‘ etwas gemein?

Alle Simulationen – ob nun unter positivem oder negativem Vorzeichen – haben etwas mit der Produktion von Zeichenwelten zu tun, die zugleich mit dem Anspruch auftreten, dass die Erscheinungsform dieser Zeichenwelten der Erscheinungsform der dabei imitierten Welten so ähnelt, dass sie in mancher Hinsicht auch an deren Stelle treten können. Und dies ist von besonderem Interesse, wenn damit die Hoffnung verknüpft ist, dass diese ‚Stellvertretung‘ einer ‚realen‘ durch eine ‚künstliche‘ Welt kognitiven Interessen dient, insofern anhand der künstlichen Welt Zusammenhänge der realen Welt zu erkennen und zu überprüfen sind.

Nur weil wir symbolproduzierende Wesen sind, die in der Auseinandersetzung mit sich selbst und ihrer Umwelt eine aus Zeichen gewirkte Zwischenwelt erschaffen, können solchen semiotischen Zwischenwelten auch Züge verliehen werden, die beanspruchen, eine Ähnlichkeit zum Realen aufzuweisen. Ähnlichkeiten zu entdecken, beruht auf einem Urteil. Ob eine Ähnlichkeit nun in betrügerischer oder wahrheitssuchender Absicht genutzt wird, ändert nichts daran, dass das Simulieren stets an ein Wissen gebunden bleibt. Allerdings – und dies ist für die weiteren Überlegungen entscheidend – bezieht sich dieses Wissen zuerst einmal auf die Kenntnis des Oberflächenverhaltens eines Systems. Bezogen auf die simulierte Krankheit: Es kommt auf das *Sichtbarsein* der Krankheit, nicht aber auf ihr *Verstandessein* an. Und ob nun simuliert wird, um zu täuschen oder um Kenntnisse zu erweitern: In jedem Falle müssen wir uns ein *Bild der Krankheit* machen können. Etwas zu simulieren ist also verknüpft mit der Fähigkeit zur Bildgebung; nicht erst die computergenerierte Simulation ist auf ein Visualisierungspotenzial angewiesen. Insofern Simulationen Zeichenprozesse sind, mit denen ein Oberflächenverhalten ohne zugrundeliegende Tiefenstruktur *gezeigt* wird, gibt jede Simulation stets ‚nur‘ ein Bild vom Simulierten: Denn Bilder sind eben dasjenige, was irgend einen Sachverhalt

1 Zum lateinischen Begriffsfeld von *similis*, *similacrum*, *simulatio*, *simulator*, *simulo*: DOTZLER 2003.

2 Dazu RÖLLER 2008, SIMON 1998.

nur in Bezug auf seine Erscheinungsweise, also im Hinblick auf seine ausschließlich optischen Attribute zeigt – unter Absehung aller übrigen Eigenschaften.³

2. Einstieg mit Platon: Höhlen- und Liniengleichnis

Es ist aufschlussreich, dass sich zu Beginn des abendländischen Philosophierens bei PLATON zwei Gleichnisse finden, mit denen sowohl der Täuschungs- wie auch der Erkenntnisinn des Simulierens – in einer gewissen Weise jedenfalls – vorweggenommen werden. In PLATONS wohlbekanntem Höhlengleichnis⁴ sind Menschen im Inneren einer Höhle in Bewegungslosigkeit so gefesselt, dass sie zeit ihres Lebens nur die rückseitige Höhlenwand, nie aber den Höhlenausgang erblicken können. Zwischen der Höhlenöffnung und dem Rücken der Gefangenen brennt ein Feuer und zwischen dem Feuer und den Gefangenen wiederum befindet sich eine Mauer; Gegenstände, welche die Mauer überragen, werden vorbei getragen. Die Gefangenen sehen alleine die Schatten dieser Gegenstände an der Höhlenwand. Beschränkt auf die Welt dieser Abbilder, können die Höhlenbewohner nicht anders, als die Schatten für die wirklichen Gegenstände zu halten. Ihre Welt ist die Zwischenwelt der Abbilder; da ihre Stellung es ihnen verwehrt, die Schatten als Abbilder zu erkennen, werden sie zu Gefangenen ihrer Trugbilder. Diese Schilderung gibt nur den Auftakt ab im Höhlengleichnis, welches im Fortgang die komplexe und komplizierte Situation schildert, die entsteht, wenn einem der Gefangenen die Möglichkeit gegeben wurde, sich umzudrehen, die Höhle zu verlassen und die Schatten als das zu erkennen, was sie sind: nicht die Dinge selbst, sondern deren Abbilder. Für uns ist am Höhlengleichnis nur eines wesentlich: Nicht *Abbilder per se* bilden für PLATON das Problem; sondern dass aus dem Abbild ein Trugbild, aus der Nachbildung eine Täuschung genau dann wird, wenn ein Bewusstsein des Abbildcharakters fehlt. Wie dagegen eine Situation, in der ein solches Bewusstsein vorhanden ist, aus dem Abbild dann ein Erkenntnismittel und Wahrheitsinstrument hervorgehen lässt, davon zeugt ein anderes platonisches Gleichnis, das Liniengleichnis⁵, das nur wenige Abschnitte vor dem Höhlengleichnis im Text zu finden ist.

Hier erklärt SOKRATES verschiedene Schichten des Seienden anhand einer Analogie: zuerst ist eine Linie zu ziehen und diese in zwei ungleiche Abschnitte zu unterteilen, so dass der kleinere Abschnitt den Bereich des Wahrnehmbaren, der größere den Bereich des Denkbaren markiert. Beide stehen dabei im Verhältnis von Abbild (das Wahrnehmbare) und von Urbild (das Denkbare) zueinander. Sodann wird für beide Abschnitte dieselbe Untergliederung nach Maßgabe der Urbild-/Abbild-Beziehung noch einmal ausgeführt, so dass sich insgesamt vier Abteilungen entlang der Linie, die wir uns am besten als eine vertikale Linie vorzustellen haben, ergeben. Jeder Abschnitt steht für einen Bereich unserer Welt: Am unteren Ende sind die Abbilder, Schatten, Spiegelungen platziert; es folgen die Lebewesen, Pflanzen und Dinge, die deren Referenzgegenstand ausmachen und gemeinsam mit den Abbildern das Reich des Sichtbaren bilden. Mit dem dritten Abschnitt setzt die Welt des Intelligiblen ein: Hier – im dritten Teil – befinden sich die mathematischen Gegenstände, geometrische Figuren oder Zahlen, sowie die wissenschaftlichen Begriffe. Im größten und letzten Abschnitt schließlich werden die Ideen bzw. Formen, welche wiederum die Urbilder für die wissenschaftlichen Gegenstände

3 Zu Bildern als Gegenständen ‚reiner Sichtbarkeit‘: WIESING 2005, S. 30ff.

4 PLATON, *Politeia*, 514a–517a.

5 PLATON, *Politeia*, 509d–51e.

bilden, lokalisiert. Diesen vier ontologischen Einteilungen korrespondieren jeweils Formen kognitiver – PLATON sagt hierzu: ‚seelischer‘ – Aktivitäten: Vermutungen bilden die unterste Stufe; dann folgt der Glaube; der dritten Stufe entspricht die immer auch durch Hypothesen organisierte Erkenntnistätigkeit des Verstandes und zuletzt treffen wir auf die Einsicht der Vernunft.

3. Visualisierung von Platons Liniengleichnis (Politeia 509d–511e)

Wieder müssen wir die Komplexität dieses Gleichnis vereinfachen und konzentrieren uns allein auf den *dritten* Abschnitt, mit dem PLATON auf die Charakterisierung der Tätigkeit des Mathematikers zielt, welche für ihn allerdings paradigmatisch ist für *alle* wissenschaftliche Arbeit. Mit dem Urbild/Abbildverhältnis in der dritten Abteilung wird also das methodologische Verfahren von Wissenschaften im Allgemeinen gekennzeichnet. Seine Besonderheit ist, dass der Mathematiker den sinnlich aufgezeichneten Kreis benötigt, um sich auf den unsichtbaren, mathematischen Kreis überhaupt beziehen zu können. Und dieses sinnliche Regime ist unverzichtbar, um beispielsweise geometrische Sachverhalte entdecken und beweisen zu können. Die wahrnehmbare Repräsentation wird zur *conditio sine qua non* wissenschaftlicher Erkenntnis; denn diese ist angewiesen darauf, das Denkbare mit Hilfe von sinnlichen Zeichenwelten zu verkörpern. Der Mathematiker zeigt den gezeichneten Kreis, aber er zielt dabei auf den Begriff des Kreises bzw. auf den Kreis als eine mathematische Entität, eben so, wie er auch weiß, dass der hingezogene und also ausgedehnte Punkt nur ein defizitäres Abbild sein kann für den unausgedehnten mathematischen Punkt. Anders als die Gefangenen der Höhle, weiß also der Wissenschaftler um die Differenz zwischen sinnlicher Repräsentation und theoretischer Entität. Somit haben die Objekte, mit denen der Mathematiker umgeht, einen zweifachen Charakter: sie sind Teil des Wahrnehmbaren *und* des nur Denkbaren. Und tatsächlich hat ARISTOTELES in einem Kommentar zu dieser Platon-Stelle den ‚intermediären Charakter‘ dieser Objekte betont.⁶

Warum wir auf Höhlen- und Liniengleichnis zurückgegriffen haben, liegt jetzt auf der Hand. Es sind vier in diesen Gleichnissen verkörperte und aufeinander aufbauende Einsichten, die für den Fortgang unserer Überlegungen zum wissenschaftlichen Simulieren bedeutsam werden:

- (1.) Sein ist Abbildbar-Sein. Was immer existiert, ist auch fähig, visualisiert zu werden. Bildhaftigkeit ist das Schlüsselphänomen der Platonischen Ontologie.
- (2.) Diese Abbildbarkeit gilt nicht nur für die Welt der Dinge und Lebewesen, sondern auch für die Welt abstrakter Gegenstände, also die Region dessen, was PLATON unter den ‚Formen‘, den ‚Ideen‘ versteht. Es ist das Abstrakte, das Theoretische, das Unsichtbare, das bloß Denkbare, das wir in intellektueller Tätigkeit uns versinnlichen müssen. Solche Abbildung des Nichtwahrnehmbaren ist konstitutiv für wissenschaftliches Tun.
- (3.) Wenn jedoch der Umgang mit bildhaften Zeichenwelten, mit ‚intermediären Objekten‘, grundlegend ist für Wissenschaft, dann muss das (Ab)Bildbewusstsein integraler Bestandteil wissenschaftlichen Tuns sein.
- (4.) Da, wo dieses Bewusstsein schwindet, werden die Abbilder zu Trugbildern und die Wissenschaftler zu ‚Gefangenen‘ ihrer Erkenntnisinstrumente.

⁶ ARISTOTELES, *Metaphysik I*, 987b 14–17.

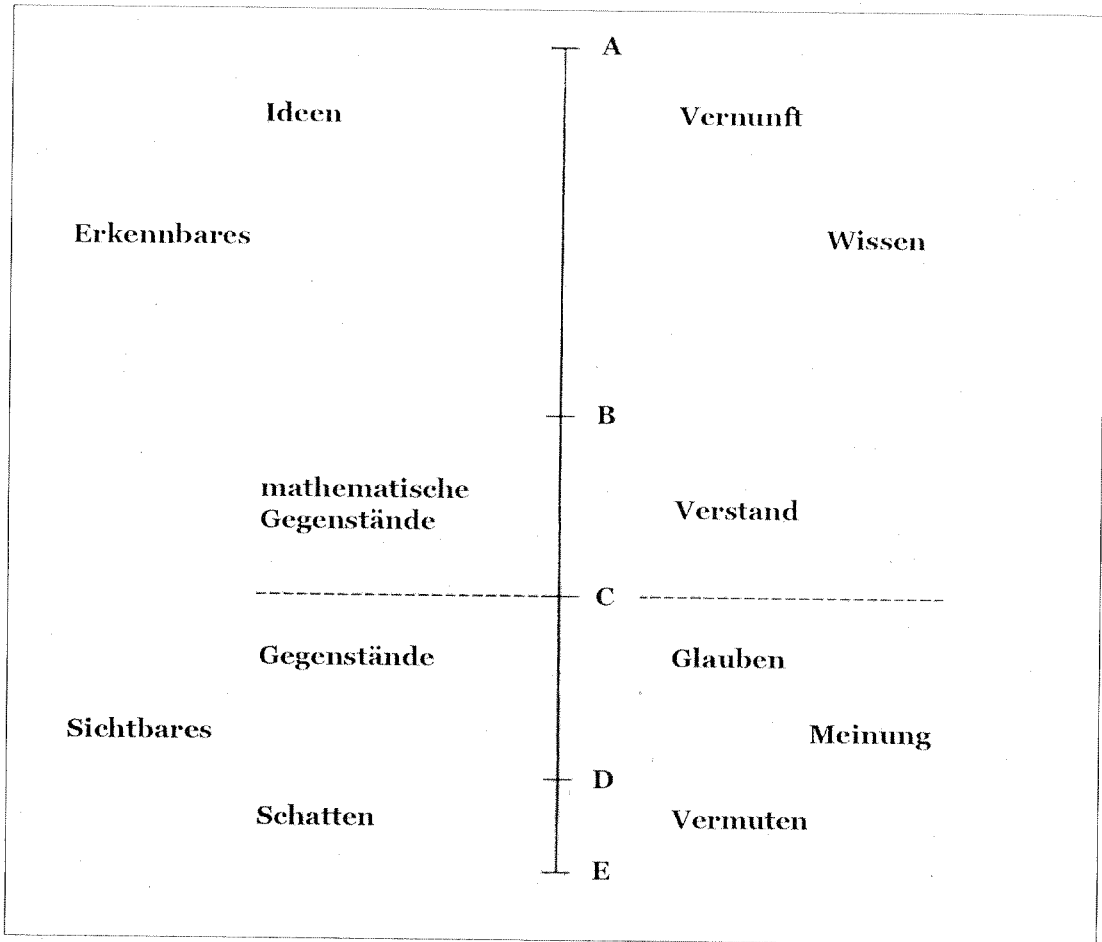


Abb. 1. Visualisierung von PLATONS Liniengleichnis (Politeia 509d-511e)

Wir sehen also, wie schon zu Beginn abendländischen Philosophierens die Einsicht in den Unterschied zwischen dem problematischen und dem produktiven, dem suggestiven und dem aufklärenden Sinn des Bildes sich artikuliert. Könnten wir sogar so weit gehen zu sagen, dass das Liniengleichnis eine Art von Ethos für den Umgang mit wissenschaftlichen Abbildungen birgt? ‚Ethos‘ in dem Sinne, dass die Verwendung von Bildern gebunden sein sollte an ein Bildbewusstsein, das um die Nichtidentität von Abbild und Urbild weiß, und wir können vorwegnehmend dazu auch sagen: das sich des Unterschieds zwischen Modell und Modelliertem bewusst bleibt.

4. Vier Voraussetzungen computergenerierter Simulationen

Machen wir nun einen großen Sprung aus der Antike zum Beginn der Neuzeit und von dort dann bis in das vergangene Jahrhundert. Computergenerierte Simulationen entstehen im Kreuzungspunkt von vier Entwicklungstendenzen neuzeitlicher Wissenschaft: Mathematisierung, Modellierung, Visualisierung und Digitalisierung (Computerisierung). Wir wollen einige Cha-

rakteristika dieser Springquellen wissenschaftlicher Simulationen beschreiben, auch wenn dies hier nur stichwortartig und äußerst fragmentarisch ausfallen kann.

4.1 Mathematisierung

Es ist schon ein Gemeinplatz: Der Aufschwung der neuzeitlichen Wissenschaft verdankt sich der Quantifizierung. Was aber bedeutet es, dass ‚etwas quantifizierbar ist‘? Die Pythagoreer waren noch der Ansicht, dass die Zahl in den Dingen selbst residiere, mithin originärer Bestandteil der Wirklichkeit sei. Spätestens mit GALILEI und DESCARTES aber verändert die Zahl ihren Status und avanciert zur Form einer ‚universalen Sprache‘: Die Zahl bleibt nicht länger ein Bestandteil der Dingwelt, sondern wird zum Attribut des Symbolsystems, in dem die Welt der Dinge zur Darstellung gelangt. Und es ist dieser *Sprachcharakter* des Mathematischen, welcher die neuartige Funktion der Quantifizierung in der Neuzeit ermöglicht und mit welcher die Mathematisierung dann – neben dem Experiment und der systematischen Beobachtung – beiträgt zur einzigartigen Signatur neuzeitlicher Wissenschaft.⁷

In ganz unterschiedlicher Weise kommt dieses Zu-einer-Sprache-werden des Mathematischen zu Geltung. Wir können hier nur einige Schlaglichter auf diesen Vorgang werfen.

- (1.) Da ist einmal die Verschriftlichung des Rechnens: Während das römische Ziffernsystem ein von der Zahlensprache getrenntes gegenständliches Hilfsmittel des Rechnens erforderlich macht, den Abakus oder ein Rechenbrett, erlaubt das hindu-arabische dezimale Positionssystem, welches in der frühen Neuzeit sich in Mitteleuropa durchsetzte, ein ‚rein schriftliches Rechnen‘, für das nur noch Papier und Bleistift nötig sind.
- (2.) Die symbolische Algebra (‚Buchstabenalgebra‘) wird erfunden, mit der es erstmals möglich wird, Regeln für das Auflösen von Gleichungen allgemeingültig zu notieren und damit lehr- und lernbar zu machen.⁸
- (3.) René DESCARTES begründet die Analytische Geometrie⁹, indem er mithilfe von Koordinaten Punkte auf Zahlenpaare abbildet und damit Figuren in Formeln zu übersetzen und geometrische Konstruktionsaufgaben als Rechenaufgaben zu realisieren vermochte: Die Berechenbarkeit von Kurven löst dann deren geometrische Konstruierbarkeit als Existenzbeweis ab.¹⁰

In all diesen Fällen ist die mathematische ‚Sprache‘, um die es jeweils geht, allerdings eine *lautsprachenneutrale Schrift*: Sie ‚spricht‘ nicht zu den Ohren, vielmehr zu den Augen. Nahezu alle folgenreichen Innovationen der frühneuzeitlichen mathematischen Analysis kreisen um diese neue Symbolisierungsweise, die wir als ‚Kalkülisierung‘ bezeichnen können und deren Mutterboden die alltägliche Rechenpraxis mit Hilfe des dezimalen Positionssystems darstellt. Die Kalkülisierung birgt zwei in Hinblick auf das Verständnis der Simulation wesentliche Aspekte:

- (1.) Es handelt sich um ein Symbolsystem, das zugleich als eine Technik zum Einsatz kommt. Das dezimale Positionssystem (zusammen mit den Rechenregeln) ist beides in einem: eine

7 Dazu KRÄMER 1991a.

8 VIÈTE 1970.

9 DESCARTES 1981.

10 KRÄMER 1989.

Zahlensprache *und* ein Rechenwerkzeug. Und es wundert nicht, dass die reale Konstruktion von Rechenmaschinen der Einführung des schriftlichen Rechnens auf dem Fuße folgte.¹¹ Die Kalkülisierung hat übrigens eine folgenreiche Implikation: der Vollzug und die Beschreibung dieses Vollzugs fallen in eins. Wenn wir eine Rechenaufgabe schriftlich notieren und im Medium der Schrift auch lösen, so ist das nicht die *Beschreibung* einer Zahlenoperation, vielmehr deren *Ausführung*: Ziffern algorithmisch zu manipulieren, stellt ein Zahlenrechnen nicht bloß *dar*, sondern *ist* ein Zahlenrechnen. Denn ‚Zahl‘ ist, wofür ein Zeichen eingeführt wird, mit dem konsistent operiert werden kann. Was entspricht der Ziffer ‚0‘ oder $\sqrt{-2}$? Mit den Worten der Philosophen LEIBNIZ¹² und LAMBERT¹³, die damit die Eigenart der symbolischen Erkenntnis charakterisierten: Die Operationen mit Zeichen treten an die Stelle der Operationen mit den Sachen selbst und dies nicht nur temporär, sondern auf Dauer.

- (2.) Konstruktion und Interpretation sind voneinander ablösbar. Während die Alltagssprache der Kommunikation – jedenfalls zumeist – eine bedeutungsvolle Sprache ist, gewinnt im Kalkül die Konstruktion einer Symbolkonfiguration eine (gewisse) Unabhängigkeit von ihrer Interpretation. Wir müssen nicht wissen, wie die Ziffer ‚0‘ zu interpretieren ist, um mit der Null richtig rechnen zu können. Und wir müssen nicht entscheiden, ob infinitesimale Größen als potenziell oder aktual unendlich anzusehen sind, um richtig differenzieren und integrieren zu können. Gerade dies sah LEIBNIZ explizit als den Vorzug der von ihm eingeführten Differential- und Integralrechnung an.¹⁴ Die Richtigkeit der infinitesimalen Rechnung – so drückt er es aus – ist nicht von metaphysischen Streitigkeiten über die ‚Natur‘ des Unendlichen abhängig zu machen. Das *Knowing how* löst sich vom *Knowing that*: die ‚episteme‘ erweist sich als eine hoch entwickelte Form der ‚techné‘. Auf der Grundlage formaler Notationen, die sowohl symbolisch wie technisch funktionieren, also kognitive Domänen *darstellen* und zugleich Problemlösungen innerhalb dieser Domänen auch *herstellen* können, ist die Mathematisierung auch ein Akt der Technisierung.

Kommen wir nun zur zweiten Quelle der Simulation.

4.2 Modellierung

Die Verwendung des Modellbegriffes scheint von kaum zu überblickender Vielgestaltigkeit: ein Spielzeugauto, das Modell beim Aktzeichnen, die Konstruktionszeichnung eines Hauses, das Diagramm über Organisationsstrukturen einer Firma, ein Atommodell, Gleichungen für Planetenbahnen, ein Begriffssystem, das die Axiome einer Theorie erfüllt: all dies kann jeweils als ‚Modell‘ charakterisiert werden, und diese Aufzählung ließe sich immer weiter fortsetzen. Gibt es trotz dieser Mannigfaltigkeit so etwas wie eine ‚Familienähnlichkeit‘ zwischen all diesen Versionen des Modellseins?¹⁵ Vier Gesichtspunkte bieten sich dafür an:

11 Vgl. KRÄMER 1988, S. 54ff. Die Medici verwenden ab 1494 die indisch-arabischen Ziffern, so dass im 16. Jahrhundert sich das schriftliche Rechnen in Europa allgemein durchzusetzen begann. Im 17. Jahrhundert werden die ersten mechanischen Rechenmaschinen konstruiert (SCHICKARD, PASCAL, LEIBNIZ).

12 Dies entfaltet LEIBNIZ in einer Fülle von Texten und Fragmenten im Rahmen seiner Theorie des symbolischen Erkennens; die Belege finden sich in KRÄMER 1991b, S. 220ff.

13 LAMBERT 1965

14 LEIBNIZ 1965b, IV, 91. Dazu: KRÄMER 1991b.

15 Grundlegende Werke zur Modelltheorie: BLACK 1962, HESSE 1966, MORRISON und MORGAN 1999, STACHOWIAK 1973.

- (1.) *Proportionalität*: Schon die begriffsgeschichtliche Herkunft von ‚Modell‘ aus dem lateinischen ‚modulus‘ – der Verkleinerungsform von ‚modus‘: Maß – weist in die Richtung von etwas ‚Maßstäblichem‘. Es geht um eine Ähnlichkeit in der Form, in der Struktur, in der Proportion, demgegenüber die objekthaften, also substanziellen Gesichtspunkte zugunsten der relationalen zurücktreten. Eine solche ‚Ähnlichkeit in der Form‘ nannten die Griechen: ‚analogia‘.
- (2.) *Handlungsbezug*: Diese Ähnlichkeit darf allerdings nicht missverstanden werden: Sie ist nicht ‚von Natur aus gegeben‘, sondern wir machen etwas zu einem Modell. Der Modellcharakter ist in einem Urteilsakt fundiert.¹⁶ Nur für handelnde Subjekte und im Zusammenhang ihrer praktischen oder theoretischen Interessen, kann etwas zu einem bestimmten Zeitpunkt ein Modell sein. Modelle rechtfertigen sich durch die Tätigkeiten, die wir mit und an ihnen vollziehen können.
- (3.) *Vereinfachung*: Ein durchgängiger Zug beim Modellieren ist die Reduzierung und Verkürzung. Es gibt zwischen dem, was Modell ist, und dem, wofür bzw. wovon es Modell ist, stets ein Komplexitätsgefälle: Das Modell hat kleiner, überschaubarer, einfacher, abstrakter zu sein. Allerdings zielt diese Vereinfachung und Veranschaulichung zumeist auf das ‚Wesentliche‘. Daher erfüllen Modelle oftmals die Funktion einer Idealisierung.
- (4.) *Autonomie*: Etwas kann Modell für etwas oder von etwas sein, sowohl als Vorbild, wie als Nachbild fungieren. Zumeist allerdings verbinden sich der normativ-vorschreibende und der abbildlich-beschreibende Aspekt. Unerachtet dieser Bezugnahmen steht außer Frage, dass das Modell eine eigenständige Realität bildet, innerhalb deren in freier Gestaltung etwas ausprobiert und erkundet werden kann.¹⁷

Diese vier Aspekte sind nur ein Schattenriss der Attribute, die für modellbildende Tätigkeiten charakteristisch sind. Doch im Fluchtpunkt dieser Aspekte zeichnet sich eine für Modellierungen weichenstellende Einsicht ab, die auch eine Grundlage ist, um über computergenerierte Simulationen nachzudenken: Innerhalb der Wissenschaften können Modelle als *Werkzeuge des Erkenntnishandelns* eingesetzt werden. Wir wollen uns nun der dritten Quelle der Simulation zuwenden.

4.3 Visualisierung

Längstens ist das Bild aus der begrenzten Domäne der Kunstgeschichte und Kunstwissenschaften herausgetreten, denn es interessiert nicht mehr nur als Kunstbild, vielmehr als ein integraler Bestandteil unserer ‚Wissenskünste‘. Und so vollzieht sich gegenwärtig eine überaus spannende Neuorientierung auf dem Gebiet der Bildreflexion: das Bild wird als ein Erkenntnisinstrument und als ein Kommunikationsmittel anerkannt.¹⁸ Auf den ‚Instrumentcharakter‘ der Visualisierung kommt es uns hier an. Bilder in den Wissenschaften dienen nicht nur der Illustration von Erkenntnissen; sie sind nicht nur „afterimages of verbal ideas“¹⁹, sondern sind an der Gewinnung, Formung, Ordnung und Rechtfertigung wissenschaftlicher Einsichten genuin beteiligt.²⁰ PLATON ist überaus hell-sichtig, wenn er im Liniengleichnis vermutet, dass wissenschaftliche

16 MAHR 2003, S. 80.

17 Die relative Autonomie von Modellen betonen MORRISON und MORGAN 1999.

18 Zur Rolle wissenschaftlicher Visualisierungen: HEINTZ und HUBER 2001, HESSLER und MERSCH 2009, KEMP 1997.

19 TOPPER 1996, S. 15.

20 HESSLER und MERSCH 2009, S. 11.

Erkenntnis der bildgebenden Verfahren unabdingbar bedürfe. Und all dies ist heute durch vielfältige Einzelstudien gründlich untermauert, denken wir – um nur einige ganz unterschiedliche Gebiete herauszugreifen – an die ethnographische Feldforschung,²¹ die experimentelle Hochenergiephysik,²² die Hirnforschung,²³ die Mathematik selbst,²⁴ die Klimaforschung²⁵ etc. Zwar steht eine ‚Epistemik des Visuellen‘,²⁶ eine Theorie des visuellen Denkens noch aus; doch einige Einsichten über die Eigenart und die Aufgabe von Visualisierungen in den Wissenschaften liegen auf der Hand:

- (1.) *Flächigkeit*: Für die meisten Arten von Bildern ist es charakteristisch, dass sie auf dem abgegrenzten Raum einer Fläche lokalisierbar sind. Die Fähigkeit, den uns umgebenden (dreidimensionalen) Lebensraum mit zusätzlichen zweidimensionalen Raumgebilden zu ergänzen, ist bemerkenswert. Angesiedelt im Nahraum von Auge und Hand, lassen sich solche handhabbaren Gebilde²⁷ bestens aufbewahren, transportieren, zirkulieren – und gegebenenfalls auch vernichten. Die Evolution des Bildschirms, die uns schließlich zum Personal-Computer führt und von da zum iPad, entspringt dieser Ingeniosität artifizierlicher Oberflächen: Mit und auf ihnen können wir Abwesendes präsentieren, Abstraktionen versinnlichen und nicht zuletzt uns global vernetzen. Und immer sind dabei Auge und Hand und Apparatur gemeinsam im Spiele.
- (2.) *Figurative Inskriptionen/Instrumentenbilder*: Das umfangreiche Feld wissenschaftlicher Visualisierungen lässt sich – stark typisierend – in zwei Domänen unterteilen: Das eine Feld können wir ‚figurative Inskriptionen‘ nennen. Zu dieser weiten Domäne gehören alle Arten von (technischen) Zeichnungen, Skizzen, Diagrammen, Graphen und Karten. Sie sind Versionen eines ‚Graphismus‘, hervorgehend aus der Interaktion von Punkt, Strich und Fläche. Vielleicht ist diese ‚Sprache des Raumes‘ unserem verbalen Sprachvermögen – in kognitiver Hinsicht – durchaus ebenbürtig: jedenfalls wurde die Kunst figurativer Einschreibung in nahezu allen Kulturen und zu allen Zeiten als Mittel praktischer und theoretischer Orientierung ausgeübt.²⁸ Ihr Kunstgriff besteht darin, Raumrelationen als eine Ordnungsform einzusetzen, mit der gerade nicht-räumliche Sachverhalte systematisiert, analysiert und dargestellt werden können. Die andere Klasse wissenschaftlicher Visualisierungen bilden die ‚Instrumentenbilder‘, die von technischen Apparaten wie Fotografie, Röntgen, Echolot, Radartechnik, Raster-Elektronenmikroskop, Sonartechnik etc. erzeugt werden und den Anspruch haben, einen Sachverhalt möglichst genau abzubilden.
- (3.) *Operative Bildlichkeit*: Bilder sind „Sichtbarkeitsgebilde“,²⁹ welche das, was sie darstellen, nur in Hinsicht auf die Sichtbarkeit eines Objektes präsentieren, unter Absehung aller übrigen Attribute, die einem Objekt (ebenfalls) zukommen. Gleichwohl – und hier stoßen wir auf einen wesentlichen Unterschied zwischen Kunstbildern und jenen ‚nützlichen Bildern‘, die dem Erkennen dienen: Mit den wissenschaftlichen Visualisierungen ist eine

21 LATOUR 1966.

22 KNORR-CETINA 2001.

23 CRELIER und JÄRMANN 2001.

24 NEUNZERT 1995.

25 GRAMELSBERGER 2009.

26 So HESSLER und MERSCH 2009, S. 17.

27 LATOUR 1990.

28 LEROI-GOURHAN 1980.

29 FIEDLER 1991, S. 192, an den WIESING 2005, S. 30, anknüpft.

Form der ‚operativen Bildlichkeit‘³⁰ eröffnet, die immer auch einen Labor- und Denkraum bereitstellt, der das Formen und Umformen, das Kombinieren und Löschen, kurzum: ein kreatives Experimentieren mit dem jeweils Visualisierten erlaubt. Im Zusammenwirken von Auge, Hand und Geist sind die figurativen Inskriptionen die Werkzeuge unserer Geistesarbeit: sie sind Denkzeuge.

- (4.) *Abbildung/Konstruktion*: So, wie die hingezogene Linie sowohl Spur (also Abbild) der Bewegung der Hand ist, wie umgekehrt auch Entwurf einer eigenständigen Welt, die sich von den Vorgaben der Realität weitmöglichst befreien kann, so bewegen sich alle wissenschaftlichen Visualisierungen im Spannungsfeld zweier Pole. Es ist dies einerseits die abbildende, mimetische Wiedergabe und andererseits die auf dem Papier durch kein Gesetz der physischen Welt gebändigte Kraft schöpferischer Neuerzeugung und Erfindung. Jedes raum-zeitlich situierte Phänomen wissenschaftlicher Visualisierung ist daher stets als eine Mischform aus ‚Übertragung‘³¹ und ‚Konstruktion‘ zu verstehen.

4.4 Digitalisierung

Ein letzter Schritt bleibt in der Sondierung der Springquellen wissenschaftlicher Simulierung zu tun. Der Computer tritt heute nicht nur als eine – allerdings alle Vorstellungskraft sprengende – schnelle Rechenmaschine auf, sondern als eine ‚Virtualisierungsmaschine‘. ‚Virtuelle Welten‘ sind digitalisierte Datenstrukturen, deren Verarbeitung durch den Computer zweierlei eröffnet: die Möglichkeit zur ‚Verzeitlichung‘ und zur ‚Entmaterialisierung‘ von Symbolstrukturen.

- (1.) ‚Verzeitlichung‘ bedeutet: In die Datenstrukturen kann Zeit implementiert, diese können also dynamisiert werden. Wir kennen das unter dem Begriff der ‚Animierung‘, die das Prinzip der (einprogrammierten) Selbstbewegung unserer Zeichenstrukturen bedeutet. Während die uns in früheren Zeiten vertrauten symbolischen Welten – ob nun in literarischer oder bildlicher Form – stabile Anordnungen bilden, die allenfalls durch unsere Imagination und Interpretation belebt werden können oder – wie beim bewegten Bild des Films – durch unsere Illusion, ist es jetzt möglich geworden, die räumliche Dimension symbolischer Anordnungen durch eine zeitliche Dimension zu ergänzen. Kraft dieser Verzeitlichung von Symbolstrukturen eröffnet sich die Möglichkeit, mit diesen animierten Symbolwelten zu interagieren.
- (2.) ‚Entmaterialisierung‘ wiederum meint: Die digitalisierten Daten können in beliebige Medienformate übertragen werden. Diese so faszinierende wie folgenreiche Intermedialität des Computers beruht gerade darauf, dass die Strukturen und Funktionen von Medien durch Digitalisierung von der ihnen im lebenspraktischen Zusammenhang stets zukommenden Materialität und Körperlichkeit abgelöst werden können.

Wenn wir nun die Verzeitlichung und Entmaterialisierung zusammendenken, so können wir sagen: Virtuelle Welten beruhen – gemessen an der uns umgebenden Lebenswelt – einerseits auf der Vereinigung von *Struktur* mit *Zeit* und zugleich auf der Trennung von *Struktur* vom *Substrat*.³²

30 KRÄMER 2009.

31 Die Rehabilitierung der ‚Übertragung‘ ist ein Ziel der medientheoretischen Auszeichnung der Figur des Boten in KRÄMER 2008.

32 SCHRÖTER 2004, S. 391.

Wir können uns diese Einsicht auch noch in einer anderen Perspektive – vom Wortgebrauch ‚virtuell‘ herkommend – verdeutlichen. ‚Virtuell‘ ist ein Begriff der Optik und bezieht sich auf *lichtwellentäuschende Bilder*. Spiegelbilder sind virtuelle Objekte, insofern sie dem Betrachter vortäuschen, dass sich die gespiegelten Objekte hinter der Spiegelfläche befinden: Es wird durch Spiegelung also nicht einfach ein zweites Objekt, vielmehr ein zweiter Ort für ein Objekt geschaffen, so dass ganz neue Beobachtungsperspektiven entstehen: Objekte können nun von hinten und vorne betrachtet werden, oder wir können uns selbst mit den Augen der anderen sehen. Allerdings sind Spiegelbilder Abbilder ohne Zeichenstatus. Denn Spiegelbilder haben – anders als artifizielle Zeichenwelten – keine Autonomie, sondern sind kausal (und eben *nicht* semiotisch) verknüpft mit dem gespiegelten Objekt: Sie können also nicht als autonome Objekte fixiert oder verändert werden – es sei denn durch Manipulationen an den gespiegelten Dingen selbst. Stellen wir uns wie in einem Gedankenexperiment einen Spiegel vor, der – abweichend von gewöhnlichen Spiegeln – drei Eigenschaften besitzt: Die Spiegelwelt bekommt den Status einer eigenständigen semiotischen Repräsentation; in sie kann Zeit implementiert, sie kann also dynamisiert werden; und schließlich bleibt der Betrachter nicht einfach externer Beobachter, sondern kann zum Teilnehmer der gespiegelten Welt werden. Dass wir den Computer als eine ‚Virtualisierungsmaschine‘ bezeichnet haben, bedeutet dann im Horizont unserer Spiegelmetapher: Der Computer ist ein interaktiver Spiegel dynamisierter Symbolwelten. Übrigens lassen wir hier die *technischen* Bedingungen, die selbstverständlich erfüllt sein müssen, damit Computer als abstrakte, formale Maschinen zugleich in Gestalt machtvoller physikalischer Apparaturen realisierbar sind, unerwähnt. Diese Bedingungen sind in einer Fülle von Veröffentlichungen sondiert.³³

Vielleicht zeichnet sich nun ab, wieso Mathematisierung, Modellierung, Visualisierung und Digitalisierungen die ‚Quadriga‘ der computergenerierten Simulation bilden:

- (1.) Die *Mathematisierung* macht es möglich, sowohl realweltliche Phänomene – infolge von Messung – wie auch Theorien – infolge von Formalisierung – zu kalkülisieren und ihnen damit eine symbolische Gestalt zu verleihen, die auch technisch bearbeitbar ist.
- (2.) Die *Modellierung* macht es möglich, dass mit diesen kalkülisierten Symbolwelten in relativer Autonomie so operiert und auch experimentiert werden kann, dass die dabei gewonnen Ergebnisse zugleich als Einsichten in jene Vorgänge gelten können, die den Objekt- und Interpretationsbereich der Kalkülisierung bilden.
- (3.) Die *Visualisierung* eröffnet die Chance, die unüberschaubar großen Datenmengen in einer für Menschaugen zu verarbeitenden Gestalt aufzubereiten – und zwar nicht nur in der Präsentation des Endergebnisses, sondern bereits beim experimentellen Umgehen mit den Datenstrukturen.
- (4.) Die *Digitalisierung* verwandelt die mathematisierten, modellierten und visualisierten Welten in ‚zeitbasierte‘, also dynamische virtuelle Welten.

Dass diese vier Aspekte natürlich nicht als Sukzession zu begreifen sind, sondern ineinander spielen, ist klar – gleichwohl macht es zum Verständnis der Simulation Sinn, diese Aspekte begrifflich auseinanderzuhalten.

33 Exemplarisch WINKLER 1997. GRAMELSBERGER 2010.

5. Die erkenntnisthechnische Rolle computergenerierter Simulationen

Experiment und (mathematisierbare) Theorie bilden etablierte Tätigkeitsformen von Wissenschaften im Sinne der ‚sciences‘. Computergenerierte Simulationen nun verkörpern ein neues Verfahren, das nicht einfach *neben* Experiment und Theorie tritt, sondern eine neuartige Vermittlung zwischen beiden darstellt. Wissenschaften, die numerische Simulationen in bemerkenswertem Umfang einsetzen, bekommen ein neues Gesicht und nehmen Züge von ‚Computational Sciences‘ an – wenn sie sich nicht gar in solche verwandeln. Die neuartige Physiognomie ist selbstverständlich nicht auf die Rolle von Simulationen – eingesetzt als Forschungsinstrumente – reduzierbar, sondern ist auch geprägt von der „weltweiten Vernetzung von Infrastrukturen und der flächendeckenden Vermessung der Welt durch computerchipgesteuerte Detektoren.“³⁴ Gleichwohl bildet die computergenerierte Simulation den Kern jener methodologischen Neuerungen, deren Zeuge wir gegenwärtig werden.

Um uns über die Spezifik numerischer Simulationen klar zu werden, können wir die Frage stellen: Warum ist der Einsatz solcher Art von Simulationen notwendig? Worin besteht das Problem, das mit der Computersimulation eine (relative) Lösung erfährt?

Im mechanischen Weltbild, das in NEWTONS Physik seine wesentliche Stütze fand, entsprechen kleinen Ursachen auch kleine Wirkungen und umgekehrt. Das bedeutet: jeder Zustand eines Systems ist aus seinem vorhergehenden – im Prinzip – berechenbar. Die Mathematik NEWTONS und LEIBNIZENS entwickelte mit den Differentialgleichungen ein mathematisches Werkzeug, das es erlaubte, Einzelfälle unter allgemeine Gesetzmäßigkeiten zu subsumieren. Wenn nun allgemeine Gesetze in der Form analytischer Funktionen hingeschrieben werden, so dass die Dynamik eines Systems die Gestalt eines funktionalen Zusammenhanges zwischen Variablen annimmt, dann können diese Variablen durch konkrete Zahlenwerte ersetzt werden und zukünftige Zustände von Systemen, – deren Verhaltensweisen mit Differentialgleichungen beschreibbar sind – lückenlos, also für jeden beliebigen Zeit- und Raumpunkt, analytisch berechnet werden.³⁵ Das Beispiel für solche linearen, determinierten Vorgänge ist die Bewegung eines einzelnen Körpers in einem Gravitationsfeld: Ob die Bahn eines Planeten oder die Kurve einer Kanonenkugel: im Prinzip ist deren Verlauf mit Hilfe von Bewegungsgleichungen bei Kenntnis konkreter Anfangswerte vorhersagbar. Der französische Mathematiker und Astronom Pierre-Simon DE LAPLACE drückte 1814 die mit der Idee der analytischen Lösbarkeit *aller* Bewegungsvorgänge verbundene Vision einer deterministischen Mechanik und einer universellen Erkennbarkeit der Welt so aus: Eine Intelligenz, welche für einen bestimmten Zeitpunkt alle wirkenden Kräfte der Natur kennt und die Lage aller Wesen überblicken könnte, der würde die Zukunft der Welt offen vor Augen liegen.³⁶

Doch der Traum einer allwissenden Intelligenz wurde schon 1891 zu Grabe getragen. Der französische Mathematiker Henri POINCARÉ konnte im Rahmen einer Preisfrage des schwedischen Königs bezüglich der Stabilität unseres Sonnensystems demonstrieren, dass wenn auch nur drei Körper verschiedener Massen ein gegenseitiges Gravitationsfeld bilden, das Verhalten dieser Körper nicht mehr mithilfe linearer Verknüpfungen von Variablen vorhersagbar ist. Denn es zeigt sich dabei, dass schon sehr „kleine Ursachen in den Anfangsbedin-

34 GRAMELSBERGER 2010, S. 96.

35 KÜPPERS und LENHARD 2005, S. 310ff.

36 LAPLACE 1832, Einleitung; zitiert in GRAMELSBERGER 2010, S. 33.

gungen große Unterschiede in den späteren Erscheinungen bedingen [...] Die Vorhersage wird unmöglich und wir haben eine „zufällige Erscheinung“.³⁷ POINCARÉ war damit auf das Prinzip nicht-linearer Dynamiken gestoßen, für die gilt: an die Stelle des Prinzips, dass ähnlichen Ursachen auch ähnliche Wirkungen entsprechen, tritt nun das nicht-lineare Prinzip, dass ähnliche Ursache grundverschiedene Wirkungen haben können. Dieser Maxime folgen nahezu alle komplexen Systeme: Wolkenbilder am Himmel ebenso wie Wirbel in Flussströmungen. Bedenken wir nun, dass die modernen Wissenschaften – nicht zuletzt infolge ihres Anwendungsbezuges – zumeist mit komplexen Systemen zu tun haben: um das Verhalten von Satelliten im Gravitationsfeld der Erde, um Strömungsverhältnisse im Zusammenhang künstlicher Herzkappen oder um das Verhalten von Aktienbesitzern. Werden solche Vorgänge nun mathematisch beschrieben, so ist das nur möglich mit Hilfe von partiellen nicht-linearen Differenzgleichungen, für die – außer unter den Bedingungen unrealistisch idealisierter Randbedingungen – keine allgemeine analytische Lösung existiert.

Eine andere Form der *Handhabung* des mathematischen Apparates musste also her: und eben diese besteht in der „numerischen Simulation von Gleichungen“.³⁸ Das Problem, auf das also die computergenerierten Simulationen eine Antwort geben, besteht in der Beschreibung und Vorhersage nicht-linearer Dynamiken. Wohlgemerkt: es geht hier nicht um irgendeine Form von kategorischer Unlösbarkeit. Im Gegenteil: nichtlineare Systeme entziehen sich gerade nicht der mathematischen Bearbeitung, sondern erfordern nur deren Formveränderung. Über die *analytische Lösung* einer Gleichung zu verfügen, impliziert die Gewissheit, durch algebraische Umformungen den Zustand des analytisch berechenbaren Systems zu jedem beliebigen Zeitpunkt exakt angeben zu können. Pate dieser Gewissheit ist die Annahme einer Stetigkeit in der Entwicklung des Systems. Doch eben diese Stetigkeit fehlt in nicht-linearen Dynamiken. Und das wird zur Stunde der ‚numerischen Simulation‘.

Was für eine Art von Lösung bedeutet diese Numerik? Die bei der analytischen Lösung noch als kontinuierlich angenommene Zeitlinie wird in der numerischen Behandlung *diskretisiert*, also in einzelne Zeitpunkte bzw. Zeitabschnitte zerlegt. An die Stelle einer *globalen* analytischen Berechenbarkeit einer Funktion tritt daher ihre nur noch *lokale* numerische Berechenbarkeit, die auf genau *einen* spezifischen Zeitpunkt bezogen und auch begrenzt ist. „Statt der in der Zeit kontinuierlichen Differentialgleichungen betrachtet man die diskrete sogenannte ‚finite Differenzgleichung‘.“³⁹ Und diese numerische Bestimmung einer lokalen Größe muss, um überhaupt als aussagekräftige Darstellung einer Dynamik zu gelten, für jeweils viele Zeitstellen mit je neu eingegebenen Parametern und also mit allergrößtem Rechenaufwand betrieben werden. Errechnet wird dabei eine Wertetabelle für Systemzustände zu vielen verschiedenen Zeitpunkten – welche dann ‚realistisch‘ visualisiert werden kann.

Was wird dabei simuliert? Als erste Antwort drängt sich auf: das, was ‚simuliert‘ wird, ist die exakte analytische Lösung. Doch die Sachlage so zu sehen, birgt ein Problem: Eine exakte analytische Lösung existiert im Falle der meisten komplexen Systeme nicht. *Simuliert wird also etwas, was anders als durch die Simulation gar nicht (mehr) zu haben ist.* Die numerische Simulation kann daher auch nicht als eine – immer weiter verfeinerbare – Annähe-

37 POINCARÉ 1973, S. 57; zitiert in GRAMELSBERGER 2010, S. 36.

38 GRAMELSBERGER 2010, S. 35.

39 KÜPPERS und LENHARD 2005, S. 313; auch WINSBERG 1999, S. 278.

rung an die analytische Lösung bestimmt werden. Die errechnete Wertetabelle bezieht sich ausschließlich auf die Bewegung eines *virtuellen* Objektes, das wiederum nicht identifiziert werden darf, mit einer durch ein lineares Gleichungssystem beschreibbaren Entität. Und das aus folgendem Grund: Erinnern wir uns, zu Anfang betont zu haben, dass Simulationen sich auf das *Oberflächenverhalten* von Phänomenen beziehen, ohne dass die zugrundeliegende Tiefenstruktur dabei imitiert wird. Ein analytisch lösbares Differentialgleichungssystem, welches das Verhalten eines Systems präzise beschreibt und vorhersagbar macht, kann durchaus als ein Modell für die diesem Verhalten zugrundeliegende ‚Tiefenstruktur‘ angesehen werden. Numerisch lösbare Gleichungen sind natürlich ebenfalls ein mathematisches Modell für ein dynamisches System, allerdings nicht (mehr) – wie bei den analytisch lösbaren Gleichungen – für dessen *Tiefenstruktur*, vielmehr nur noch für sein *Oberflächenverhalten*. Und dieser Unterschied zwischen ‚Oberfläche‘ und ‚Tiefe‘ ist entscheidend zum Verständnis der ‚Natur‘ computergenerierter Simulationen. Denn in letzter Instanz soll und kann durch eine computergenerierte Simulation ‚nur‘ ein Phänomenbereich modelliert werden. Auf die Frage: ‚was simuliert die numerische Simulation‘ können wir also antworten: *das Oberflächenverhalten eines virtuellen Objektes*. Das hat zumindest drei erkenntnistheoretisch bedeutsame Implikationen:

- (1.) *Staffelung von Modellierungen*. Die Technik computergenerierter Simulationen zielt zwar auf die Modellierung von Phänomenen; doch dies gelingt nur mit Hilfe einer ganzen Kaskade von Modellierungen auf ganz unterschiedlichen Ebenen.⁴⁰ Wir müssen somit eine Vereinfachung rückgängig machen: Denn das computergenerierte Simulieren – darauf hat Eric WINSBERG mit Nachdruck verwiesen – ist ein vielfach gestufter Prozess, bei dem unterschiedliche Formen von Modellen jeweils zu durchschreiten sind. So dass also zwischen der Theorie einerseits und dem Phänomenmodell andererseits sich eine Modellierungskette spannt, die jeweils mechanische, dynamische, diskretisierende und komputationale Modelle enthält.
- (2.) *Kriterien*. Was ist das Kriterium für eine gelungene Simulation? Im einfachsten Falle können wir sagen: das ist die Übereinstimmung mit einem faktisch beobachtbaren Verhalten. Doch oftmals handelt es sich um die Simulation von Vorgängen, für die realweltliche Beobachtungen gar nicht gegeben sind. Und manchmal gehen Simulationen empirisch wahrgenommenen Phänomenen voraus: Dafür hat Johannes LENHARD ein instruktives Beispiel gegeben: Uzi LANDMAN, ein Pionier der Simulationsmethode in den Materialwissenschaften, stieß in der Simulation auf ein Phänomen – die Bildung eines ‚Nanodrahts aus Gold‘ –, welches zum damaligen Zeitpunkt eine Erscheinung ausschließlich am virtuellen, computergenerierten Objekt war, dann jedoch zwei Jahre später durch empirische Resultate der Rastertunnelmikroskopie bestätigt werden konnte.⁴¹ Es hat sich also erst im Nachhinein gezeigt, dass virtuelles Objekt und Realobjekt in einer Analogiebeziehung stehen. Wenn es jedoch um langfristige Klimavoraussagen geht, ist solche Empirie selbst nachträglich als Prüfstein kaum zu haben, bedenkt man überdies, dass die Praxis der Politik alles tun muss, damit – etwa angesichts einer vorausgesagten Klimaerwärmung – diese Vorhersagen sich nicht bestätigen.⁴²

40 Dies hat Eric WINSBERG 1999 überzeugend gezeigt.

41 LANDMANN 1990; zitiert und kommentiert bei LENHARD 2005, S. 307ff.; auch ROHRLICH 1990.

42 GRAMELSBERGER 2006.

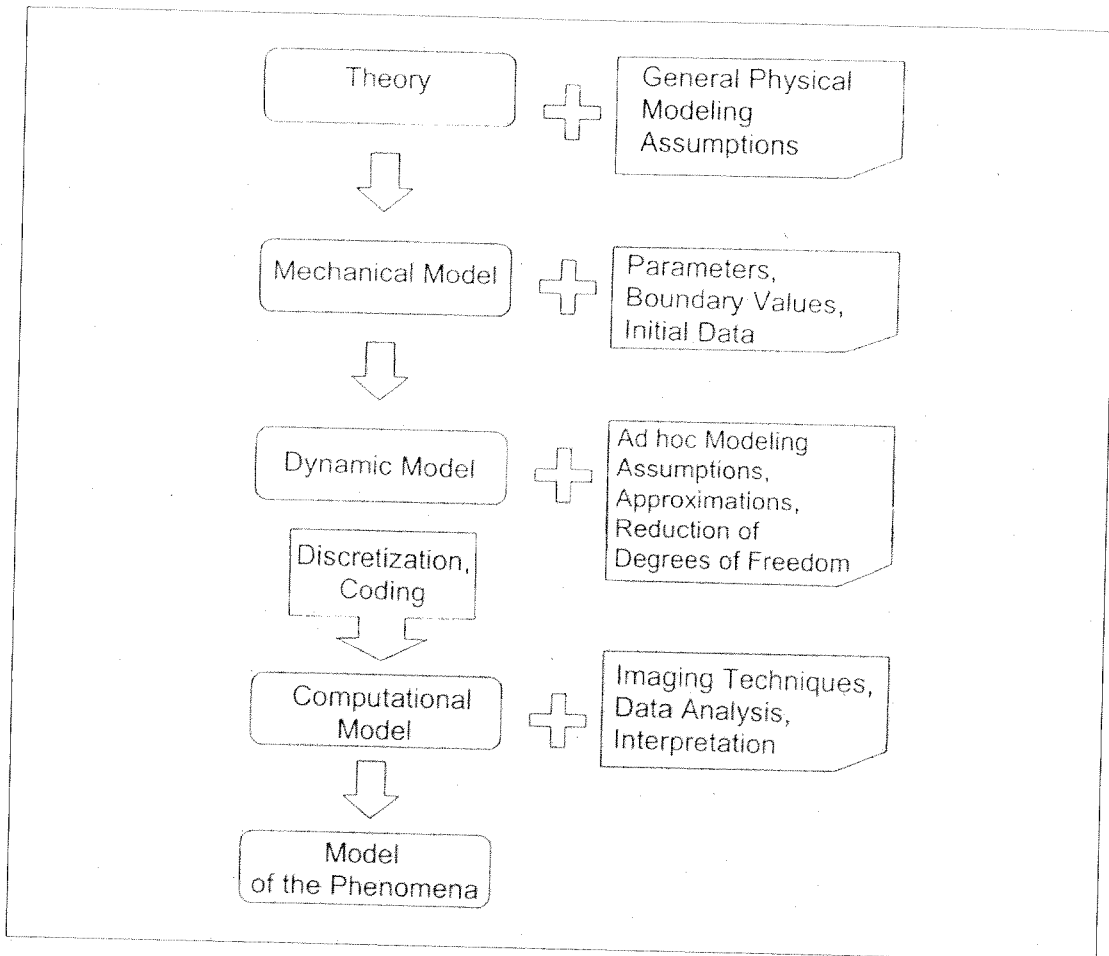


Abb. 2 Hierarchie von Modellen (nach WINSBERG 2003, S. 108)

(3.) *Experimentcharakter*. Das führt auf den experimentellen Charakter der Computersimulationen. Gabriele GRAMELSBERGER hat dies jüngst in einer gelungenen Gegenüberstellung artikuliert: Vom ‚Rechnen mit Experimenten‘ zum ‚Experimentieren mit Rechnern‘.⁴³ Seit der Neuzeit ist es üblich, dass Beobachtungen aus Theorien prognostiziert werden und sich dann anhand von Messexperimenten auch verifizieren lassen. Da dies nur für relativ einfache Vorgänge gilt, bildete sich – z. B. im Bereich der Physik – eine wachsende Kluft heraus zwischen Theorie und Empirie, zwischen Erforschung von Grundlagen und Anwendungen. Doch die numerischen Simulationen wandeln das Verhältnis von Grundlagenforschung und angewandter Forschung, insofern sie Computerexperimente ermöglichen, die als „Theorieexperimente“⁴⁴ gekennzeichnet werden können: Der Computer wird zu einer Art von ‚Theorielabor‘.⁴⁵ Nicht selten wird die Situation der Vermittlung von Grundlagenforschung und Anwendung, von Theorie und Empirie auch so beschrieben, dass computergenerierte Si-

43 GRAMELSBERGER 2010.

44 DOWLING 1999 spricht von „Experimenting on Theories“.

45 GRAMELSBERGER 2010, S. 86.

mulationen als ein „Tertium Quid“, als ein Drittes gelten, das auf neuartige Weise zwischen analytischer Theorie und empirischem Experiment vermittelt.⁴⁶ MORRISON und MORGAN sprechen auch von der „marriage of theory and phenomena“.⁴⁷

- (4.) *Knowing how*. Die Frage drängt sich auf, welche Art von Wissen durch computergenerierte Simulationen zu gewinnen ist. LENHARD betont, dass in Simulationen ein Wissen zwar überaus realistisch dargestellt wird, dabei jedoch noch keineswegs verstanden ist. Die Darstellung durch die Werkzeuge der Computervisualisierung ist luzide, das Wissen selbst bleibt opak. So verkoppeln sich im Computerexperiment zwei gewöhnlich einander opponierende Elemente.⁴⁸ Im Horizont unserer Betonung, dass Computersimulationen keine Tiefenstrukturen, vielmehr ‚nur‘ Oberflächenverhalten zum Vorschein bringen, findet sich dann auch eine Auflösung für diese gegenläufige Verbindung: Klar zu sehen ist in der Simulation das *Phänomen*; dunkel bleibt die das Phänomen generierende *Struktur*. Eine solche Situation ist keineswegs ungewöhnlich, sondern charakterisiert einen Gutteil unseres alltagspraktischen Verhaltens. Wenn wir Autofahren, brauchen wir kein Wissen um die das Fahren ermöglichenden physikalisch-mechanischen Vorgänge; wenn wir schriftlich rechnen, müssen wir nicht begründen können, warum unsere Rechenalgorithmen funktionieren und auf welch ein Objekt die Ziffer ‚0‘ referiert. Das Wissen, ‚wie etwas zu handhaben ist‘, ist im Umgang mit technischen Geräten gewöhnlich abgelöst vom Wissen, ‚warum diese Handhabung funktioniert‘; und diese Aufspaltung zwischen *Knowing how* und *Knowing that* gibt die Grundlage ab für die beständige Erweiterung unserer technischen Kompetenzen – nicht zuletzt im Umgang mit dem Computer selbst. Wir können also mit LENHARD⁴⁹ den Schluss ziehen, dass das explanatorische Wissen, welches Simulationsmodelle liefern, dem pragmatisch orientierten technischen Wissen ähnelt, bei dem ‚Verstehen‘ eingreifen und kontrollieren heißt, aber nicht notwendig auch heißt, erklären und begründen zu können.

6. Ein Resümee

(1.) Sowohl der alltagsweltlich ‚täuschende‘ wie der wissenschaftlich ‚erkenntniserzeugende‘ Sinn des Begriffes ‚Simulation‘ bezieht sich auf die Hervorbringung einer Zeichenwelt, die in dem, was gezeigt und bezeichnet wird, nicht auf die Tiefenstruktur, vielmehr auf das Oberflächenverhalten eines Systems zielt. Simuliert wird immer eine dynamische *Erscheinungsform*.

(2.) Insofern das computergenerierte Simulieren teil hat an der für alle Wissenschaften grundlegenden visualisierenden Modellierung ihrer Erkenntnisgegenstände, sind bildkritische Einsichten vonnöten, damit aus den Simulationsbildern keine Trugbilder werden. Auf die Notwendigkeit kritischen Bildbewusstseins hat schon PLATON verwiesen: Er verbindet die Einsicht in die Unabdingbarkeit bildlicher Vergegenwärtigung wissenschaftlicher Gegenstände (Linien- gleichnis) mit der Einforderung eines *Bewusstsein von deren Abbildcharakter*, um deren Umschlag in Trugbilder zu vermeiden (Höhlengleichnis).

46 Zu diesem Vermittlungsaspekt: GALISON 1996, HUMPHREYS 1994, RAMSEY 1997.

47 MORRISON und MORGAN 1999, S. 13, hierbei auf CARTWRIGHT 1983 zurückgehend.

48 LENHARD 2005, S. 314ff.

49 LENHARD 2005.

(3.) Die Quadriga aus Mathematisierung, Modellierung, Visualisierung und Digitalisierung bildet die Springquelle moderner Simulationstechniken in historischer wie systematischer Hinsicht.

(4.) Computergenerierte Simulationen sind vonnöten, wenn nichtlineares Verhalten von Systemen zu modellieren ist. Mathematisch beruhen sie auf der Diskretisierung eines kontinuierlichen Zeitverlaufs, so dass mit der numerischen Simulation an die Stelle der vollständigen und analytisch exakten Beschreibung dieses Zeitverlaufs zu jedem beliebigen Punkt eine getaktete lokale Berechnung nur noch ausgewählter Zeitpunkte tritt, deren ‚Zwischenräume‘ dann dunkel bleiben (müssen). Wie groß oder klein diese ‚Zwischenräume‘ sind, hängt von der Rechenkraft der Computer ab.

(5.) Computergenerierte Simulationen stellen eine neuartige *Vermittlung dar zwischen Theorie und Experiment*. Sie können als ‚Computerexperimente mit Theorien‘ gekennzeichnet werden, die eine neuartige, semi-empirische Methode zur Geltung bringen. Im Zusammenhang mit der globalen Vernetzung und der computerbasierten Vermessung der Welt, gestalten sie die Wissenschaften zu ‚Computational Sciences‘ um.⁵⁰

(6.) Solange es Wissenschaften gibt, solange auch müssen die abstrakten Gegenstände des Wissens mit Hilfe von graphisch-visuellen Hilfsmitteln wie Notationen, Tabellen, Diagrammen, Graphen und Karten veranschaulicht werden. Und diese diagrammatischen Darstellungen sind nicht nur Illustrationen, sondern sind an der Hervorbringung, Überprüfung und Begründung von Wissen unmittelbar beteiligt. Im Horizont dieser Tradition einer grundständigen Zusammenarbeit von Auge, Hand und Geist, bildet die Innovation computergenerierter Simulationen nur eine weitere Entwicklungsstufe, insofern nun die Maschine als Virtualisierungsapparat das Handwerk des Geistes unterstützt.

Literatur

- ARISTOTELES: *Metaphysik*. Bücher I–IV. Übersetzt von E. ROLFES. (Philosophische Bibliothek Bd. 307) Hamburg: Meiner 1982
- BLACK, M.: *Models and Metaphors*. Studies in Language and Philosophy. Ithaca, New York: Cornell Univ. Press. 1962
- BRAITENBERG, V., und HOSP, I. (Hrsg.): *Simulation*. Computer zwischen Experiment und Theorie. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt 1995
- BREDEKAMP, H., FISCHEL, A., SCHNEIDER, B., und WERNER, G.: *Bildwelten des Wissens*. In: BREDEKAMP, H., FISCHEL, A., SCHNEIDER, B., und WERNER, G. (Hrsg.): *Bilder in Prozessen*. *Bildwelten des Wissens*. *Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik* 1/1, 9–20 (2003)
- CARTWRIGHT, N.: *How the Laws of Physics Lie*. Oxford: Clarendon Press 1983
- CRELIER, G., und JARMANN, T.: *Abbildung von Wahrnehmung und Denken: funktionelle Magnetresonanz-Bildgebung in der Hirnforschung*. In: HEINTZ, B., und HUBER, J.: *Mit dem Auge denken*. Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten. S. 95–108. Zürich: Edition Voldemeer 2001
- DOTZLER, B.: *Simulation*. In: *Ästhetische Grundbegriff*. *Historisches Wörterbuch in sieben Bänden*. Hrsg. von K. BARCK. Bd. 5. S. 509–534. Stuttgart, Weimar: Metzler 2003
- DOWLING, D.: *Experimenting on theories*. *Science in Context* 12/2, 261–271 (1999)
- FIEDLER, K.: *Vom Ursprung der künstlerischen Tätigkeit (1887)*. In: FIEDLER, K.: *Schriften zur Kunst I*. Text nach der Ausgabe München 1913/14 mit weiteren Texten aus Zeitschriften und dem Nachlass, einer einleitenden Abhandlung und einer Bibliographie. Hrsg. von G. BOEHM. 2 Bde., S. 112–220. München: Fink 1991
- FOX KELLER, E.: *Models, simulation and ‚computer experiments‘*. In: RADDER, H. (Ed.): *The Philosophy of Scientific Experimentation*; pp. 198–215. Pittsburgh: Univ. of Pittsburgh Press 2003

⁵⁰ GRAMELSBERGER 2010.

- GALISON, P.: Computer simulations and the trading zone. In: GALISON, P., and STUMP, D. J. (Eds.): *The Disunity of Science: Boundaries, Contexts, and Power*; pp. 118–157. Stanford: Stanford Univ. Press 1996
- GRAMELSBERGER, G.: Story telling with code – Archaeology of climate modelling. *TeamEthno-online University of Lancaster* 2, 77–84 (2006)
- GRAMELSBERGER, G.: Simulation – Analyse der organisationellen Etablierung der (neuen) epistemischen Kultur des Simulierens am Beispiel der Klimamodellierung. In: HALFMANN, J. (Hrsg.): *Organisation(en) der Forschung*. S. 30–52. Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften 2009
- GRAMELSBERGER, G.: *Computertextperimente. Zum Wandel der Wissenschaft im Zeitalter des Computers*. Bielefeld: transcript 2010
- HEINTZ, B., und HUBER, J. (Hrsg.): *Mit dem Auge denken. Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*. Zürich, New York: Voldemeer/Springer 2001
- HESSE, M.: *Models and Analogies in Science*. Notre Dame: Univ. of Notre Dame Press 1966
- HESSLER, M., und MERSCH, D. (Hrsg.): *Logik des Bildlichen. Zur Kritik der ikonischen Vernunft*. Bielefeld: transcript 2009
- HINTERWALDNER, I.: Simulationsmodelle. Zur Verhältnisbestimmung von Modellierung und Bildgebung in interaktiven Echtzeitsimulationen. In: REICHLI, L., SIEGEL, S., und SPELTEN, A. (Hrsg.): *Visuelle Modelle*. S. 301–316. München: Fink 2008
- HUMPHREYS, P.: Computer Simulations. In: FORBES, M., FINE, A., and WESSELS, L. (Eds.): *PSA Biennial Meeting 1990*. Vol. 2, 497–506. East Lansing: Philosophy of Science Association 1991
- HUMPHREYS, P.: Computational empiricism. *Foundations of Science* 1, 119–130 (1995/96)
- KEMP, M.: Seeing and picturing. Visual representation in twentieth-century science. In: KRIGE, J., und PESTRE, D. (Eds.): *Science in Twentieth Century*; pp. 361–390. Paris: Harwood Academic Publishers 1997
- KNORR-CEFINA, K.: ‚Viskurse‘ der Physik. Konsensbildung und visuelle Darstellung. In: HEINTZ, B., und HUBER, J. (Hrsg.): *Mit dem Auge denken. Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*. S. 305–320. Zürich, New York: Voldemeer/Springer 2001
- KRÄMER, S.: *Symbolische Maschinen. Die Idee der Formalisierung in geschichtlichem Abriss*. Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft 1988
- KRÄMER, S.: Über das Verhältnis von Algebra und Geometrie in Descartes ‚*Géométrie*‘. *Philosophia Naturalis* 26/1, 19–40 (1989)
- KRÄMER, S.: *Berechenbare Vernunft. Kalkül und Rationalismus im 17. Jahrhundert. Quellen und Studien zur Philosophie* Bd. 28. Berlin, New York: De Gruyter 1991a
- KRÄMER, S.: Zur Begründung des Infinitesimalkalküls durch Leibniz. *Philosophia Naturalis* 28/2, 117–146 (1991b)
- KRÄMER, S.: *Medium, Bote, Übertragung. Kleine Metaphysik der Medialität*. Frankfurt (Main): Suhrkamp 2008
- KRÄMER, S.: Operative Bildlichkeit. Von der ‚Grammatologie‘ zu einer ‚Diagrammatologie‘? Reflexionen über er-kennendes Sehen. In: HESSLER, M., und MERSCH, D. (Hrsg.): *Logik des Bildlichen. Zur Kritik der ikonischen Vernunft*. S. 94–123. Bielefeld: transcript 2009
- KÜPPERS, G., und LENHARD, J.: Computersimulationen: Modellierungen zweiter Ordnung. *Journal for General Philosophy of Science* 36/2, 305–332 (2005)
- LAMBERT, J. H.: *Anlage zur Architectonic oder Theorie des Einfachen und des Ersten in der philosophischen und mathematischen Erkenntnis I (1771)*. Bd. 3 der Philosophischen Schriften in 10 Bde. Hrsg. von H. W. ARNDT. Hildesheim: Olms 1965
- LANDMAN, U., LUEDTKE, W. D., BURNHAM, N. A., and COLTON, R. J.: Atomistic mechanisms and dynamics of adhesion, nanoindentation, and fracture. *Science* 248, 454–461 (1990)
- LAPLACE, P.-S. DE: *Philosophischer Versuch über die Wahrscheinlichkeit*. Leipzig: Akademische Verlagsanstalt 1832 (frz. Orig.: *Essai philosophique sur les probabilités*. Paris 1814)
- LATOURET, B.: Drawing things together. In: LYNCH, M., and WOOLGAR, S. (Eds.): *Representation in Scientific Practice*; pp. 19–68. London: MIT Press 1990
- LATOURET, B.: *Der Berliner Schlüssel. Erkundungen eines Liebhabers der Wissenschaften*. Berlin: Akademie Verlag 1996
- LEIBNIZ, G. W.: *Mathematische Schriften in 7 Bde. (1875–1890)*. Hrsg. von C. I. GERHARDT. Nachdruck. Hildesheim, Berlin: Olms 1965
- LENHARD, J.: Nanoscience and the Janus-faced character of simulations. In: BAIRD, D., NORDMANN, A., and SCHUMMER, J. (Eds.): *Discovering the Nanoscale*; pp. 93–100. Amsterdam: IOS Press 2004
- LEROI-GOURHAN, A.: *Hand und Wort. Die Evolution von Technik, Sprache und Kunst*. Frankfurt (Main): Suhrkamp 1980

- LYNCH, M., and WOOLGAR, S.: Representation in Scientific Practice. Cambridge (Mass.), London: MIT Press 1990
- MAHR, B.: Modellieren. Beobachtungen und Gedanken zur Geschichte des Modellbegriffs. In: KRÄMER, S., und BREDEKAMP, H. (Hrsg.): Bild – Schrift – Zahl. S. 59–86. München: Fink 2003
- MORRISON, M.: Models as autonomous agents. In: MORRISON, M., and MORGAN, M. S. (Eds.): Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science; pp. 38–65. Cambridge: Cambridge Univ. Press 1999
- MORRISON, M., and MORGAN, M. S. (Eds.): Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science. Cambridge: Cambridge Univ. Press 1999
- NEUNZERT, H.: Mathematik und Computersimulation: Modelle, Algorithmen, Bilder. In: BRAITENBERG, V., und HOSP, I. (Hrsg.): Simulation. Computer zwischen Experiment und Theorie. S. 44–55. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt 1995
- PLATON: Politeia. In: EIGLER, G. (Hrsg.): Werke in 8 Bde. Übers. von F. SCHLEIERMACHER. Bd. 4. Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft 1971
- POINCARÉ, H.: Wissenschaft und Methode. Leipzig: Teubner 1914, Nachdruck. Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft 1973 (frz. Orig.: Science et Méthode. Paris 1908)
- RAMSEY, J.: Between the fundamental and the phenomenological: The challenge of 'semi-empirical' methods. Philosophy of Science 65, 627–653 (1997)
- REICHEL, L., SIEGEL, S., und SPELTEN, A. (Hrsg.): Visuelle Modelle. München: Fink 2008
- ROHRLICH, F.: Computer simulation in the physical sciences. In: FORBES, M., FINE, A., and WESSELS, L. (Eds.): PSA Biennial Meeting 1990. Vol. 2, 507–518. East Lansing: Philosophy of Science Association 1991
- RÖLLER, N.: Simulation. In: RITTER, J., und GRÜNDER, K. (Hrsg.): Historisches Wörterbuch der Philosophie. Bd. 9. Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft 1995
- RÖLLER, N.: Scientia media. Simulation zwischen den Kulturen. In: GLEININGER, A., und VRACHLIOTIS, G. (Hrsg.): Simulation. Präsentationstechnik und Erkenntnisinstrument. Basel: Birkhäuser 2008
- SCHRÖTER, J.: Intermedialität. Medienspezifität und die universelle Maschine. In: KRÄMER, S. (Hrsg.): Performativität und Medialität. S. 385–412. München: Fink 2004
- SIMON, H. A.: The Sciences of the Artificial. Cambridge (Mass.): MIT Press. 1998
- STACHOWIAK, H.: Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer 1973
- TOPPER, D.: Towards an epistemology of scientific illustration. In: BAIGRIE, B. S. (Ed.): Picturing Knowledge. Historical and Philosophical Problems Concerning the Use of Art in Science; pp. 86–134. Toronto: Univ. of Toronto Press 1996
- VIÉTE, F.: Opera mathematica (1646). Hrsg. von F. VON SCHOOTEN, Nachdruck. Hildesheim: Olms 1970
- WIESING, L.: Artificielle Präsenz. Studien zur Philosophie des Bildes. Frankfurt (Main): Suhrkamp 2005
- WINKLER, H.: Docuverse – Zur Medientheorie der Computer. München: Boer 1997
- WINSBERG, E.: Simulated experiments: Methodology for a virtual world. Philosophy of Science 70, 105–125 (2003)
- WINSBERG, E.: Sanctioning models: The epistemology of simulation. Science in Context 12/2, 275–292 (1999)

Prof. Dr. Sybille KRÄMER
Institut für Philosophie
Freie Universität Berlin
Habelschwerdter Allee 30
14195 Berlin
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 30 83854509
Fax: +49 30 83856430
E-Mail: s.kraemer@philosophie.fu-berlin.de

**Computermodelle in der Wissenschaft –
zwischen Analyse, Vorhersage und
Suggestion**

NOVA ACTA LEOPOLDINA

Abhandlungen der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina

Herausgegeben vom Präsidium der Akademie

NEUE FOLGE

NUMMER 377

BAND 110

Computermodelle in der Wissenschaft – zwischen Analyse, Vorhersage und Suggestion

Vorträge anlässlich der Jahresversammlung
vom 2. bis 4. Oktober 2009 zu Halle (Saale)

Herausgegeben von:

Thomas LENGAUER (Saarbrücken)
Obmann der Sektion Informationswissenschaften und
Senator der Leopoldina

Mit 152 Abbildungen und 4 Tabellen



Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina –
Nationale Akademie der Wissenschaften, Halle (Saale) 2011
Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart

Redaktion: Dr. Michael KAASCH und Dr. Joachim KAASCH
Fotos von der Jahresversammlung...Computermodelle in der Wissenschaft“: Jens SCHLÜTER (Halle/Saale)

**Die Schriftenreihe Nova Acta Leopoldina erscheint bei der Wissenschaftlichen Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart, Birkenwaldstraße 44, 70191 Stuttgart, Bundesrepublik Deutschland.
Jedes Heft ist einzeln käuflich!**

Die Schriftenreihe wird gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie das Kultusministerium des Landes Sachsen-Anhalt.

Wir danken der Alfred Krupp von Bohlen und Halbach-Stiftung für die finanzielle Unterstützung der Veranstaltung.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Die Abkürzung ML hinter dem Namen der Autoren steht für Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina.

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdruckes, der fotomechanischen Wiedergabe und der Übersetzung, vorbehalten.

© 2011 Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V. = Nationale Akademie der Wissenschaften
Hausadresse: 06108 Halle (Saale), Emil-Abderhalden-Straße 37, Tel. +49 345 4723934
Herausgeber: Präsidium der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften
Printed in Germany 2011
Gesamtherstellung: Elbe Druckerei Wittenberg
ISBN: 978-3-8047-2802-8
ISSN: 0369-5034
Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier.