E-Journal (2016)
5. Jahrgang · 1

Forum Interdisziplinäre Begriffsgeschichte (FIB)

Herausgegeben von Ernst Müller
Zentrum für Literatur- und Kulturforschung Berlin

Impressum

Hrsg. von	Ernst Müller, Zentrum für Literatur- und Kulturforschung Berlin (ZfL) *www.zfl-berlin.org*
Gastherausgeberinnen dieser Ausgabe	Eva Axer, Eva Geulen, Alexandra Heimes
Direktorin	Prof. Dr. Eva Geulen
©	2016 · Das Copyright und sämtliche Nutzungsrechte liegen ausschließlich bei den Autoren, ein Nachdruck der Texte auch in Auszügen ist nur mit deren ausdrücklicher Genehmigung gestattet.
Redaktion	Ernst Müller (Leitung), Herbert Kopp-Oberstebrink, Dirk Naguschewski, Tatjana Petzer, Falko Schmieder, Georg Toepfer, Stefan Willer
Wissenschaftlicher Beirat	Faustino Oncina Coves (Valencia), Christian Geulen (Koblenz), Eva Johach (Konstanz), Helge Jordheim (Oslo), Christian Kassung (Berlin), Clemens Knobloch (Siegen), Sigrid Weigel (Berlin)
ISSN	**2195-0598**
Gestaltung	Carolyn Steinbeck · Gestaltung
Layout / Satz	Jana Sherpa
gesetzt in der	ITC Charter

Inhalt

Simulationsmodelle

Gabriele Gramelsberger

1. Einleitung

Mit der Entwicklung elektronischer Computer in den 1940er Jahren und höheren Programmiersprachen in den 1950er Jahren hält ein neuer Modelltyp Einzug in die Wissenschaften: Simulationsmodelle. Bekannteste Vertreter sind wohl Klima- und Wettermodelle, die mittlerweile Teil der Alltagskultur geworden sind.[1] Kaum eine Natur- oder Technikwissenschaft kommt heute noch ohne Simulationsmodelle aus und neben der traditionellen Einteilung in Theorie und Empirie fügt sich die Simulation als ›dritte Methode‹ im Rahmen von *Computational Departments* in die Wissenschaftslandschaft ein. Dabei ist der Begriff des Simulierens durchaus nicht eindeutig definiert. In einem weiten Sinne kann er im wissenschaftlichen Kontext für jegliche Form des Nachahmens und Imitierens verwendet werden: ein Crashtest im Labor simuliert einen Autounfall, ein Schiffsmodell im Strömungskanal bildet maßstabsgerecht ein Containerschiff nach und ein Ball-Stick-Model imitiert ein Molekül. Dennoch hat sich im wissenschaftlichen Kontext der Begriff des Simulierens auf die Computersimulation zentriert und in unterschiedliche Subkategorien ausdifferenziert:

- deterministische Simulationen basierend auf Differentialgleichungen
- stochastische Simulationen basierend auf stochastischen Differentialgleichungen oder Zufallsläufeerzeugungsmethoden wie der Monte-Carlo-Simulation
- ereignisbasierte Simulationen, in denen bestimmte Ereignisse andere Ereignisse auslösen
- sogenannte *Soft Computing*-Methoden wie Agentenbasierte Simulationen, Genetische Programmierung, Evolutionäre Algorithmen oder Neuronale Netze.

Im vorliegenden Zusammenhang soll der Begriff des Simulierens jedoch einzig auf deterministische Simulationen bezogen werden. Diese Simulationsart ist nicht nur die weitest verbreitete in den Natur- oder Technikwissenschaften, sie ist auch die älteste und damit klassische Form der Simulation.

1 Vgl. beispielsweise Harald Welzer/Claus Leggewie: *Das Ende der Welt, wie wir sie kannten. Klima, Zukunft und die Chancen der Demokratie*, Frankfurt a. M. 2009.

2. Historischer Hintergrund der Simulation

Die Geschichte der deterministischen Simulation ist die des Calculus von Isaac Newton und Gottfried Wilhelm Leibniz, des Funktionsbegriffs von Leonhard Euler sowie des Versuchs, die in der Natur beobachteten Bewegungen und Veränderungen mathematisch fassbar zu machen.[2] Die Vorstellung – von den Pythagoreern bis Galileo Galilei –, dass das Buch der Natur in der Sprache der Mathematik geschrieben sei, hatte zwar den Vorteil, den *Mathematical Way in the Scientific Revolution* zu beschleunigen.[3] Doch zu dem Preis, dass unter der Sprache der Natur die der statischen Euklidischen Geometrie verstanden wurde.[4] Die Anstrengungen der frühen Neuzeit, diese statische Beschreibungssprache zu überwinden, waren langwierig und mühsam. Sie erforderten einerseits die analytische Darstellung der Geometrie mit algebraischen Zeichen, wie sie von René Descartes 1637 in seiner *Geometrie* erstmals eingeführt wurde, andererseits die arithmetische Vorstellung, dass sich die geometrische Linie in eine reine Wertfolge von Zahlen auflösen lässt.[5] Schließlich verdichteten sich die Anstrengungen – wie dies Ernst Cassirer treffend beschrieben hat[6] – in der Symbolik des *Calculus*, insofern Newtons Fluxion ($\dot{x}$) und Leibniz' Differential (dy/dx) eine neue Art geometrischer Objekte indizierten, die man sich als ›in Bewegung‹ vorstellen muss.[7]

Doch wie umgehen mit diesen neuen Objekten? Als bewegliche, mathematische Objekte bedürfen sie Rechenvorschriften, die mit infinitesimalen Größen operieren. Leibniz denkt sein Differential von der Tangentenbestimmung zunehmend kleinerer Kurvenabschnitte her, Newton von der Physik als fluente Größen. Beide formulieren Rechenregeln, die den Umgang mit Bewegungen und Veränderungen ermöglichen. Doch obwohl Leibniz den Begriff der Funktion 1673 in die Mathematik einführte und Johann Bernoulli ihn 1718 formal definierte, gelingt es erst Leonhard Euler und Joseph-Louise Lagrange, den Funktionsbegriff Mitte des 18. Jahrhunderts als analytischen Grundbegriff zu etablieren und für die Differentialrechnung nutzbar zu machen. Für Euler ist »eine Function einer veränderlichen Zahlengröße […] ein analytischer Ausdruck, der auf irgend eine Weise aus der veränderlichen Zahlgröße und aus eigentlichen Zahlen oder aus constanten Zahlengrößen zusammengesetzt ist.«[8] Indem Euler die Verhältnisse der Differentiale (Quotienten) als Funktionen notiert, kann er den Begriff des Differentials und des Unendlichkleinen durch den Funktionsbegriff ersetzen. Durch diese Algebraisierung der Infinitesimalrechnung verändert sich einerseits das Rechnen damit, da nun mit Funktionen und ihren Ableitungen gerechnet wird. Andererseits erweitert sich dadurch das Anwendungsspektrum, insofern die Infinitesimalrechnung zum flexibel einsetzbaren Instrument veränderlicher Größen wird, wobei Größen beliebige Objekte sein können, die sich vermindern oder vermehren. Als ein solches Instrument ist die Differentialrechnung auf alle Prozesse der Verminderung oder Vermehrung anwendbar, seien diese geometrisch, physikalisch oder ökonomisch.

2 Herman H. Goldstine: *History of the Calculus of Variations from the Seventeenth Through the Nineteenth Century*, New York 1980.

3 Peter Dear: *Disciplines & Experience. The Mathematical Way in the Scientific Revolution*, Chicago 1995.

4 Beispielsweise Galileo Galilei: *Il Saggiatore* (1623), Padua 2005.

5 René Descartes: *Geometrie* (1637), Darmstadt 1981; Gabriele Gramelsberger: »Schrift auf den Punkt gebracht – Extrapolation, Rekursion, Simulation«, in: Eva Cancik-Kirschbaum/Sybille Krämer/Rainer Totzke (Hg.): *Schriftbildlichkeit. Wahrnehmbarkeit, Materialität und Operativität von Notationen*, Berlin 2012, S. 389–400.

6 »Er [d.i. der Kalkül] hatte sich bereits auf den verschiedenen Gebieten – in der Begründung der Dynamik durch Galilei, in der Lehre von den Maxima und Minima bei Fermat, in der Theorie der unendlichen Reihen, in dem sog. ›umgekehrten Tangentenproblem‹ usf. – bestätigt, ehe er allgemein erkannt und allgemein fixiert war. Newtons Zeichen $\dot{x}$ und Leibniz' Zeichen: dy/dx leisten zunächst nichts anderes, als daß sie diese Fixierung vollziehen: sie bezeichnen einen gemeinsamen Richtpunkt für Untersuchungen, die zuvor auf getrennten Wegen verliefen.« Ernst Cassirer: *Philosophie der Symbolischen Formen: Phänomenologie der Erkenntnis* (1929), Darmstadt 1990, hier S. 468 und S. 469.

7 Niccolò Guicciardini: »Newtons Methode und Leibniz' Kalkül«, in: Hans Niels Jahnke (Hg.): *Geschichte der Analysis*, Heidelberg/Berlin 1999, S. 89–130, hier S. 102; Gottfried W. Leibniz: »Nova Methodus Pro Maximis Et Minimis«, in: *Acta eruditorum*, Leipzig 1684; Isaac Newton: *De methodis serierum et fluxionum* (1671), *The method of fluxions and infinite series: with its application to the geometry of curve-lines*, London 1736.

8 Leonhard Euler: *Introductio in analysin infinitorum* (1748), Berlin 1983, S. 4.

Damit geht auf Euler die erste moderne Differentialgleichung der Mathematik zurück.[9] In seinen *Principes généraux du mouvement des fluides* von 1755 formuliert er die grundlegende Bewegungsgleichung für idealisierte Strömungsprozesse.[10] Basierend auf Newtons zweitem Axiom F = dp/dt, das den Einfluss von Kräften (F) auf die zeitliche Veränderung (dt) von Impulsen (dp als Produkt von Masse m und Geschwindigkeit v) beschreibt, formuliert Euler die Impulsgleichung eines reibungsfreien Fluids. Indem die Impulsgleichung um die Kontinuitätsgleichung, die Energiegleichung und die Zustandsgleichung erweitert wird, entsteht ein mathematisches Modell zur Beschreibung des Verhaltens idealer Gase in Form eines partiellen Differentialgleichungssystems. Fügt man noch die innere Reibung eines Fluids hinzu, wie dies Claude M. Navier und unabhängig von ihm George G. Stokes Mitte des 19. Jahrhunderts taten, erhält man die Navier-Stokes-Gleichungen.[11] Mit diesen Gleichungen lässt sich die Dynamik von Strömungen realistischer beschreiben. »These equations are applicable to the determination of the motion of water pipes and canals, to the calculation of the effect of friction on the motions of tides and waves, and such questions.«[12] Allerdings lassen sich mit den Navier-Stokes-Gleichungen solche Anwendungsfälle nur beschreiben, algebraisch lösbar sind diese Gleichungen aufgrund ihrer Komplexität (Nichtlinearität) nicht. Das heißt, man kennt die exakte Lösung nicht. Entweder vereinfacht man das Gleichungssystem stark und gelangt wieder zu den einfacheren Euler-Gleichungen für idealisierte Fluide oder man ›simuliert‹ die exakte, aber unbekannte Lösung, indem man die Gleichungen numerisch für ein Raum-Zeitgitter näherungsweise berechnet. Eben dies meint die Rede vom Simulieren im Kontext der klassischen, deterministischen Simulationen.

3. Simulationsmodelle

Simulieren in diesem Sinne verstanden ist Imitation. Die numerische, approximative Berechnung imitiert die unbekannte, algebraische Lösung, die eine allgemeine Lösung für alle Raum- und Zeitpunkte wäre. Da die numerische Imitation nie allgemein sein kann, sondern immer nur für einige Raum- und Zeitpunkte berechnet ist, ist sie ein Exemplum der unbekannten, algebraischen Lösung. Es bedarf vieler, einzelner numerischer Berechnungen, um sich ein vages Bild des Unbekannten zu verschaffen. In diesem Sinne ist die Simulation der Messung und dem Experiment als Methode ähnlich, auch wenn sie keine Empirie erforscht, sondern den unendlichen Lösungsraum eines mathematischen Modells. Doch dies ist eine rechenintensive Herausforderung. Die Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Rechenkraft kennzeichnet die Simulationswissenschaften ebenso wie die Approximativität ihrer Resultate. Denn die Annäherung (Approximation) ist nie perfekt.[13] Auch wenn konkrete Zahlenwerte am Ende jeder Simulation stehen, ist der Aussagewert dieser Resultate als angenäherte Imitation mit Unsicherheiten behaftet; eine vages Bild, das den Verlauf einiger, möglicher Trajektorien durch den unendlichen Lösungsraum eines mathematischen Modells beschreibt.

---

9 Eine Differentialgleichung ist eine Gleichung für eine gesuchte Funktion von einer oder mehreren Variablen, in der auch Ableitungen dieser Funktion vorkommen können. Unterschieden werden gewöhnliche Differentialgleichungen (gesuchte Funktion hängt nur von einer Variablen ab) und partielle Differentialgleichungen (gesuchte Funktion hängt von mehreren Variablen ab und es treten partielle Ableitungen nach mehr als einer Variable auf).

10 Leonhard Euler: *Principes généraux du mouvement des fluides* (1755), in: ders.: *Opera omnia*, Reihe II, Bd. 12, Basel 1954, S. 54–91.

11 Claude M. Navier: »Memoire sur les lois du mouvement des fluides«, in: *Mémoires de l'Académie des Sciences* 6 (1822), S. 389–440; George G. Stokes: »On the theories of the internal friction of fluids in motion« (1845), in: ders.: *Mathematical and Physical Papers*, Bd. 1, Cambridge 1880, S. 75–115.

12 Stokes: »Internal friction of fluids in motion« (Anm. 11), S. 93.

13 Das Problem liegt einerseits in der Diskretisierung, andererseits in der Nichtlinearität komplexer Gleichungssysteme. Beispielsweise liegt die diskretisierte Annäherung an das Infinitesimale in aktuellen Klimamodellen bei 60 km, in aktuellen Wettermodellen bei etwa 6 km Gitterabstand zwischen den Berechnungspunkten. Sowohl Klima- wie Wettermodelle sind nichtlineare Modelle und insbesondere bei Wettermodellen führt die Nichtlinearität bei leicht variierenden Anfangsbedingungen schnell ins Chaos. Ob die berechneten Trajektorien tatsächlich einem prognostizierten Wetterverlauf entsprechen, ist schwer beurteilbar. Daher gilt das Wetter über einen längeren Zeitraum als prinzipiell nicht vorhersagbar. Edward N. Lorenz: »Deterministic Nonperiodic Flow«, in: *Journal of the Atmospheric Sciences* 20 (1963) 2, S. 130–141.

Dieses vage Bild erfordert im Unterschied zu mathematischen Gleichungen eine Konkretisierung. Kann die Algebra im Allgemeinen schwelgen, so benötigt die Numerik konkrete Anweisungen und Zahlwerte, um Berechnungen auszuführen. Diese konkreten Anweisungen (Rechenvorschriften) und Zahlwerte (Parameterwerte, Konstanten) liefert das Simulationsmodell. Als einfache Rechenmodelle gehen sie bis ins 18. Jahrhundert und weiter zurück. Bereits Leibniz beschwerte sich über die Mühseligkeit des ›Simulierens‹: »For it is unworthy of excellent men to lose hours like slaves in the labour of calculation which could safely be relegated to anyone else if machines were used.«[14] Von daher wundert es nicht, dass viel Mühe in die Entwicklung von Rechnern investiert wurde, die jedoch bis Anfang des 20. Jahrhunderts rein mechanische Rechenhilfen waren. Der Begriff des ›Computers‹ war daher menschlichen Rechnern vorbehalten, die arbeitsteilig aufwendige Rechenprojekte händisch durchführten: für die Berechnung der Gezeiten, für astronomische Almanache oder für Versicherungen.[15]

Insbesondere in der Meteorologie finden sich frühe Versuche, erste Wettermodelle zu konzipieren und Wetterprognosen zu berechnen. Obwohl die theoretischen Grundlagen für Simulationsmodelle des Wetters mit den hydrodynamischen Navier-Stokes-Gleichungen sowie den Hauptsätzen der Thermodynamik Mitte des 19. Jahrhunderts gegeben waren – Vilhelm Bjerknes formulierte 1904 ein vollständiges Modell basierend auf den sogenannten ›primitiven‹ Grundgleichungen der Strömungsdynamik[16] – lag es außerhalb der Reichweite menschlicher Computer, ein derart komplexes Wettermodell zu berechnen.[17] Man musste sich mit stark vereinfachten Rechenmodellen begnügen. Beispielsweise schlug Heinrich Hertz 1884 ein einfaches thermodynamisches Modell und eine graphische Berechnungsmethode zur Bestimmung der Zustandsänderungen feuchter Luft vor und Anton Oberbeck, »for the first time, integrated the equations of motion for fluids under conditions approximating those of the atmosphere.«[18]

Diese Rechenmodelle per Hand zu berechnen, bedeutete auch, nur wenige Berechnungen für ein ganz spezifisches Problem machen zu können, wie beispielsweise die Berechnung der Bewegung der feuchten Luft für ein kleines Gebiet. Die Situation änderte sich erst in den 1940er Jahren, als elektrische Computer gebaut wurden. Eines der ersten computerbasierten Simulationsmodelle überhaupt war ein einfaches Wettermodell. Es wurde unter der Leitung von Jules Charney und John von Neumann Ende der 1940er Jahre entwickelt und 1950 auf einem der ersten Computer berechnet, dem zwischen 1942 und 1946 gebauten Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC). Doch auch wenn ENIAC 5.000 Additionen pro Sekunde durchführen konnte, was ihm den Ruf eines ›Elektronengehirns‹ einbrachte – ein menschlicher Computer brachte es auf etwa auf 100 Berechnungen pro Stunde –, war dieses erste, computerbasierte Wettermodel ein sehr einfaches.[19] Dennoch behauptete John von Neumann, »daß das

14 Gottfried W. Leibniz: *Machina arithmetica in qua non additio tantum et subtractio sed et multiplicatio nullo, divisio vero paene nullo animi labore peragantur* (1685), ins Englische übersetzt und teilweise nachgedruckt in: Herman H. Goldstine: *The Computer from Pascal to von Neumann*, Princeton 1993, hier S. 8.

15 David A. Grier: *When Computers were Human*, Princeton 2005.

16 Vilhelm Bjerknes: »Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet von Standpunkt der Mechanik und Physik«, in: *Meteorologische Zeitschrift* 21 (1904) 1, S. 1–7.

17 Anfang der 1920 Jahre versuchte Lewis Fry Richardson ein primitives Gleichungsmodell des Wetters per Hand in wochenlanger Arbeit für eine einfache Vorhersage der Luftdruckveränderung für ein kleines Gebiet zu berechnen und scheiterte. Lewis Fry Richardson: *Weather Prediction by Numerical Process*, Cambridge 1922.

18 Cleveland Abbe: *Preparatory studies for deductive methods in storm and weather predictions*, Washington, D.C. 1890, S. 9; Heinrich Hertz: »Graphische Methode zur Bestimmung der adiabatischen Zustandsänderungen feuchter Luft«, in: *Meteorologische Zeitschrift* 1 (1884) 11/12, S. 412–431; Anton Oberbeck: »Ueber die Bewegungserscheinungen der Atmosphäre«, in: *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin* 14 (1888), S. 383–395 und S. 1129–1138.

19 Dieses erste Wettermodell war ein simples barotropes Modell, das die Luftdruckveränderung in einer Höhe von 5.000 Metern über den USA berechnete. In einem barotropen Modell gibt es keine Feuchte, es ist also ein rein hydrodynamisches Modell. Zudem ist der Wind als geostrophischer Wind idealisiert, das heißt, die Isobaren (Linien gleichen Luftdrucks) werden als Geraden gesehen und laufen parallel zu den Isothermen (Linien gleicher Temperatur). In einem solchen linearen Modell gibt es keine Turbulenzen, doch Wetter ist ein reines Turbulenzphänomen. Nichtsdestotrotz wurde das Modell für ein 15 x 18 Gitter berechnet und ENIAC musste dazu über 200.000 Rechenoperationen ausführen. Jule G. Charney/Ragnar Fjørtof/John von Neumann: »Numerical Integration of the Barotropic Vorticity Equation«, in: *Tellus* 2 (1950), S. 237–254; Kristine C. Harper: *Weather by the Numbers. The Genesis of Modern Meteorology*, Cambridge 2008.

1-Lagen-Modell in der Regel ungefähr so gut ist wie ein erfahrener ›subjektiver‹ Wettersachverständiger, […] während das 3-Lagen-Modell wesentlich besser ist.«[20]

Doch auch Charneys und von Neumanns barotropes Simulationsmodell wurde nur für vier 24-Stunden- und zwei 12-Stunden-Berechnungen der Luftdruckveränderungen für ein 15 x 18 Gitter mit einem Gitterabstand von 736 km berechnet. Diese Rechnungen – und 1956 sollte Norman Phillips mit einem ebenso einfachen, ersten computerbasierten Klimamodell folgen[21] – waren zwar im mathematischen Sinne numerische Simulationen von Differentialgleichungen, aber für Simulationen im heutigen Sinne fehlte noch etwas Entscheidendes. Deshalb sprachen sowohl Charney als auch Phillips nur von ›numerical integrations‹ oder ›numerical experiments‹.

4. Von numerischen Experimenten zum Simulieren

Der Begriff ›Simulation‹ setzt sich in den Titeln und Untertiteln naturwissenschaftlicher Artikel erst in den 1960er Jahren durch. Auch wenn eine detaillierte Verbreitungsgeschichte des Simulationsbegriffs bislang fehlt, so erfolgt der Sprachübergang in der Begriffsverwendung vom ›Rechnen‹ zum ›Simulieren‹ in der Fachliteratur erst zu einem Zeitpunkt, als Simulationsmodelle nicht mehr als Rechenmodelle für einige wenige Berechnungen dienen, sondern als ›in-silico‹ Experimentalsysteme.[22] Ein markantes Beispiel für den Übergang zum Simulieren ist ein Klimamodell der Universität von Kalifornien in Los Angeles (UCLA), das Anfang der 1960er Jahre von Yale Mintz und Akio Arakawa entwickelt wurde. Das Mintz-Arakawa-Modell war als globales 2-Ebenen-Modell, basierend auf den hydro- wie thermodynamischen Gleichungen mit einer realistischen Land-Ozean-Verteilung, das ambitionierteste Klimamodell seiner Zeit. Was die numerischen Experimente von Mintz und Arakawa so besonders machte, war dass sie mit ihrem Modell ›spielten‹. Sie veränderten willkürlich die Randbedingungen und untersuchten, wie sich das Modell verhält, indem sie eine Vielzahl numerischer Computerexperimente durchführten. Nicht zufällig hieß der Untertitel ihrer entsprechenden Publikation *An experiment in climate simulation*.[23] Ob hier der Begriff Simulation tatsächlich zum ersten Mal in der meteorologischen Literatur auftritt, steht zu klären, aber diese Art der Modellverwendung zeigt den Übergang von der Jahrhunderte alten Rechentradition zur Simulation als Computerexperiment.

Die unabdingbaren technischen Voraussetzungen für diesen Übergang waren leistungsstarke Computer und höhere Programmiersprachen. Das Mintz-Arakawa-Modell war in *Formula Transformator* (FORTRAN) geschrieben und wurde auf einem IBM 7090 Computer berechnet, der immerhin schon 229.000 Additionen pro Sekunde ausführen konnte – also fast fünfzig Mal schneller als ENIAC war.[24] Der IBM 7090 Computer war das Nachfolgemodell der IBM 709 und 704 Computer; und letzterer war der erste Computer, der 1957 mit der ersten Programmiersprache, eben FORTRAN, ausgeliefert worden war.[25]

---

20 John von Neumann: »Entwicklung und Ausnutzung neuerer mathematischer Maschinen« (1954), in: ders.: *Collected Works*, Bd. 5: *Design of Computers, Theory of Automata and Numerical Analysis*, Oxford 1963, S. 248–268, hier S. 266. Ein 1-Lagen-Modell berechnet das Wetter nur für eine horizontale Ebene, ein 3-Lagen-Modell für drei horizontale Ebenen.

21 Norman Phillips: »The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment«, in: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 82 (1956), S. 132–164.

22 ›In-silico‹ bezieht sich auf die Silizium-basierte Computertechnologie und der Begriff Experimentalsysteme auf Hans-Jörg Rheinbergers Konzept wissenschaftlicher Experimentierumgebungen. Hans-Jörg Rheinberger: *Experimentalsysteme und epistemische Dinge. Eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas*, Göttingen 2002; Gabriele Gramelsberger: *Computerexperimente. Zum Wandel der Wissenschaft im Zeitalter des Computers*, Bielefeld 2010.

23 Yale Mintz: »Very long-term global integration of the primitive equations of atmospheric motion: An experiment in climate simulation«, in: *WMO Technical Notes* 66 (1965), S. 141–167.

24 Eine historische Randnotiz: Der IBM 7090 Computer der Universität von Kalifornien in Los Angeles (UCLA) war einer der vier Rechner des ARPA-Net, also des Vorläufers des heutigen Internets.

25 Obwohl damals auch andere Programmiersprachen entwickelt wurden, beispielsweise MATH-MATIC von Grace Hopper für UNIVAC, setzte sich FORTRAN in den Natur- und Ingenieurswissenschaften durch und wird bis heute für zahlreiche Simulationsmodelle verwendet. Bruce Rosenblatt: »The Successors to FORTRAN – Why Does FORTRAN Survive?«, in: *IEEE Annals of the History of Computing* 6 (1984) 1, S. 39–40.

FORTRAN wurde von John Backus entwickelt, mit dem Ziel »to ease the programmer's job. [...] Once asked, the answer to this question had to be: Let him use mathematical notations.«[26] Die Programmiersprache erlaubte es, die bis dahin per Hand codierten, maschinentauglichen Befehle mathematischer Berechnungen bequem in den gewohnten mathematischen Notationen darzustellen. Und diese Bequemlichkeit, gepaart mit immer schnelleren Computern, zahlte sich aus. Mit Vannevar Bush gesprochen: »There is a great deal more arithmetic and better arithmetic in the world than there used to be.«[27]

5. Epistemische Kultur des Prospektiven

Heute ist ein Großteil des mathematisierten Wissens der Natur- und Technikwissenschaften in den Algorithmen und Programmen der Simulationsmodelle notiert. Da es sich bei diesen Codierungen wie bei den Differentialgleichungen um ›operative Schriften‹ handelt, beschreiben sie nicht nur ›Etwas‹, sondern führen es auch aus.[28] Bereits 1904 bemerkte Vilhelm Bjerknes für sein konzeptuelles Simulationsmodell des Wetters: »Wenn es sich so verhält, wie jeder naturwissenschaftlich denkende Mann glaubt, daß sich die späteren atmosphärischen Zustände gesetzmäßig aus den vorhergehenden entwickeln, so erkennt man, daß die notwendigen und hinreichenden Bedingungen für eine rationelle Lösung des Prognoseproblems der Meteorologie die folgenden sind: 1. Man muß mit hinreichender Genauigkeit den Zustand der Atmosphäre zu einer gewissen Zeit kennen. 2. Man muß mit hinreichender Genauigkeit die Gesetze kennen, nach denen sich der eine atmosphärische Zustand aus dem anderen entwickelt.«[29] Oder in den Worten von Henri Poincaré: »Wir [Mathematiker] sind daran gewöhnt zu extrapolieren; das ist ein Mittel, die Zukunft aus der Vergangenheit und aus der Gegenwart abzuleiten.«[30]

Mit den Simulationsmodellen eröffnet sich ab den 1960er Jahren – und verstärkt ab den 1990er Jahren – eine epistemische Kultur des Prospektiven, die seit der antiken Prophetie ihresgleichen sucht.[31] Doch das Prospektive muss nicht immer als ›Voraussicht‹ oder Prospektion zur rationalen Erkundung von Zukünften verstanden werden.[32] Es gibt noch eine weitere Interpretation des Prospektiven als ›Aussicht‹ im Sinne von ›der Möglichkeit nach‹, also der Alteration. Prospektion wie Alteration sind die ontologisch differenten Einsatzbereiche der Simulation, wobei die Alteration die Lebenswelt mit immer neuen, zuvor nie dagewesenen Entitäten anreichert: neuen Molekülen, neuen Materialien und sogar neuen Mikroorganismen. Zwar lassen sich diese neuen Entitäten auch rein experimentell in den Laboren synthetisieren, doch die Simulation wird der Synthese im Labor immer häufiger vorangestellt. Der Grund ist einfach: Komplexe Moleküle wie beispielsweise das Molekül des Hochtemperatursupraleiters YBa2Cu3O7-x würden selbst unter einschränkenden Vorgaben den experimentellen Durchlauf von 1012 präparativen Ansätzen

26 John Backus: »Programming in America in the 1950s. Some Personal Impressions«, in: N. Metropolis/J. Howlett/Gian-Carlo Rotta (Hg.): *A History of Computing in the Twentieth Century*, New York 1980, S. 125–136, hier S. 131. Die Automatisierung und Mechanisierung der Programmierung hatte mit Compilern – Programmen, die die Instruktionsbefehle in Maschinencodes übersetzen – Mitte der 1950er Jahre begonnen. So entwickelten Halcomb Laning und Neal Zierler 1954 am Massachusetts Institute for Technology den ersten algebraischen Compiler für WHIRLWIND.

27 Vannevar Bush: »Instrumental Analysis«, in: *Bulletin of the American Mathematical Society* 42 (1936), S. 649–669, hier S. 652. Vannevar Bush hatte am MIT Boston zwischen 1928 und 1932 einen der größten Analogcomputer, den Differential Analyzer, zur Berechnung einfacher Differentialgleichungen gebaut.

28 Sybille Krämer: *Symbolische Maschinen. Die Geschichte der Formalisierung in historischem Abriß*, Darmstadt 1988; Gabriele Gramelsberger: »Intertextualität und Projektionspotenzial von Klimamodellen«, in: Daniel Weidner/Stefan Willer (Hg.): *Prophetie und Prognostik: Verfügungen über Zukunft in Wissenschaften, Religionen und Künsten*, Stuttgart 2013, S. 209–225.

29 Bjerknes: »Das Problem der Wettervorhersage« (Anm. 16), hier S. 1.

30 Henri Poincaré: *Wissenschaft und Methode* (1908), Leipzig 1914, S. 17.

31 Weidner/Willer (Hg.): *Prophetie und Prognostik* (Anm. 28).

32 Diese Art des Prospektiven – Prognose, Projektion, Prospektion, Prädiktion oder Vorhersage genannt – ist mathematisch gesehen eine numerische Extrapolation des Zustandes eines Systems in der Zeit. Ob die Extrapolation dabei in die Zukunft oder Vergangenheit führt, ist mathematisch gesehen (nahezu) unerheblich. Paleoklima wäre ein Beispiel für letzteres, auch Retrospektion, Hindcast, Backtesting oder eben Rückschau in der wissenschaftlichen Literatur genannt.

im Labor erfordern.[33] Unter heutigen Bedingungen automatisierter Hochdurchsatzverfahren mit etwa 105 Proben pro Tag würde dies immer noch weit über 27.000 Jahre experimentelle Forschung erfordern. »Dies erklärt zwanglos, dass [rein empirisch] neu entdeckte Verbindungen und unkonventionelle Strukturen häufig als ›zufällig‹ oder ›überraschend‹ wahrgenommen werden, was ja nichts anderes bedeutet, als dass man sie (noch) nicht schlüssig in einen [theoretischen Vorhersage-] Kontext einordnen kann.«[34] Vor diesem Hintergrund und angesichts des Umstandes, dass Simulationsmodelle die einzigen Modelle sind, die nicht nur Zeitlichkeit beschreiben, sondern in der Zeit ausgeführt werden,[35] ist dafür zu plädieren, ›Simulationsmodelle‹ als eigenständige Modellklasse zu berücksichtigen, statt sie, wie in der wissenschaftsphilosophischen Literatur üblich, unter mathematische Modelle zu subsummieren.[36] Simulationsmodelle sind mehr als die zugrundeliegenden mathematischen Modelle, da erst die Konkretisierung und Performanz der Simulation die inhärenten ontologischen Möglichkeiten entfaltet. Nur deshalb ist die epistemische Kultur des Prospektiven denkbar, ob als Prospektion oder Alteration. Beide Ausprägungen gehen dabei über unsere originären Wahrnehmungsmöglichkeiten hinaus. Simulationsmodelle eröffnen als operative Schriften daher nicht nur Einblicke in neue Welten, sondern sie schreiben sie über entsprechende computergesteuerte Technologien wie CNC-Maschinen oder 3D-Drucker – im wortwörtlichen Sinne – in die Welt ein.

33 Das Beispiel des Hochtemperaturleiters ist dem Artikel von Martin Jansen entnommen. Martin Jansen: »Ein Konzept zur Syntheseplanung in der Festkörperchemie«, in: *Angewandte Chemie* 114 (2002), S. 3896–3917, hier S. 3912. »Sich ausschließlich auf die Anwendung von Hochdurchsatz-Methoden zu verlassen, ist offensichtlich nicht der effizienteste Ansatz für die Exploration stofflicher Systeme. Der jeweils abzuarbeitende Parameterraum muss sinnvoll eingeschränkt werden. Dies kann auf der Basis von Intuition und Erfahrung erfolgen oder mit Hilfe theoretischer Methoden vorgenommen werden.« Ebd., S. 3912.

34 Ebd.

35 »I maintain that the most significant feature of a simulation is that it allows scientists to imitate one process by another process […] carried out by a computer.« Stephan Hartmann: »The World as a Process«, in: Rainer Hegselmann/Ulrich Müller/Klaus Troitzsch (Hg.): *Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View*, Dordrecht 1996, S. 77–100, hier S. 77.

36 Stanford Encyclopedia of Philosophy: *Models in Science*, Februar 2006, URL: http://plato.stanford.edu/ entries/models-science/.