



Rechenwelten. Computersimulationen machen komplexe Systeme greifbar
Mathematical worlds. Computer Simulations allow to comprehend complex systems

Authors: Manuela Lenzen
Submitted: 20. July 2016
Published: 20. July 2016
Volume: 3
Issue: 4
Keywords: in silico experiments, simulation studies, Fermi-Pasta-Ulam-Experiment, epidemiology, 3rd column of research, weather forecast, philosophy of science, digital humanities
DOI: 10.17160/josha.3.4.211

JOSHA

josha.org

**Journal of Science,
Humanities and Arts**

JOSHA is a service that helps scholars, researchers, and students discover, use, and build upon a wide range of content

Rechenwelten

Computersimulationen machen komplexe Systeme greifbar

Der Meteorologe Lewis Fry Richardson war Krankenwagenfahrer im Ersten Weltkrieg, als er endlich Zeit fand, sein Manuskript über die numerische Wettervorhersage um ein praktisches Beispiel zu ergänzen. Sechs Wochen lang rechnete er, um rückblickend das Wetter für den 20. Mai 1910 „vorauszusagen“. Leider lag sein Ergebnis weit neben den tatsächlichen Werten, sein 1922 erschienenes Buch blieb jahrzehntelang vergessen. Erst nach der Entwicklung der Digitalcomputer wurde es ein Klassiker, denn Richardson hatte zum ersten Mal gezeigt, was die Computer nun bestätigten: dass die Entwicklung des Wetters im Prinzip berechenbar ist, jedenfalls näherungsweise. Denn „numerische Wettervorhersage“ bedeutet, die komplexen Gleichungen, die das Wettergeschehen beschreiben, durch Ausprobieren mit unterschiedlichen Werten anzugehen. Viele Näherungsrechnungen statt eines unberechenbaren Kontinuums: das ist die Grundidee der Simulationsmethode.

Da für Richardson das Wort „Computer“ noch für einen rechnenden Menschen stand, dachte er an regelrechte Rechenfabriken, in denen zehntausende menschliche Rechner massenhaft einfache Aufgaben lösen sollten. Ähnliches gab es beim Militär tatsächlich nur zur Berechnung ballistischer Tafeln. Erst mit der Entwicklung leistungsfähiger Rechenmaschinen ließ sich Richardsons Idee realisieren: die Simulation komplexer Systeme durch Computer. Mit ihrer Hilfe kann man heute das Verhalten von Molekülen ebenso untersuchen wie die Dynamik von Fußgängerströmen, die Ausbreitung von Krankheiten und die Bewegungen von Himmelskörpern.

Die Vorteile der Simulationsstudien liegen auf der Hand: in Simulationen lässt sich fassen, was anders wegen zu großer Komplexität nicht zu fassen wäre. Simulationen sind kostengünstiger und weniger zeitaufwendig als realweltliche Experimente. Und in Simulationen lassen sich Dinge testen, die in der Realität nicht zu verantworten wären, wie etwa die Folgen von Kernfusionen.

Als erste Computersimulation gilt das Fermi-Pasta-Ulam-Experiment, bei dem 1953 das Verhalten einer schwingenden Saite auf dem Supercomputer MANIAC-1 simuliert wurde. Ihm lag die von den Computer-Pionieren John von Neumann und Stanislaw Ulam begründete Monte-Carlo-Methode zugrunde, die Werte aus einem

vorgegebenen Bereich zufällig für die Berechnungen auswählt. Andere frühe Simulationen galten den Luftströmungen der Erde und der Kernfusion. Mit zunehmender Rechenleistung ließen sich immer komplexere Systeme simulieren und schnell wurden Simulationen nicht nur zur Analyse bestehender, sondern zur Voraussage des Verhaltens veränderter Systeme verwendet, etwa neuer Modelle oder Materialien in der Luftfahrt und der Autoindustrie.

„Methodisch ist das gar nicht so neu, das Prinzip kannte schon Kepler, aber der quantitative Fortschritt ist gigantisch, was die Rechner heute können, das ist jenseits des Begreifbaren“, sagt der Physiker und Informatiker Thomas Lippert, Direktor des Supercomputing Centres am Forschungszentrum Jülich. Der schnellste Rechner seines Zentrums schafft 5,9 Petaflop/s, das sind 5,9 Billionen Rechenoperationen pro Sekunde. Damit ist er einer der schnellsten Rechner in Europa. Die Jülicher Forscher verfolgen eigene Projekte, etwa zur Plasmaphysik, und sind auch am Human Brain Project beteiligt, bei dem Vorgänge im Gehirn im Computer nachgebildet werden sollen. Zudem können auswärtige Wissenschaftler sich um Rechenzeit für ihre eigenen Fragestellungen bewerben.

Damit ein Problem mithilfe der Simulation angegangen werden kann, muss es zuerst eine passende mathematische Form finden. „Simulation ist ein Verfahren, um mit Komplexität fertig zu werden“, erklärt Lippert: „Zuerst gibt es eine Theorie und wenn man sie anwenden will, muss man ein mathematisches Modell bauen und dieses Modell dann mit mathematischen Verfahren auswerten, das ist das, was wir hier tun.“ Das Prinzip ist dasselbe, das Lewis Fry Richardson anwandte: die Gleichungen des mathematischen Modells werden wieder und wieder mit unterschiedlichen Werten durchgerechnet. „Die Iteration ist das Entscheidende, Simulationen werden eigentlich nie fertig, sie nähern sich der Wahrheit allenfalls an“, so Lippert.

Für die Wissenschaftstheorie ist die Computersimulation nicht ganz leicht zu fassen. Bisweilen wird sie als dritte Säule der Wissenschaft bezeichnet, neben den beiden Säulen Experiment und Theorie. Doch nicht alle sind mit dieser Klassifikation einverstanden. „Der Charme der These von den zwei Säulen besteht darin, dass Theorie und Experiment recht unabhängige Zugänge sind. Die Simulation ist kein unabhängiger dritter Zugang, sie kombiniert Theorie und Experiment auf besondere Weise“, sagt Johannes Lenhard, Wissenschaftstheoretiker an der Universität Bielefeld. Das mathematische Modell des zu simulierenden Phänomens ist seine

theoretische Seite. Doch dieses Modell ist nur ein Anfang, ein plausibler Entwurf, dessen Ergebnisse dann mit Beobachtungsdaten abglichen werden. Passen die Ergebnisse der Simulation nicht mit den Daten überein, wird das Modell ein wenig angepasst und die Simulation beginnt von neuem. „Ohne die Theorie hätte man gar nichts, das man anpassen könnte, aber die Theorie lässt immer genug offen, was man experimentell abgleichen muss“, so Lenhard. Erst wenn zum Beispiel eine Wettersimulation das Wetter der gestern auf der Basis des Wetters von vorgestern rekonstruieren kann, kann man von ihr zuverlässige Prognosen erwarten.

In der Praxis bedeutet das vor allem, die Ergebnisse der Simulationen stets kritisch im Blick zu haben: Ist das Problem so gefasst, dass die Simulation möglichst verlässlich laufen kann? Verrennt sich die Simulation in eine falsche Richtung? Gilt das Ergebnis nur für bestimmte Fälle oder ist es allgemeingültig? „Das ist ein Riesenaufwand“, erklärt Lippert, „und entsprechend personalintensiv: zehn bis zwölf Personen betreuen eine Simulation.“

In diesem Prozess des immer wieder neu Anpassens und Korrigierens, verbunden mit der stets wachsenden Leistungsfähigkeit der Computer, werden die Simulationen immer zuverlässiger: „Vor 15 Jahren konnte man das Wetter vielleicht für zwei Tage voraussagen, jetzt können wir sechs Tage im Voraus angeben, wo in etwa ein Hurrikane in den USA entlangziehen wird“, so Lippert. Die Simulationen werden so aber auch immer komplexer und unübersichtlicher. Hunderttausende Zeilen Programmcode repräsentieren die unterschiedlichen Elemente des zu simulierenden Systems: beim Wetter etwa Bodenfeuchtigkeit, Meeresströmungen, Wolkenbildung und vieles mehr. Und auch die Ergebnisse sind so komplex, dass sie visuell aufbereitet werden müssen, etwa als Diagramme oder in Form anderer bildhafter Darstellungen, um interpretierbar zu sein.

Damit liefern sie Handlungswissen, aber keine klassischen Kausalerklärungen, konstatiert Lenhard. Statt das Wesen der Dinge durch Abstraktion transparent und verstehbar zu machen, wie das den klassischen mathematischen Modellierungen zugeschrieben wird, blieben Simulationen undurchsichtig – und rückten die Naturwissenschaften damit in Richtung Ingenieurwissenschaften. Lippert hält dagegen: „Jeder kleine Schritt, der in einem solchen riesigen Programm stattfindet, ist unzählige Male nachvollzogen und verglichen worden: mit anderen Programmen und mit Beobachtungen.“ Im Prinzip ist also jeder Schritt, den das Programm tut, nachvollziehbar, egal, ob es um

Elementarteilchenphysik, Strömungsmechanik, Klimawissenschaft oder Hirnforschung geht. Im Prinzip. Tatsächlich ist der Mensch bei einer Rechenleistung der Computer von Milliarden Rechenoperation in der Sekunde hoffnungslos abgehängt. Und was nicht in angemessener Zeit verstanden werden kann, kann gar nicht verstanden werden, konstatierte der Mathematiker und Informatik-Pionier Norbert Wiener schon Anfang der 1960er Jahre.

„Wenn ein Forscher sagt, er verstehe die Dynamik des Golfstroms durch die Simulation besser, stützt er sich dabei auf die Rechenleistung des Computers im Hintergrund, doch es sind nicht die mathematischen Zusammenhänge, die das Verstehen liefern. Ein solcher Forscher „beobachtet“ das Modellverhalten und „versteht“ dann, dass es kritische Punkte geben kann, an denen der Golfstrom zusammenbricht“, konstatiert Lenhard. Seiner Ansicht nach entsteht deshalb mit der Simulation im Vergleich zur mathematischen Modellierung ein neuer Begriff von wissenschaftlichem Verstehen: „Wir befinden uns mitten in einer Umwälzung und wir müssen uns erst einen Begriff davon machen, was eine gute Modellierung ist.“ Dabei könne sich auch unser Begriff davon, was eine zufriedenstellende Erklärung ist, verändern. Es wäre nicht das erste Mal: Isaac Newton war sehr unzufrieden damit, nicht angeben zu können, wie die von ihm postulierte Gravitationskraft funktioniert. Heute gilt sein mathematisches Verfahren als Musterbeispiel einer wissenschaftlichen Erklärung, und niemand stellt den Wert seiner Berechnungen infrage, nur weil er diesen Punkt offen lassen musste. „Vielleicht“, vermutet Lenhard, „werden wir bald gar nicht mehr spüren, dass uns etwas fehlt, wenn wir eine Simulation nicht im Einzelnen verstehen.“ Zumal die Computersimulation inzwischen ein so komplexes Feld ist, dass erste Zentren für Simulationswissenschaft oder Systemwissenschaft entstehen. Damit ist die Simulation dabei eine Methode zu werden wie etwa die Statistik: man kann sie anwenden (lassen), ohne sie im Detail zu verstehen.

Manchmal lässt die Simulation Wissenschaftsphilosophen auch die ganz großen Fragen stellen: Könnte es sein, dass eine Simulation verlässliche Ergebnisse liefert und doch ganz anders funktioniert als die Wirklichkeit? „Das ist so eine Grundsatzfrage wie: Können wir wissen, ob wir die Welt wahrnehmen, wie sie ist, oder nur so, wie sie uns erscheint?“, sagt Lenhard. Wirklich beantworten lässt sie sich nicht. In der Tat könnte ein Modell, das in Teilen falsch ist, dennoch in einem engen Bereich gute Ergebnisse und zutreffende Voraussagen liefern. Seine

Schwächen zeigen sich vielleicht erst, wenn es auf einem benachbarten Feld ausprobiert wird. „Simulationen sind vertrauenswürdig, wenn sie sich im Umfeld von Problemen bewegen, bei denen sie sich bewährt haben und über die es empirische Daten gibt“, so Lenhard. „Bei fremden Problemfeldern wäre ich sehr vorsichtig.“

Auf Superrechnern wie in Jülich werden die ganz großen Modelle simuliert: Modelle der Strömungsdynamik, Klimamodelle, Schaltkreise des Gehirns. Und manchmal steckt die Komplexität an unerwarteten Stellen: „Schon um zu verstehen, warum Sie eine verstopfte Nase haben, benötigen sie einen Hochleistungsrechner, das ist unglaublich kompliziert“, erklärt Lippert. Doch nicht für alle Simulationsstudien benötigt man Großrechner. „Interessante konzeptuelle Weiterentwicklungen werden oft auf kleineren Rechnern gemacht, wo man einfach rumprobieren kann, ohne jemanden fragen zu müssen“, sagt Lenhard.

Und nicht nur die Naturwissenschaften interessieren sich für die Simulation: Am Lehrstuhl für Digital Humanities der Universität Passau ist gerade ein neues Forschungsprojekt gestartet, das die Möglichkeiten der digitalen Modellierung für die Geisteswissenschaften ausloten will.

Die Komplexität der Simulationen nimmt derweil stetig weiter zu: Um die Frage zu beantworten, ob das Universum sich seit dem Urknall immer schneller immer ausdehnt, mussten sich die Forscher lange mit stark vereinfachten Modellen zufrieden geben: sie ignorierten notgedrungen, dass die Materie im Universum nicht gleichmäßig verteilt ist und verwandten ein vereinfachtes Gravitationsmodell. Die Rechenleistung der Computer gab nicht mehr her. Jetzt berichten Forscher erstmals von Simulationen, die mit Relativität und ungleich verteilter Materie umgehen können. Die Frage nach dem Ursprung des Universum können sie damit immer noch nicht beantworten, aber sie sind ihm wieder ein Stückchen näher gerückt. Und richtig fertig werden Simulation eben nie.

Johannes Lenhard: Mit allem rechnen – zur Philosophie der Computersimulation.
Berlin/Boston 2015

Bruce Edmonds, Ruth Meyer (eds): Simulation Social Complexity. A Handbook.
Heidelberg, New York 2013

Jacopo De Tullio (2016): The Fermi-Pasta-Ulam model: the birth of numerical simulation. *Lettera Matematica*, März 2016, Volume 4, Issue 1, pp 41-48

Isaak M. Held (2005): *The Gap between Simulation and Understanding in Climate Modelling*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 68, p. 1609-1614

Paul Humpherys (2009): *The Philosophical Novelty of Computer Simulation Methods*. *Synthese*, Vol. 169, Issue 3, p. 615-626

Bentivegna, Eloisa and Bruni, Marco (2016): *Effects of Nonlinear Inhomogeneity on the Cosmic Expansion with Numerical Relativity*, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, issue 25, June 2016, doi/10.1103/PhysRevLett.116.251302

Mertens, James B. and Giblin, John T. and Starkman, Glenn (2016): *Integration of inhomogeneous cosmological spacetimes in the BSSN formalism*, *Phys. Rev. D*, Vol. 93, Issue 12, June 2016, doi/10.1103/PhysRevD.93.124059

Manuela Lenzen studierte Philosophie, Geschichte, Soziologie und Ethnologie in Bochum und Bielefeld. Sie promovierte 2002 in Philosophie an der Universität Bielefeld mit einer Arbeit zur philosophischen Psychologie und ist seit 2005 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Zentrum für interdisziplinäre Forschung der Universität Bielefeld. Zudem ist Dr. Manuela Lenzen als freie Wissenschaftsjournalistin mit den Schwerpunkten Philosophie und Kognitionswissenschaften tätig.