

# Simulation

• 1 Zum Begriff • 2 Zur Begriffs- und Problemgeschichte • 3 Philosophische und wissenschaftliche Problemfelder • 3.1 Wichtige Beispiele • 3.1.1 Monte- Carlo- Simulation • 3.1.2 Dynamische Systeme: Das Doppelpendel • 3.1.3 Das Spiel des Lebens von Conway • 3.2 Funktionen von Simulationen • 3.2.1 Berechnung der Implikationen von Theorien • 3.2.2 Theorieanwendung und -entwicklung • 3.2.3 Hypothesenbestätigung • 3.2.4 Theoriefreie Modellierung empirischer Phänomene • 3.3 Die Epistemologie der Simulation • 3.3.1 Verifizierung • 3.3.2 Validierung • 3.3.3 Bestätigung • 4 Ausblick • Bibliografie

## 1 Zum Begriff

2457bu Während noch bis in die 1950er Jahre ›Täuschung‹ und ›Heuchelei‹ mit dem Begriff der Simulation (S.) (von lat. *simulatio*) verbunden war<sup>[1]</sup>, bezeichnet man damit heute eine Reihe neuartiger Techniken und Methoden, die in vielen Bereichen der Wissenschaft, Ausbildung und Wirtschaft zu unterschiedlichen Verwendungszwecken eingesetzt werden. Generelles Ziel der S. ist die akkurate ↑Repräsentation bestimmter Eigenschaften und Verhaltensweisen eines mathematischen, physikalischen oder sozialen Systems. S.en werden in einer Vielzahl von Zusammenhängen eingesetzt: zur |

2458 wissenschaftlichen Erforschung natürlicher und gesellschaftlicher ↑Systeme; zu Ausbildungs- und Trainingszwecken; zur Leistungs-, Funktions- und Sicherheitsoptimierung; zur Berechnung der Eigenschaften mathematischer Körper; zur Vorhersage der Konsequenzen alternativer Szenarien; zur Unterhaltung. Ebenso zahlreich sind die Arten der Systeme, auf denen S. ausgeführt werden: menschliche Gehirne; mechanische, elektrische/elektronische und andere physikalische ↑Modelle; digitale Computer. Aufgrund ihrer Bedeutung für die Philosophie und die ↑Wissenschaftstheorie wird sich dieser Eintrag ausschließlich mit der Nutzung digitaler Computer zur S. realer Systeme zu wissenschaftlichen Zwecken befassen.

In der wissenschaftlichen und philosophischen Diskussion zur Computer-S. haben sich v.a. zwei Definitionsansätze durchgesetzt: (i) Bei einer Computer-S. handelt es sich um die Nutzung eines Computers zur Lösung einer Gleichung, die analytisch (noch) nicht lösbar ist.<sup>[2]</sup> (ii) Bei einer Computer-S. handelt es sich um einen Computerprozess, der relevante Aspekte eines anderen ↑Prozesses imitiert.<sup>[3]</sup>

Ein Vorteil von Definition (i) ist, dass sie denjenigen S.begriff beschreibt, der für den Ursprung der Computer-S.en relevant ist. Ein wichtiger Impuls, die ↑Methode der Computer-S. zu entwickeln, rührte daher, dass im Zusammenhang mit der Entwicklung thermonuklearer Waffen Methoden gesucht wurden, die mathematische Unlösbarkeit von Gleichungen zur Beschreibung bestimmter nichtlinearer Phänomene zu umgehen (s. u. 3.1.1).<sup>[4]</sup> Heutzutage ist der S.begriff allerdings weiter und umfasst u.a. auch sog. zelluläre Automaten und agentbasierte Modelle, bei denen die Lösung von Gleichungen entweder gar keine oder nur eine sehr untergeordnete Rolle spielt (s. u. 3.1.3). Definition (ii) erscheint daher zeitgemäßer. R. I. G. Hughes verwendet aus diesem Grund den Ausdruck ›Computertechniken zur Durchführung von Berechnungen‹ für die erste und reserviert ›Computer-S.‹ für letztere Bedeutung.<sup>[5]</sup> Allerdings bezieht sich diese ausschließlich auf dynamische Modelle und S. werden häufig auch dafür eingesetzt, statische Phänomene – u.a. Eigenschaften mathematischer Körper – zu beschreiben. Da ein Großteil der in der wissenschaftlichen Praxis anzutreffenden S.n beiden Begriffen entsprechen, werden sie im folgenden nicht weiter unterschieden.

## 2 Zur Begriffs- und Problemgeschichte

Da S.en in der Wissenschaftsgeschichte erst seit den 1950er Jahren eine bedeutende Rolle spielen, ist die philosophische Diskussion dieses Themas verhältnismäßig jung. Obwohl sich bereits vereinzelte Beiträ|ge

2458b in den 1960er und 1970er Jahren finden lassen<sup>[6]</sup>, beginnt die eigentliche Auseinandersetzung erst in den 1990ern. In diesen frühen Beiträgen wird häufig die methodologische, aber auch die epistemologische Neuheit von S.methoden behauptet.<sup>[7]</sup> Spätere Arbeiten stellen S.en in den Zusammenhang mit anderen wissenschaftlichen Methoden wie z.B. der Modellierung und dem ↑Experiment.<sup>[8]</sup>

## 3 Philosophische und wissenschaftliche Problemfelder

### 3.1 Wichtige Beispiele

#### 3.1.1 Monte-Carlo-Simulation

Mit ›Monte-Carlo-S.« bezeichnet man eine Klasse von ↑Algorithmen, die ihre Ergebnisse mit Hilfe von Zufallszahlen errechnen. Hierbei wird zunächst eine Domäne möglicher Eingaben bestimmt und eine Reihe von Zufallszahlen aus dieser Domäne generiert, dann eine deterministische Berechnung mit den Zufallszahlen durchgeführt und zum Schluss werden die einzelnen Ergebnisse zu einem Gesamtergebnis zusammengeführt. Obwohl sich Enrico Fermi bereits in den 1930ern dieser Methoden bediente, um Eigenschaften des Neutrons zu berechnen, stieg ihre Bedeutung erst nach der Entwicklung digitaler Computer in den 1940ern sprunghaft an. So spielten sie eine wichtige Rolle in der Entwicklung der Wasserstoffbombe.<sup>[9]</sup> Der Name bezieht sich auf das Spielkasino in Monaco und will auf die beiden Prozessen zugrunde liegende Zufälligkeit (↑Zufall) hinweisen. Monte-Carlo-S.en werden in vielen Wissenschaften eingesetzt, u.a. in der Physik (Computerphysik, physikalische Chemie, statistische Physik und in der Teilchenphysik), der Mathematik, der Informatik, der Geologie und der Ökonometrie.

### 3.1.2 Dynamische Systeme: Das Doppelpendel

Das Doppelpendel ist ein zweidimensionales dynamisches System.<sup>[10]</sup> Es wird gebildet, indem an den Arm eines einfachen Pendels ein weiteres angehängt wird. Wird der Winkel  $\alpha$  zwischen beiden Armen konstant gehalten, erhält man ein einfaches Pendel, welches mit herkömmlichen analytischen Methoden beschrieben werden kann. Lässt man  $\alpha$  hingegen frei variieren, werden die Bewegungsgleichungen nichtintegrierbar und müssen numerisch gelöst werden. Da sein Bewegungsmuster sehr empfindlich auf Änderungen in den Anfangsbedingungen reagiert, ist das Doppelpendel ein beliebtes Modell zur Demonstration chaotischer Prozesse.

### 3.1.3 Das Spiel des Lebens von Conway

Das Spiel des Lebens von Conway ist das bedeutendste Beispiel eines zellulären Automaten. Ein zellulärer

2459 Automat besteht aus einer Anzahl identischer Zellen, die in einem Gitter angeordnet sind. Jede Zelle kann eine begrenzte Anzahl von Zuständen haben, die ausschließlich vom vorherigen Zustand der Zelle selbst und dem derjenigen Zellen, die direkt an sie angrenzen, abhängen. Die Zustandsübergänge werden durch vorherbestimmte Regeln gegeben. Das Spiel des Lebens hat eine unendliche Anzahl von Zellen, die in zwei Dimensionen angeordnet sind, zwei Zustände (lebendig und tot) und vier Regeln (z.B. können Zellen nur dann überleben, wenn genau zwei oder drei Nachbarzellen am Leben sind). Wegen der Komplexität der Muster, die von beliebigen Anfangskonfigurationen mithilfe der sehr einfachen Regel entstehen können, hat das Spiel des Lebens das Interesse von Physikern, Mathematikern, Biologen, Ökonomen und Philosophen auf sich gezogen. So hat Daniel Dennett das Spiel benutzt um die Möglichkeit der Evolution komplexer Phänomene wie des ↑Bewusstseins und des freien ↑Willens aus einfachen physikalischen Gesetzen plausibel zu machen.<sup>[11]</sup> Zelluläre Automaten sind nahe verwandt mit den Modellen der ↑Spieltheorie sowie agentbasierten Modellen.

## 3.2 Funktionen von Simulationen

### 3.2.1 Berechnung der Implikationen von Theorien

Im einfachsten Fall hat eine ↑Theorie selbst ausreichend Ressourcen, um aus ihr eine Differenzialgleichung zu deduzieren, die ein dynamisches physikalisches System beschreibt. Wenn solche Differenzialgleichungen zu komplex sind, als dass sie mit analytischen Methoden gelöst werden können, setzt man S.en ein, um Lösungen numerisch anzunähern. S.en sind ein daher ein wichtiges Werkzeug zur Erforschung nichtlinearer Systeme, wie sie z.B. durch die ↑Chaostheorie beschrieben werden.

### 3.2.2 Theorieanwendung und -entwicklung

In vielen Fällen lassen sich die Differenzialgleichungen, die konkrete komplexe Systeme wie z.B. einen schweren Sturm, einen Gasstrahl oder ein turbulentes Beckenabfluss beschreiben, nicht allein aus der Theorie ableiten. In solchen Fällen muss ein S.modell mit Hilfe von Spezifizierungen, Diskretisierungen, Annäherungen, ↑Idealisierungen, Parametrisierungen, Vereinfachungen und weiteren ad-hoc-Annahmen, die nicht alle auf Theoriebasis gerechtfertigt werden können, erstellt werden. Hierdurch können sich epistemische Probleme ergeben, die sich von denen gewöhnlicher Theoriebestätigung unterscheiden.<sup>[12]</sup>

2459b

### 3.2.3 Hypothesenbestätigung

S.en werden häufig dort eingesetzt, wo experimentelle oder Beobachtungsdaten aus ethischen, technologischen oder anderen praktischen Gründen unzureichend sind, wie z.B. in der Klima- und Umweltforschung, der Makroökonomik, der Evolutionsbiologie und der Geologie. Ist dies

der Fall, können S.ergebnisse die Rolle empirischer Daten spielen, die zur Bestätigung und Widerlegung wissenschaftlicher ↑Hypothesen gebraucht werden. Innerhalb der wissenschaftstheoretischen Diskussion ist umstritten, ob sich S.en epistemisch eher wie ↑Gedankenexperimente oder wie reale Experimente verhalten.<sup>[13]</sup>

### 3.2.4 Theoriefreie Modellierung empirischer Phänomene

In den komplexen Wissenschaften wie z.B. einigen ↑Sozialwissenschaften und der Ökologie gibt es nur wenige gut bestätigte Theorien, auf die der Simulator zurückgreifen kann. In diesen Bereichen kommen häufig zelluläre Automaten sowie agent- und individuenbasierte Modelle zum Einsatz, da diese S.arten komplexe Muster von Makrophänomenen aus einfachen Verhaltensregeln von Zellen oder Agenten erzeugen können. S.en werden dann ähnlich wie die theoretischen Modelle der neoklassischen Ökonomik (↑Philosophie und Ökonomik) zum Verstehen und Erklären der Makroregelmäßigkeiten verwendet.<sup>[14]</sup>

### 3.3 Die Epistemologie der Simulation

In der methodologischen Diskussion haben sich die Begriffe Verifizierung, Validierung und Bestätigung zur Beschreibung der ↑Rechtfertigung von S.ergebnissen durchgesetzt.

#### 3.3.1 Verifizierung

Bei der Verifizierung (↑Verifikation) handelt es sich um die Überprüfung der Übereinstimmung des S.ergebnisses mit dem (z.B. aufgrund einer wiss. Theorie) erwarteten Wert. Manchmal kann dies direkt geschehen, wenn mathematische Methoden weiterentwickelt und eine Gleichung später analytisch gelöst werden kann. In der Regel müssen jedoch andere Techniken angewandt werden wie z.B.:

Kalibrierung – S.ergebnisse werden an einigen Stellen mit bekannten Größen in Einklang gebracht.

Annäherung – manchmal sind analytische Verfahren bekannt, die ein exaktes Ergebnis annähern (z.B. die numerische Quadratur).

Überprüfung des Programmcodes – zur Beseitigung von Programmierfehlern.

2460 Visuelle Tests – zum frühen Erkennen unerwarteter S.eigenschaften.

Punktüberprüfungen – durch Berechnungen mit der Hand.

Robustheitstests – z.B. durch multiple Implementierungen.

#### 3.3.2 Validierung

Im Ggs. zur Verifizierung bezeichnet die Validierung die Überprüfung der Übereinstimmung der S. mit dem modellierten System. Auch hier ist der einfachste Fall, in dem S.ergebnisse direkt mit am Zielsystem gemessenen Daten verglichen werden können, selten anzutreffen. Ist dies unmöglich, kommen u.a. folgende Techniken zum Einsatz<sup>[15]</sup>:

Überprüfung von Submodellen – liefern alle Submodelle vernünftige Ergebnisse?

Vergleich von Verhaltensmustern – können die alternativ implementierten Hypothesen alle beobachteten Verhaltensmuster der Makrodaten replizieren?

Sensitivitätsanalysen – sind S.ergebnisse von bestimmten Parameterwerten abhängig?

Unabhängige Vorhersagen – macht die S. Vorhersagen von Phänomenen, die bei der Modellerarbeitung nicht berücksichtigt wurden und treffen diese zu?

#### 3.3.3 Bestätigung

Von der ›Bestätigung‹ spricht man schließlich, wenn die der S. zugrunde liegende theoretische Hypothese empirisch getestet werden kann und den Test besteht. Dies ist der Fall, wenn S.ergebnisse sowohl verifiziert als auch validiert werden können. Bestätigung spielt nur bei denjenigen S. eine Rolle, die auf der Basis von Theorien erstellt wurden.

## 4 Ausblick

Computer-S.en stellen heutzutage in vielen Wissenschaften wie z.B. der Physik, der Klimaforschung, der Biologie, der Ökologie, der Epidemiologie und der Mathematik ein wichtiges Instrument für epistemische, heuristische und praktische Zwecke dar. In den Sozialwissenschaften hingegen führen sie noch immer ein Schattendasein (bzgl. des Anteils aller Publikationen, in denen neue S.ergebnisse beschrieben werden).<sup>[16]</sup> Lehtinen und Kuorikoski behaupten, dass die Vernachlässigung von S.methoden in der Ökonomik daher rühre, dass Wissenschaftler bestimmte epistemische Anforderungen an ihre Modelle stellen, denen zwar algebraische und analytisch lösbare, nicht jedoch S.modelle gerecht werden.<sup>[17]</sup> Dennoch ist davon auszugehen, dass in Zukunft deutlich mehr S.en in der Ökonomik und anderen Sozialwissenschaften eingesetzt werden. Ein weiterer Erkenntnisbereich,

in dem S.en in Zukunft wahrscheinlich an Beliebtheit gewinnen werden, ist die ↑analytische Philosophie. Neben dem bereits beschriebenen Einsatz von S.modellen in der ↑Philosophie des Geistes durch Dennett und andere werden S.en heute vermehrt v.a. in der Ethik<sup>[18]</sup>, aber auch neuerdings in der Wissenschaftstheorie<sup>[19]</sup> gebraucht. Es ist davon auszugehen, dass sich dieser Trend fortsetzt.

Axelrod, R., 1997, *Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences*. In: Conte/Hegselmann/Terna 1997. – Conte, R./R. Hegselmann/P. Terna (eds.), 1997, *Simulating Social Phenomena*, Berlin. – Dennett, D., 1994, *Philosophie des menschlichen Bewusstseins*, Hamburg. – Dowling, D., 1999, *Experimenting on Theories*. In: *Science in Context*, 12. – Epstein, J./R. Axtell, 1996, *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*, Washington. – Frigg, R./J. Reiss, 2009, *The Philosophy of Simulation. Hot New Issues or Same Old Stew?* In: *Synthese*. – Galison, P., 1996, *Computer Simulation and the Trading Zone*. In: P. Galison/D. J. Stump (eds.), *The Disunity of Science. Boundaries, Contexts, and Power*, Stanford. – Gilbert, N./K. G. Troitzsch, 2005, *Simulation for the Social Scientist*, Maidenhead. – Grimm, V./S. Railsback, 2005, *Individual-Based Modeling and Ecology*, Princeton. – Gunderson, K., 1971, *Philosophy and Computer Simulation*. In: O. P. Wood/G. Pitcher (eds.), *Minds, Brains, and Science*, NY. – Hartmann, S., 1996, *The World as a Process: Simulation in the Natural and Social Sciences*. In: Hegselmann/Müller/Troitzsch 1996. – Hegselmann, R., 2009, *Moral Dynamics*. In: R. Meyers (ed.), *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, Heidelberg. – Hegselmann, R./U. Müller/K. G. Troitzsch (eds.), 1996, *Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View*, Dordrecht. – Hughes, R. I. G., 1999, *The Ising Model, Computer Simulation, and Universal Physics*. In: M. Morgan/M. Morrison (eds.), *Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science*, Cambridge. – Humphreys, P., 1991, *Computer Simulations*. In: A. Fine/M. Forbes/L. Wessels (eds.), *PSA 1990, Vol. 2*, East Lansing. – Humphreys, P., 2004, *Extending Ourselves. Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*, Oxford. – Keller, E. F., 2003, *Models, Simulation, and Computer Experiments*. In: H. Radder (ed.), *The Philosophy of Scientific Experimentation*, Pittsburgh. – Küppers, G./J. Lenhard/T. Shinn, 2006, *Computer Simulation: Practice, Epistemology, and Social Dynamics*. In: dies./eds.), *Simulation: Pragmatic Construction of Reality*, Dordrecht. – Lehtinen, A./J. Kuorikoski, 2007, *Computing the Perfect Model: Why do Economists Shun Simulation?* In: *Philos. of Science*, 74. – Oreskes, N./K. Shrader-Frechette/K. Belitz, 1994, *Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences*. In: *Science*, 263. – Pritzker, A. A. B., 1979, *Compilation of Definitions of Simulation*. In: *Simulation*, 33. – Pritzker, A. A. B., 1984, *Introduction to Simulation and SLAMII*, Hoboken. – Rohrlich, F., 1991, *Computer Simulation in the Physical Sciences*. In: A. A. Fine/M. Forbes/L. Wessels (eds.), *PSA 1990, Vol. 2*, East Lansing. – Roller, N., 1995, *Simulation*. In: *HWbPh*, Bd. 9. – Srivastava, N./C. Kaufman/G. Müller, 1990, *Hamiltonian Chaos*. In: *Computers in Physics*, 4. – Troitzsch, K. G., 1997, *Social Simulation – Origins, Prospects, Purposes*. In: Conte/Hegselmann/Terna 1997. – Weisberg, M./R. Muldoon, 2009, *Epistemic Landscapes and the Division of Cognitive Labor*. In: *Philos. of Science*, 76. – Winsberg, E., 1999, *Sanctioning Models. The Epistemology |*

of Simulation. In: *Science in Context*, 12. – Winsberg, E., 2001, *Simulations, Models, and Theories: Complex Physical Systems and Their Representation*. In: *Philos. of Science*, 68. – Winsberg, E., 2003, *Simulated Experiments. Methodology for a Virtual World*. In: *Philos. of Science*, 70. – Zeigler, B., 1976, *Theory of Modeling and Simulation*, NY.

[1] Vgl. Roller 1995. – [2] Vgl. Humphreys 1991; Pritzker 1979; Küppers et al. 2006; Winsberg 2001; Troitzsch 1997, § 1.1. – [3] Vgl. Hartmann 1996; Zeigler 1976; Pritzker 1984; Troitzsch 1997, § 1.2; Humphreys 2004. – [4] Vgl. Galison 1996; Keller 2003. – [5] Hughes 1999. – [6] Z.B. Gunderson 1971. – [7] Z.B. in Rohrlich 1991; Humphreys 1991. – [8] Z.B. Dowling 1999; Frigg und Reiss 2009. – [9] Galison 1996. – [10] Srivastava et al. 1990. – [11] Dennett 1994. – [12] Vgl. Winsberg 1999; 2003; Humphreys 2004. – [13] Vgl. Oreskes et al. 1994 u. Axelrod 1997 auf der einen Seite und Frigg und Reiss 2009 auf der anderen. – [14] Vgl. Conte et al. 1997; Gilbert/Troitzsch 2005; Grimm/Railsback 2005. – [15] Vgl. Grimm/Railsback 2005. – [16] Wichtige Ausnahmen: Hegselmann et al. 1996, Epstein und Axtell 1996. Conte et al. 1997; Gilbert/Troitzsch 2005. – [17] Lehtinen/Kuorikoski 2007. – [18] Übersichtsartikel: Hegselmann 2009. – [19] Weisberg und Muldoon 2009.