



Adobe Stock / monstij

PHILOSOPHIE

Was ist eine Computersimulation?

Wissenschaftsphilosophische Überlegungen zu einer wichtigen Methode der Physik

Claus Beisbart

Ob es um Quarks, Biomoleküle oder Supernovae geht – bei ihren Untersuchungen stützt sich die heutige Physik oft auf die Computersimulation. Anfängliches Unbehagen über die Methode oder der flauere Gag, damit werde wissenschaftliches Vorgehen bloß simuliert, sind längst passé. Doch welchen Beitrag leistet die Methode zur physikalischen Forschung und wie sind ihre Ergebnisse zu bewerten?

Fortschritt in der Physik lässt sich nicht bloß an neuen Ergebnissen und Erkenntnissen festmachen, denn sie entwickelt sich auch methodisch weiter. Eine der spannendsten Neuerungen in dieser Hinsicht ist die Computersimulation (kurz: Simulation), die sich seit Mitte des 20. Jahrhunderts in immer mehr Teildisziplinen der Physik etabliert hat. Die Physiker Kurt Binder und Dieter W. Heermann sprechen in diesem Zusammenhang sogar von einer Revolution und behaupten, dass die Computersimulation die traditionelle Einteilung in experimentelle und theoretische Physik obsolet macht ([1], S. 1). In jedem Fall wirft die neue Methode Fragen auf: Was tun wir eigentlich, wenn wir eine Computersimulation laufen lassen? Welchen Beitrag leistet sie zur physikalischen Forschung? In welchem Verhältnis steht die Computersimulation zu anderen Methoden der Physik? Und wie glaubwürdig sind Simulationen?

Fragen wie diese beziehen sich nicht mehr auf die Objekte physikalischer Forschung, sondern machen die Physik selbst zum Thema. Sie laden damit zu einer wissenschaftsphilosophischen Diskussion über physikalische Methoden ein. In der Tat wird die Diskussion über die Simulation in der Wissenschaftsphilosophie seit zwei Jahrzehnten intensiv geführt, z. B. [2, 3]. Dies wurde erforderlich, weil die Methode in den bisherigen Charakterisierungen des wissenschaftlichen Vorgehens etwa durch Karl Popper, Thomas Kuhn oder auch die Bayesianische Erkenntnistheorie nicht vorkommt – zumindest nicht explizit. Hier möchte ich Einsichten aus der wissenschaftsphilosophischen Diskussion verwenden, um die oben genannten Fragen zu beantworten. Dabei geht es teilweise auch um eine Bewertung von Simulationen. Ich starte jedoch mit einer Analyse dessen, was unter der Bezeichnung „Simulation“ in der Praxis betrieben wird.

Beginnen wir mit Beispielen von Computersimulationen. In der Kosmologie wird damit etwa untersucht, wie sich die heutige Materieverteilung im Universum gebildet hat. In diesen Simulationen ziehen sich Dunkle-Materie-Teilchen vor dem Hintergrund eines expandierenden Raums mit der Gravitationskraft an. Auch für die Untersuchung des Mikrokosmos sind Simulationen wichtig. So basierte der Nachweis des Higgs-Teilchens durch die

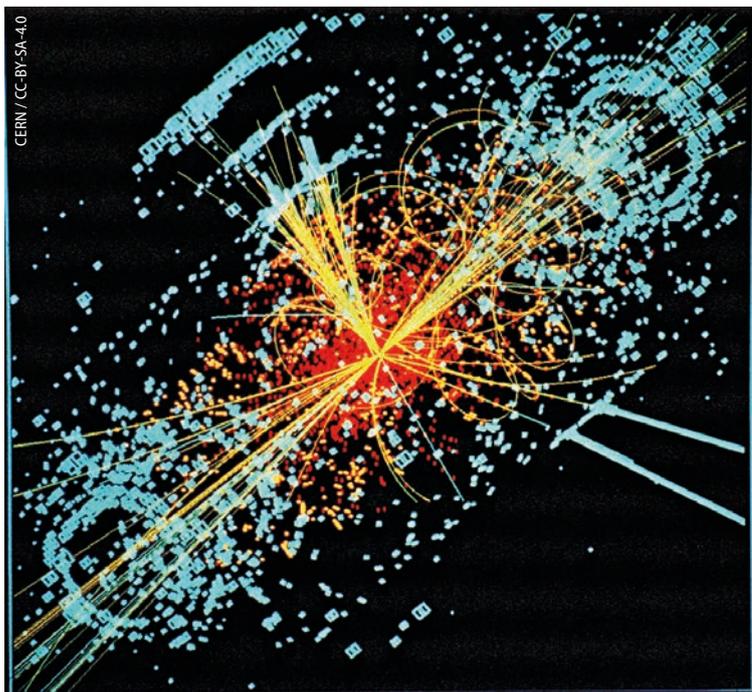


Abb. 1 Die Teilchenspuren nach dem Zerfall eines Higgs-Bosons wurden bereits 1997 simuliert, 15 Jahre bevor dieses Teilchen experimentell nachgewiesen werden konnte.

ATLAS- und CMS-Detektoren unter anderem darauf, dass das erwartete Signal, der Hintergrund und die Reaktionen des Detektors simuliert wurden, um das echte Signal besser aus den Daten extrahieren zu können (**Abb. 1**).

Was haben solche und andere Simulationen aus den unterschiedlichsten Bereichen der Physik gemeinsam? Eine Antwort auf diese Frage wird durch die Vielfalt der Zwecke erschwert, denn Simulationen dienen sowohl der Vorhersage (etwa des Klimas) und der Erklärung (beispielsweise des magnetischen Verhaltens von dünnen Schichten) als auch der explorativen Untersuchung von Modellen (z. B. der Dunklen Materie) sowie der Analyse von Daten, wie bei der Entdeckung des Higgs-Teilchens. Außerdem lassen sich unterschiedliche Arten differenzieren, etwa Monte-Carlo- oder deterministische Simulationen, je nachdem ob Zufallszahlen den Ausgang bestimmen oder nicht. Eine andere Unterscheidung betrifft die Frage, ob eine Simulation das Verhalten eines wirklichen Systems, etwa einer bestimmten Supernova-Explosion, wiedergeben soll oder ob lediglich ein fingiertes Szenario untersucht wird, in dem z. B. andere Gravitationskräfte als in der Natur herrschen.

Trotz der vielfachen Einsatzmöglichkeiten und Arten der Simulation hat man sich in der Philosophie auf eine allgemeine Charakterisierung geeinigt. Entscheidend für eine Simulation ist demnach, dass ein digitaler Computer die Befehle eines Programms ausführt, das annähernd oder exakt Gleichungen löst, die ihrerseits eine Zeitentwicklung beschreiben ([2], S. 110). Dabei wird berechnet, wie sich die Werte wichtiger physikalischer Größen (oder bei Monte-Carlo-Simulationen deren Erwartungswerte) mit der Zeit ändern. Die physikalischen Größen kennzeichnen dabei immer Zustände in einem physikalischen Modell. Daher lässt sich auch sagen, dass eine Computersimulation einen

Prozess nachvollzieht, der sich in einem Modell abspielt [4]. Bei vielen Simulationen repräsentiert das Modell, dessen zeitliches Verhalten nachvollzogen wird, ein reales Zielsystem wenigstens in einigen Aspekten so akkurat, dass die Simulation auch dessen Dynamik beschreibt.

Eine so gekennzeichnete Simulation konzentriert sich auf die einmalige Lösung von Modellgleichungen für bestimmte Anfangsbedingungen. In der Regel entspricht dies dem einmaligen Ausführen eines Simulationsprogramms. Oft wird die Computersimulation aber auch umfassender so verstanden, dass sie das Programmieren und Testen des Programms sowie sein mehrmaliges Ausführen mit variierten Anfangsbedingungen oder Parameterwerten abdeckt [5, 6].

Die vorgeschlagene Definition ordnet der Simulation einen unmittelbaren Zweck zu, nämlich das Errechnen oder Erschließen einer Reihe von Modellzuständen auf der Basis von Modellannahmen. Die so gewonnenen Vorhersagen lassen sich dann für alle möglichen weiteren Zwecke nutzen, etwa um das Verhalten eines realen Systems vorherzusagen oder um eine bestimmte Erklärung zu etablieren.

Nach der vorgeschlagenen Definition sind nicht alle computerbasierten Methoden der Physik Simulationen. So zählt die Bilderkennung mithilfe von neuronalen Netzwerken nicht als Simulation, weil damit keine Zeitentwicklung imitiert wird. Anders als neuronale Netze beruhen die meisten Simulationen auch auf Annahmen, die mithilfe etablierter physikalischer Begriffe formuliert werden.

Doch welchen Beitrag liefert die Simulation zum Erkenntnisgewinn in der Physik? In der Wissenschaftsphilosophie hat man diese Frage oft beantwortet, indem man Simulationen in Beziehung zu bekannten Methoden gesetzt hat, insbesondere zur mathematischen Modellierung und zum Experiment.

Simulationen und Modelle

Schon die Definition der Computersimulation impliziert, dass es einen engen Zusammenhang zur Modellierung gibt. Unter der Modellierung eines realen Systems versteht man dabei eine Forschungsstrategie, in der letzteres (das sogenannte Zielsystem) nicht direkt untersucht wird, sondern indirekt über den Umweg eines anderen Objektes, eben des Modellsystems oder Modells [7]. So werden die Sonne und die Planeten oft als Punktteilchen modelliert, die nach dem Newtonschen Gravitationsgesetz miteinander interagieren. Dieses Modell ist letztlich ein fingiertes System, das gegenüber der Realität vereinfacht ist: So sieht es von bestimmten Aspekten (etwa den Kometen) ab, weil es Idealisierungen wie die Annahme von Punktteilchen und Approximationen enthält, etwa indem es die Newtonsche Physik statt der Allgemeinen Relativitätstheorie voraussetzt. Die Vereinfachungen führen in diesem Fall dazu, dass sich das Modellsystem exakt mit den Gleichungen der Newtonschen Physik beschreiben lässt. Wichtige Zusammenhänge, die im Modell gelten, etwa dass sich die Planeten annähernd auf Ellipsenbahnen bewegen, lassen sich aber trotz der Vereinfachungen auf die Realität übertragen. Durch diese Übertragung lernen wir etwas über das Zielsystem, etwa wie sich die Planeten weiterbewegen.

Doch es gibt auch Modelle ohne reales Zielsystem, die ein fingiertes Szenario entwerfen.

Als Forschungsstrategie führt die Modellierung nur dann zum Erfolg, wenn sich das Modellsystem gut analysieren lässt. Andernfalls ergeben sich keine Erkenntnisse über das Modell, die man weiter nutzen könnte. Eine zentrale Aufgabe der theoretischen Physik besteht daher darin, Gleichungen aus Modellen zu lösen oder wenigstens einige Konsequenzen daraus abzuleiten. Vor dem Aufkommen der Simulation geschah dies vorzugsweise durch analytische Rechnungen mit Papier und Bleistift.

Computersimulationen knüpfen an diese Tätigkeiten an und leisten so einen Beitrag zur Modellanalyse. Sie tun dies letztlich, indem sie unsere Rechenkapazitäten erhöhen, ähnlich wie Teleskope unsere Wahrnehmungsfähigkeiten erweitern [2]. Dadurch verschieben sich die Grenzen der erfolgreichen Modellierung deutlich: Mit Computersimulationen sind auch Anfangs- und Randwertprobleme näherungsweise lösbar, für die analytische Lösungen nicht existieren oder nicht zu finden sind. Damit können wir bestehende Modelle wie das Ising-Modell viel genauer untersuchen. Zudem inspiriert der Computer die Konstruktion neuer Modelle, deren Gleichungen schlicht unlösbar für uns sind. So wurden etwa in der Kosmologie die N -Teilchen-Simulationen, welche die Dunkle Materie verfolgen sollten, erweitert, um auch die baryonische Physik und die Galaxienbildung zu modellieren (Abb. 2). Damit entstanden höchst komplexe Simulationen, deren Modellannahmen sich in der Praxis kaum mehr unabhängig vom Simulationsprogramm spezifizieren lassen. Zwar lässt sich die Simulation im Sinne der vorgeschlagenen Definition weiter als Versuch auffassen, Lösungen zu einem Modell zu berechnen. Aber wenn dieses Modell so komplex wird, dass es sich nicht mehr aufschreiben lässt, ist es natürlicher, sich mit dem Simulationsprogramm als einer Art von „Vorhersagemaschine“ auseinanderzusetzen.

Computersimulationen als Experimente?

Computersimulationen werden oft auch als Computerexperimente bezeichnet. In der Tat gibt es frappierende Ähnlichkeiten zwischen Simulationen und Experimenten. Beide generieren ähnliche Formen von „Daten“, die oft mit denselben Methoden visualisiert und weiterverarbeitet werden. Die Vielseitigkeit beider Methoden verdankt sich dem Umstand, dass sich die Ausgangsbedingungen systematisch variieren lassen. Simulationen können sogar Experimente ersetzen, die zu aufwändig wären. In der philosophischen Literatur wurde daher vorgeschlagen, Computersimulationen als Experimente aufzufassen. Die Pointe dieses Vorschlags ist nicht, dass heute viele Experimente Simulationen involvieren. Vielmehr wird behauptet, mit Simulationen ließe sich so Erkenntnis wie mit Experimenten gewinnen – unabhängig davon, ob diese eine Simulation enthalten oder nicht.

Dieser Vorschlag hält aber einer näheren Überprüfung nicht stand. Denn ein Experiment beruht auf einer zweifachen Wechselwirkung mit dem untersuchten Ausschnitt der Natur. Erstens greift die experimentierende Person in

die Natur ein, um einen bestimmten Versuchsaufbau zu realisieren. Zweitens beobachtet sie, was sich im Rahmen des Versuchs abspielt – wie also die Natur auf die künstlich hergestellten Bedingungen reagiert. Diese zweifache Wechselwirkung mit dem untersuchten System findet bei einer Computersimulation nicht statt. Eine Simulation der Planetenbewegungen interveniert nicht im Sonnensystem, indem sie etwa die Planeten in eine interessante Ausgangslage befördert. Ebenso wenig resultiert sie in Daten, die aus der Beobachtung der Planeten hervorgehen. Daher ist eine Simulation kein Experiment im wörtlichen Sinne.

Dieser Einwand verliert zwar an Kraft, wenn man berücksichtigt, dass auch viele Experimente allenfalls einen höchst indirekten Zugang zum untersuchten System gewähren. So sind der Eingriff in die Natur und die nachfolgenden Beobachtungen bei Experimenten mit dem ATLAS-Detektor nur mithilfe vieler Modellannahmen, ja sogar Simulationen verständlich (Abb. 3). Dennoch bleibt ein Unterschied zur reinen Computersimulation: Im Experiment bestimmen die Modellannahmen, die zur Interpretation gebraucht werden, das Ergebnis nicht vollständig. Die Natur selbst darf sozusagen noch etwas sagen, während das Resultat einer Simulation letztlich durch die zugrunde gelegten Annahmen vorherbestimmt ist [8]. Das hat wichtige Konsequenzen für den Einsatz von Simulationen. Echte Experimente an Systemen mit unbekanntem dynamischen Gesetzen lassen sich nicht durch Simulationen ersetzen. Insbesondere erlaubt es die Simulation anders als das Experiment nicht, Hypothesen über das Zielsystem zu überprüfen.

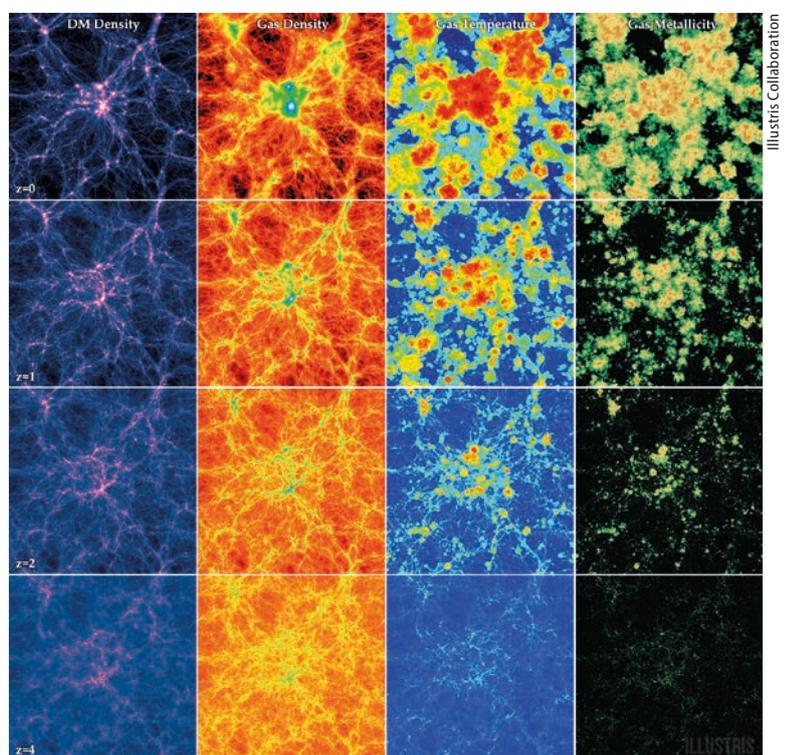


Abb. 2 Die Illustris-Simulation verfolgt die zeitliche Entwicklung der Materieverteilung im Universum, hier von einer Rotverschiebung $z = 5$ bis heute ($z = 0$). Die Säulen zeigen in Projektionen die Dichte der Dunklen Materie, die Gasdichte, die Gastemperatur und die Gasmetallizität (von links nach rechts).

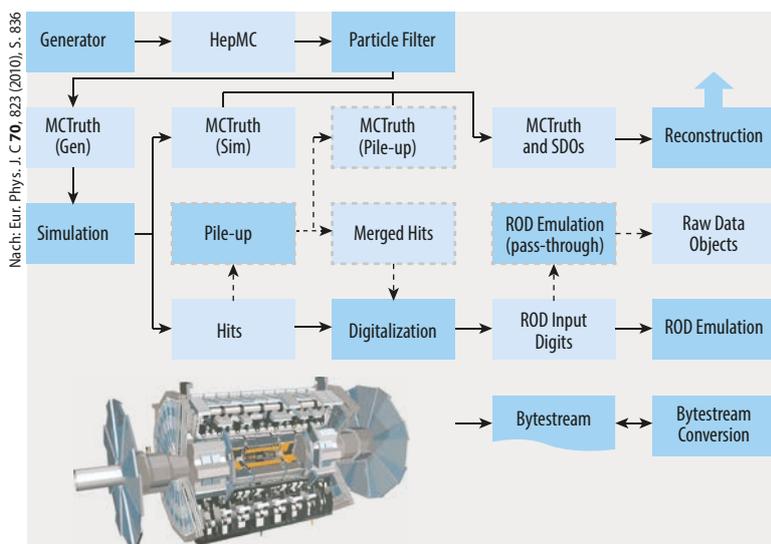


Abb. 3 Im Workflow für Simulationen beim ATLAS-Detektor stehen mittelblaue Kästchen für Algorithmen und hellblaue Kästchen für Simulationsergebnisse. Zunächst erzeugt ein sogenannter Particle-Generator Ereignisse (links oben). Nach einer Filterung erfolgt die detaillierte Simulation, wie sich der resultierende Teilchenschauer im Detektor ausbreitet. Die Analyse der simulierten Einschläge („hits“) in den Detektorkomponenten geschieht dann genauso wie die der gemessenen.

Trotzdem bleiben die Parallelen zwischen echten Experimenten und Computersimulationen bestehen. Mit der Simulation hat so eine Methode Einzug gehalten, die auch in der Theorie ein quasi-experimentelles Vorgehen erlaubt: In Simulationen lassen sich unterschiedliche Versuchsbedingungen herstellen, um zu „schauen“, was dabei herauskommt. Dabei gilt es immer zu beachten, dass letztlich nur ein Modell der Realität vorliegt.

Glaubwürdigkeit von Simulationen

Wenn Computersimulationen den unmittelbaren Zweck haben, Informationen abzuleiten, müssen sie sich daran messen lassen, ob ihre Resultate stimmen oder wenigstens nicht zu weit von der Realität entfernt sind. Der zentrale Bewertungsmaßstab ist daher ihre Wahrheit bzw. die Akkuratheit. Da Simulationen auf Modellen mit Idealisierungen basieren, müssen die Resultate nicht in jeder Hinsicht akkurat sein. Von gängigen Klimasimulationen etwa wird nicht erwartet, dass sie die Entwicklung der Niederschlagsmengen für einzelne Regionen vorhersagen (**Abb. 4**), wohl aber einigermaßen akkurat die mittlere Oberflächentemperatur der Erde.

Ob die Resultate einer Simulation akkurat sind, lässt sich nur im Einzelfall entscheiden und ist der Simulation nicht anzusehen. Oft werden Simulationsergebnisse mit Animationen präsentiert. Das wirkt suggestiv, heißt aber nicht, dass sie korrekt sind. Manchmal kann die Korrektheit durch den Vergleich mit Daten etabliert werden. Doch oft ist dieser Vergleich nicht möglich, etwa wenn Phänomene in der fernen Zukunft und unbeobachtbare Aspekte der Realität wie das Innere eines Sterns simuliert werden. In solchen Fällen kann es allenfalls gute Gründe geben, die Resultate einer Simulation für akkurat zu halten. Daher gilt es, indirekt die Glaubwürdigkeit der Simulation zu etablieren. Aber wie?

Um diese Frage zu beantworten, müssen wir die zwei erwähnten Arten von Simulationen unterscheiden: Hat eine Simulation kein reales Zielsystem, sondern erkundet nur die Konsequenzen aus Modellen oder Theorien, dann sollen die Ergebnisse nur im Modell oder der Theorie gelten. Es bleibt dann lediglich sicherzustellen, dass die Simulationen die Konsequenzen des Modells hinreichend akkurat erfassen. Schwieriger ist der Nachweis von Glaubwürdigkeit für Simulationen mit einem wirklichen Zielsystem – etwa einer Supernova-Explosion (**Abb. 5**). Auf solche Simulationen beschränke ich mich im Folgenden: Versuche, ihre Glaubwürdigkeit zu bestätigen, fasst man unter dem Begriff der Validierung zusammen [9].

Eine erste Quelle der Glaubwürdigkeit basiert auf einem indirekten Vergleich mit Beobachtungen. Dabei werden nicht die Simulationsergebnisse von unmittelbarem Interesse mit Daten verglichen, denn das ist oft unmöglich. Vielmehr kommen zusätzliche Resultate zum Einsatz, die sich mit den Beobachtungen vergleichen lassen. Reproduziert eine Simulation etwa, wie sich die beobachtete Leuchtkraft einer Supernova innerhalb einer begrenzten Zeitspanne verändert, dann erhöht das ihre Glaubwürdigkeit bezüglich der Resultate für die Zukunft und für andere Variablen, die das Innere des Sterns beschreiben. Jedoch basiert diese indirekte Validierung mit Daten letztlich auf einem Induktionsschluss, der von der Gegenwart in die Zukunft führt und oft zwischen unterschiedlichen Variablen vermittelt. Ein solcher Induktionsschluss ist nicht unproblematisch.

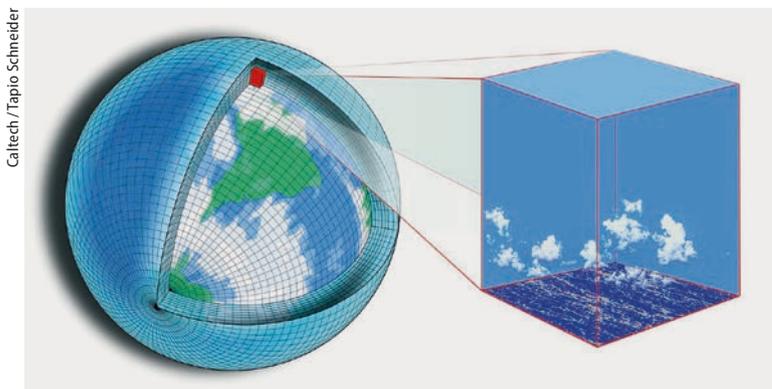


Abb. 4 Globale Klimamodelle („general circulation models“) beschreiben die Atmosphäre mit partiellen Differentialgleichungen. Diese müssen für die Untersuchung auf dem Computer diskretisiert werden, wie bei der Erdkugel angezeigt.

Caltech/Tapio Schneider

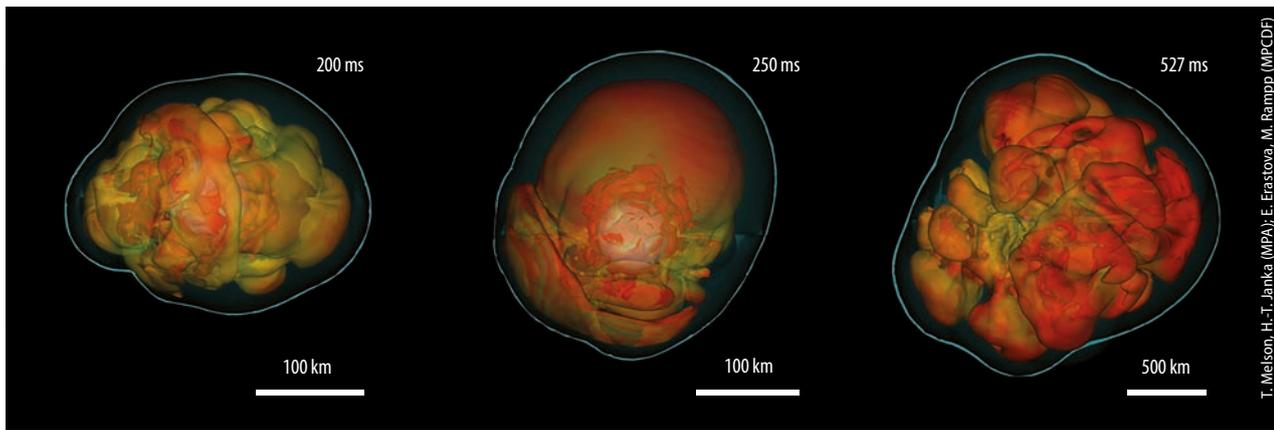


Abb. 5 Ergebnisse einer Supernova-Explosion. Die Bilder zeigen drei Stadien der Explosion des kollabierenden Sterns, dessen Masse zwanzig mal so groß ist wie die Sonne. Die weiße Kugel im Innern stellt den entstehenden Neutronenstern dar, die bläuliche, transparente Hülle deutet die Stoßwelle der Supernovaexplosion an.

Denn es gibt ein Unterbestimmtheitsproblem: Alternative Simulationen der nicht beobachteten Aspekte könnten zu ebenso guter Übereinstimmung mit den Daten führen oder die Übereinstimmung könnte bloßer Zufall sein.

Das bringt uns zur zweiten Quelle für die Glaubwürdigkeit von Simulationsergebnissen, der Glaubwürdigkeit der Annahmen, die in die Simulation eingehen. So basieren Supernova-Simulationen auf hydrodynamischen Gleichungen für die beteiligten Neutrinos. Diese Gleichungen sind äußerst glaubwürdig, weil sie auf basalen Erhaltungssätzen der Physik beruhen, die durch viele voneinander unabhängige Experimente und Beobachtungen bestätigt wurden. Man mag daher hoffen, dass sich die Glaubwürdigkeit der Annahmen auf die Simulationsergebnisse überträgt. Dies ist allerdings nur mit zwei Einschränkungen der Fall. Erstens müssen grundlegende Gleichungen der Physik mit zusätzlichen Annahmen (Hilfshypothesen) verbunden werden, um ein System zu simulieren. Diese Annahmen betreffen insbesondere die Anfangs- und die Randbedingungen und sind oft mit Unsicherheiten behaftet. Auch braucht es aus Gründen der Berechenbarkeit oft vereinfachende Annahmen, die ihrerseits nicht so gut begründbar sind. Daher sind die Simulationsergebnisse nicht so glaubwürdig wie etablierte Gleichungen der Physik. Zweitens überträgt sich die Glaubwürdigkeit der implementierten Annahmen nur dann auf die Resultate, wenn die Simulation die Gleichungen wirklich annähernd löst. Ob das gelingt, ist aber gerade bei vielen nichtlinearen Gleichungen nicht offensichtlich. Die benötigten Näherungsverfahren für Differentialgleichungen, aber auch Programmierfehler können dazu führen, dass die Simulationsergebnisse nur unzureichend das Verhalten nachzeichnen, das die untersuchten Annahmen implizieren. Der Begriff der Verifikation steht für die Anstrengungen, die zeigen sollen, dass ein Computerprogramm tatsächlich annähernd Lösungen des intendierten Modells liefert. Ohne diese Verifikation überträgt sich die Glaubwürdigkeit etablierter Gleichungen nicht auf die Simulationsergebnisse (**Abb. 6**).

In der Praxis werden beide Quellen der Glaubwürdigkeit, also die Reproduktion einiger Daten und die Fundierung auf glaubwürdigen Annahmen, kombiniert. Dabei können

glaubwürdige Annahmen, auf denen ein gut verifiziertes Programm basiert, dem Induktionsschluss auf die zukünftigen Anwendungen mehr Berechtigung geben: Wenn die Passung mit den Daten auf einem adäquaten Modell beruht, dann ist sie kein Zufall und lässt sich extrapolieren. Umgekehrt verleiht eine gute Passung mit vorhandenen Daten denjenigen Hilfshypothesen einer Simulation mehr Glaubwürdigkeit, die nicht so gut gerechtfertigt sind.

In der Folge ist die Validierung von Computersimulationen oft ein äußerst komplexes Unterfangen, das heterogene Überlegungen integrieren muss – von der Mathematik der Näherungsverfahren bis zum Vergleich mit Daten. Eine Schwierigkeit dabei ist der „Holismus“ [10]: Die Simulation ist ein komplexes Ganzes (griech. „holon“), in das viele Annahmen eingehen. Stimmen die Ergebnisse der Simulation nicht mit vorhandenen Daten des Zielsystems überein, kann das sehr unterschiedliche Gründe haben – von einem „bug“ über die Nutzung eines inadäquaten Approxima-

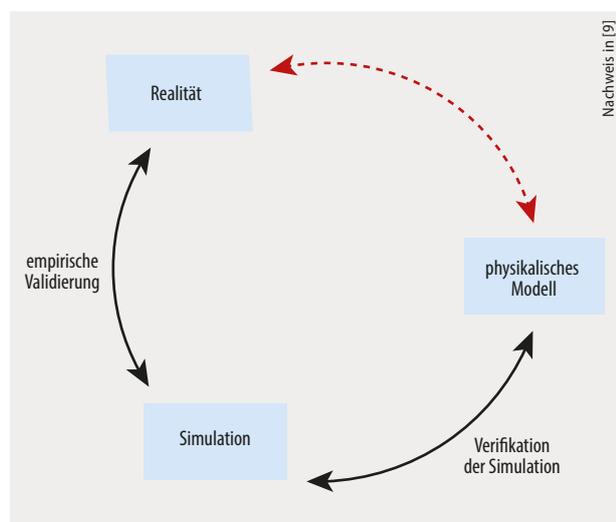


Abb. 6 Der sogenannte Sargent-Kreis zeigt auf, wie unterschiedliche Quellen zur Glaubwürdigkeit von Simulationsergebnissen beitragen können. Die empirische Validierung gleicht mit Daten ab. Die Simulationsergebnisse gewinnen aber auch an Glaubwürdigkeit, wenn sie auf einem glaubwürdigen physikalischen Modell basieren (rot gestrichelte Linie) und bezüglich des Modells verifiziert sind.



Abb. 7 Erst mit dem Höchstleistungsrechner SuperMUC am Leibniz-Rechenzentrum in Garching bei München war es 2015 möglich, die Supernova-Explosionen eines Sterns mit 20-facher Sonnenmasse dreidimensional zu simulieren.

tionsverfahrens bis zu einem verfehlten Modell. Oft ist es schwierig, den Fehler genauer zu lokalisieren.

Wegen ihrer Komplexität entzieht sich die Validierung bisher einer einheitlichen philosophischen Analyse. Einige Praktiken der Validierung stehen zumindest in Spannung zu bisherigen Beschreibungen der wissenschaftlichen Methode. So fordert Poppers Falsifikationismus, Hypothesen, die im Widerspruch zu Beobachtungen stehen, nicht ad hoc an letztere anzupassen, sondern durch Annahmen zu ersetzen, die einen zusätzlichen Erkenntnisgewinn versprechen, z. B. aufgrund ihrer Allgemeinheit. Wenn neue Annahmen bei Simulationen nur dazu dienen, die Passung mit den Daten zu verbessern, scheint diese Forderung auf den ersten Blick verletzt zu sein ([11], S. 1093). Auch der Bayesianismus hat Probleme, die Validierung voll zu erfassen, insbesondere wenn es um den Teilaspekt der Verifikation geht. Denn er geht davon aus, dass sich die als Wahrscheinlichkeit quantifizierte Glaubwürdigkeit von Hypothesen nach den Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung ohne Weiteres auf die Konsequenzen ausbreitet. Dann wäre aber die Verifikation unnötig, weil klar wäre, ob die Simulationsergebnisse aus dem Modell folgten ([9], Kap. 7).

Schwierigkeiten dieser Art motivieren die Idee, die Wissenschaftsphilosophie müsse ihre Analyse der wissenschaftlichen Methoden grundsätzlich überdenken [3]. Wirklich neu und herausfordernd an der Beglaubigung von Simulationsergebnissen ist aber lediglich die Art, wie unterschiedliche Erwägungen von mathematischen Beweisen bis zu experimentbasierten Argumenten zusammenfließen. In der Praxis erfordert die Validierung daher oft eine Zusammenarbeit zwischen experimentell und theoretisch Forschenden.

Einfluss auf die Physik?

Wie steht es nun insgesamt mit der Computersimulation? Was macht sie – und was macht sie mit der Physik? Wie wir gesehen haben, analysiert jede Computersimulation ein dynamisches Modell, indem sie Beschreibungen fortlaufender Systemzustände generiert. Läuft alles gut, dann lernen Forschende dabei, wie sich ein System in einem

Modell entwickelt. Oft lassen sich aus dem Ergebnis auch weitere Schlüsse ziehen, sodass die Computersimulation für vielfältige Zwecke genutzt werden kann.

Unser Vergleich mit bisherigen Methoden zeigt, dass Computersimulationen als Methode nichts völlig Neues sind. Sie knüpfen an bekannte Arbeitsweisen der Physik an. Insbesondere erweitern sie die bisherigen Bemühungen, mathematische Modelle zu analysieren. Weil sie oft sehr schnell berechnen, wie sich ein Modellsystem unter gewissen Anfangsbedingungen entwickelt, erlauben sie ein quasi-experimentelles Vorgehen. Damit lassen sich Experimentiertechniken in theoretische Kontexte übertragen.

Dabei unterscheiden sich Computersimulationen in der Anzahl der Rechenschritte von den bisherigen Rechnungen so stark, dass ein qualitativer Unterschied entsteht: Zuvor nicht zugängliche Modelle lassen sich erfolgreich mithilfe von Simulationen untersuchen. Zusätzlich geraten neue Arten von Modellen in den Blick, die speziell auf den Computer zugeschnitten sind wie zelluläre Automaten. Die erweiterte mathematische Modellierung erlaubt es, sehr komplexe Systeme zu betrachten. Mit Supernova-Explosionen etwa lassen sich keine Experimente machen, und eine theoretische Beschreibung ist zu kompliziert, als dass sich aus ihr analytische Ergebnisse gewinnen ließen. Erst Simulationen, welche die leistungsfähigsten Superrechner (**Abb. 7**) und sehr lange Rechenzeiten erfordern, machten Supernova-Explosionen im Detail zugänglich.

Wurde die Physik im späten 19. Jahrhundert noch als nomothetisch gekennzeichnet, d. h. als ausgerichtet auf allgemeine Naturgesetze und Theorien, hat sich das Interesse auch wegen der Computersimulation inzwischen immer mehr zur genauen Modellierung einzelner komplexer Systeme verschoben – wie dem Erdklima oder der Milchstraße. Dabei wird eine höhere Tiefenschärfe mit einem Verlust an Anwendungsbreite erkaufte. Denn komplexe Simulationsmodelle enthalten viel mehr Information, als eine Theorie für ein einzelnes System impliziert. Dafür lassen sie sich nur auf ein einzelnes Zielsystem anwenden und haben keine allgemeine Geltung wie Theorien oder Naturgesetze. Sehr oft betrachten Simulationen Phänomene, die sich auf mehreren Skalen gleichzeitig abspielen. Die Skalentrennung, die in vielen Bereichen der Physik einen Fokus auf bestimmte Skalen ermöglicht hat, findet dann nicht mehr statt. Damit helfen Computersimulationen, Systeme zu verstehen, die mehrere Skalen miteinander verbinden.

Die neuen Erkenntnismöglichkeiten durch Computersimulationen haben aber auch einen gewissen Preis: Zum einen müssen sie verifiziert und validiert werden, um glaubwürdig zu sein. Zum anderen sind Computersimulationen als Methode intransparent. Wegen der vielen Rechenschritte und der Komplexität der zugrunde gelegten Modelle verstehen wir nicht, wie und warum die Resultate zustandekommen. Man spricht in diesem Zusammenhang gerne von der Opazität von Simulationen ([2], 147ff.) [12]. Allerdings gibt es inzwischen Methoden, mit denen man sich die Simulationsergebnisse besser verständlich machen kann.

Die Phänomene, die sich mit Computersimulationen untersuchen lassen, sind oft so komplex, dass stark idealisiert und abstrahiert werden muss. Dabei kommt es je nach

Erkenntnisinteresse zu unterschiedlichen Vereinfachungen. Das hat zur Folge, dass es nicht die eine Simulation eines Systems gibt, sondern unterschiedliche Aspekte verschiedene Simulationen benötigen. Daher dürften der Physik nicht so schnell die Fragestellungen für Computersimulationen ausgehen.

Allerdings gerät die Computersimulation in der jüngsten Zeit durch Techniken des maschinellen Lernens unter Druck. So werden die Ergebnisse von Experimenten jetzt manchmal nicht durch Vergleich mit Simulationen analysiert, sondern durch neuronale Netze. Diesen gegenüber ist die Simulation sozusagen „alte Schule“ (wie revolutionär sie sonst auch scheinen mag): Sie basiert auf physikalischen Annahmen, die letztlich von Menschen getroffen werden. Gerade deswegen dürfte die Computersimulation aber weiter dort eine wichtige Rolle spielen, wo Menschen versuchen, die Natur zu verstehen.

Für hilfreiche Hinweise zu diesem Artikel danke ich Ercan Isik, Vera Materese und Tim Rätz.

Literatur

[1] K. Binder und D. Heermann, Monte Carlo Simulation in Statistical Physics, 6. Aufl., Springer, Berlin (2019)
 [2] P. Humphreys, Extending Ourselves: Computational Science, Empiricism, and Scientific Method, Oxford Univ. Press, New York (2004)
 [3] E. Winsberg, Science in the Age of Computer Simulation, University of Chicago Press, Chicago (2010)
 [4] S. Hartmann, in: R. Hegselmann et al. (Hrsg.), Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View, Kluwer, Dordrecht (1996), S. 77
 [5] R. Frigg und J. Reiss, Synthese **169**, 593 (2009)
 [6] W. S. Parker, Synthese **169**, 483 (2009)
 [7] M. Weisberg, Brit. J. Philos. Sci. **58**, 207 (2007)
 [8] C. Beisbart, Eur. J. Philos. Sci. **8**, 171 (2018)
 [9] C. Beisbart und N. J. Saam (Hrsg.), Computer Simulation Validation, Springer, Cham (2019)
 [10] J. Lenhard und E. Winsberg, Stud. Hist. Philos. Sci. B **41**, 253 (2010)
 [11] G. B. Kleindorfer, L. O'Neill und R. Ganeshan, Management Science **44**, 1087 (1998)
 [12] C. Beisbart, Synthese **199**, 11643 (2021), rdcu.be/cIxiH

Der Autor



Claus Beisbart (FV Gravitation und Relativitätstheorie) promovierte in Kosmologie an der LMU München. Noch mehr als für die Tiefen des Universums konnte er sich jedoch für das philosophische Nachdenken über die heutige Physik begeistern. Nach einer zweiten Promotion in Philosophie, ebenfalls in München, und weiteren

Stationen unter anderem in Konstanz, Pittsburgh und Dortmund lehrt er daher heute in Bern Wissenschaftsphilosophie und ist Mitglied der DPG-AG Philosophie der Physik. Neben der Erkenntnistheorie computer-basierter Methoden gehören Wahrscheinlichkeiten, die Philosophie der Kosmologie und die Methodologie der Philosophie zu seinen Arbeitsgebieten.

Prof. Dr. Dr. Claus Beisbart, Institut für Philosophie, Universität Bern, Länggassstr. 49a, 3012 Bern, Schweiz



MenloSystems

It's a Quantum World

FC1500-Quantum - one laser system to rule them all

- Complete solution for your Quantum 2.0 applications
- Quantum optical clocks, atom interferometry, quantum computer based on ions or neutral atoms
- We deliver the full, robust engine to operate your physics package

Precision in photonics. Together we shape light.



www.menlosystems.com

Visit us at the Laser World of Photonics
 26.-29.04.2022 in Munich, Hall B5 Booth 415 & Hall C6 Booth 111