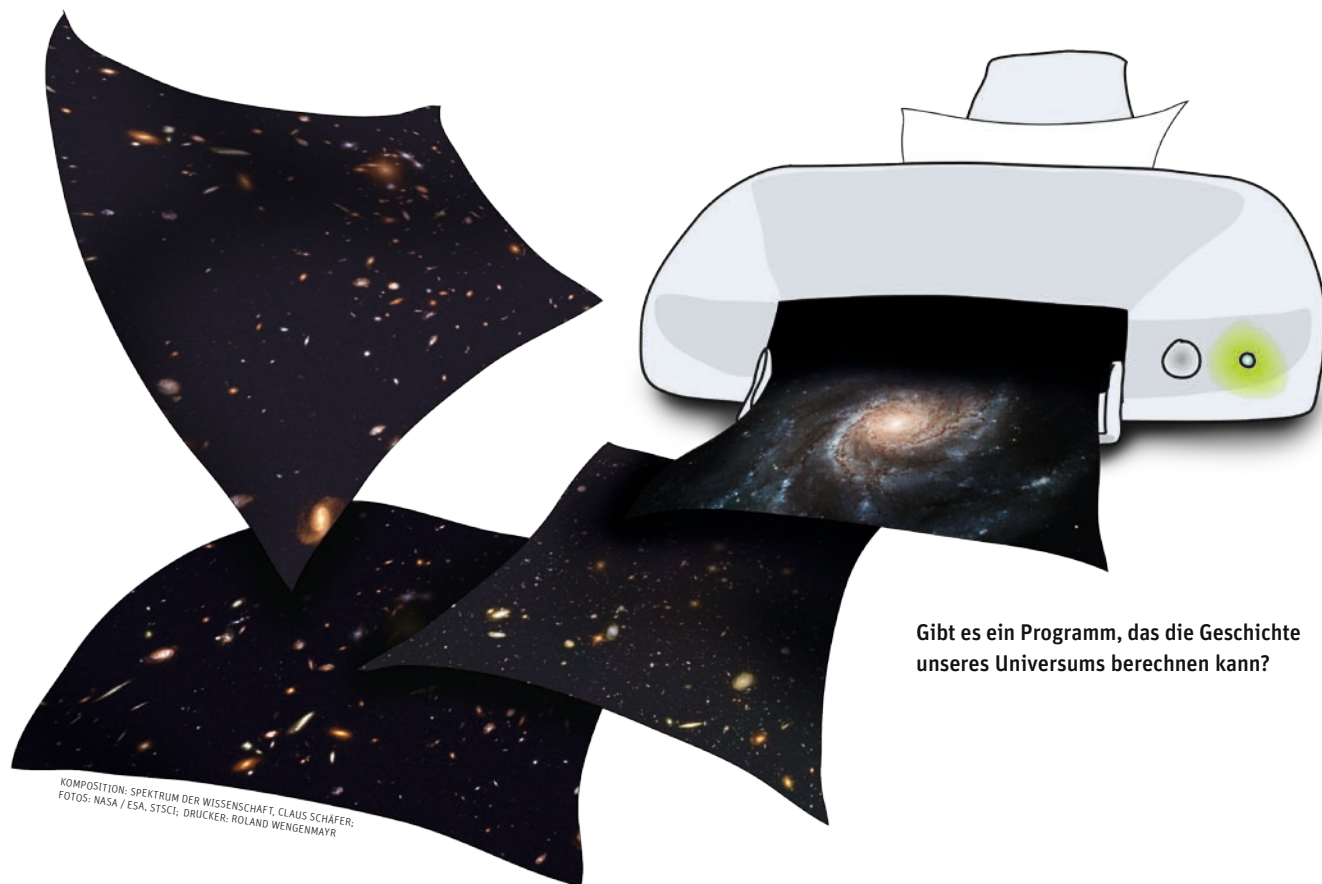




Gibt es ein Programm, das die Geschichte unseres Universums berechnen kann?

Alle berechenbaren Universen

Gibt es ein Programm, das den exakten Verlauf unseres Universums und aller anderen möglichen Universen berechnen kann? Bisher spricht nichts dagegen. Begeben wir uns auf die Suche.

Von Jürgen Schmidhuber

Bereits in den 1940er Jahren vermutete Konrad Zuse, dass unser Universum – ähnlich den virtuellen Welten der heutigen Videospiele – berechenbar sein könnte. Diese Hypothese verträgt sich erstaunlicherweise mit allen experimentellen Daten der Quantenphysik. Da berechenbare Universen viel einfacher sind als unberechenbare und man einfache Hypothesen den komplexen vorziehen sollte, wollen wir Zuses Hypothese akzeptieren, solange nichts dagegen spricht. Überraschenderweise muss es dann einen sehr kurzen und in gewissem Sinn optimal schnellen Algorithmus geben, der nicht nur die vollständige Geschichte unseres eigenen Universums berechnet, sondern auch die-

jenigen aller möglichen anderen Universen. Falls der unsere Welt berechnende Prozess in der Tat auf einem derartigen optimalen Algorithmus beruht, lassen sich Vorhersagen über die Zukunft machen. Testen wir sie! Was sind die philosophischen und theologischen Konsequenzen dieser Sicht?

Einfachheit und Komplexität

Ein Ding ist einfach, wenn es eine kurze Beschreibung hat. Das Bild einer fraktalen Struktur beispielsweise erscheint auf Grund seines Detailreichtums als komplex. In Wirklichkeit ist es allerdings einfach, weil es durch ein sehr kurzes Rechnerprogramm erzeugt und somit vollständig beschrieben werden kann. Sein algorithmischer Informationsgehalt, die so genannte Kolmogorow-Komplexität,

ist gering. Nach dem russischen Mathematiker Andrei Nikolajewitsch Kolmogorow (1903–1987) definiert man die Kolmogorow-Komplexität eines Objekts als die Länge des kürzesten Programms, das dieses Objekt berechnet. Diese Länge hängt dabei kaum von der Wahl der Programmiersprache ab: Programme in einer Sprache lassen sich nämlich durch ein Kompilierprogramm konstanter Größe in äquivalente Programme einer anderen Sprache überführen.

Ist nun die bisherige und zukünftige Geschichte unseres Universums in diesem Sinn einfach oder kompliziert? Gibt es vielleicht ein sehr kurzes Programm, das das Universum samt uns als darin enthaltenen Beobachtern durchrechnet? Gäbe es ein solches Programm, dann müsste es jedes noch so kleine, scheinbar

zufällige Elementarereignis festlegen und erklären. In diesem Fall wäre wohl die Entdeckung dieses Programms das oberste Ziel der Physik.

Nun stellt sich die Frage, ob im Universum in irgendeiner Form unberechenbare Zahlen auftreten. In diesem Fall wäre es selbst auch nicht berechenbar. Bisher liegt aber kein stichhaltiger Grund vor, dies anzunehmen. Um gewisse ma-

piell unvorhersagbaren Elementarereignissen auf der Quantenebene mit einschließt. Wäre dem so, dann hätte sie keine kurze Beschreibung. Schließlich weist eine lange Kette wahrhaft zufälliger Ereignisse definitionsgemäß keinerlei algorithmische Regelmäßigkeit auf. Sie hat im Gegenteil eine hohe Kolmogorow-Komplexität und ist daher nicht durch ein kompaktes Programm berechenbar.

legt, sie wäre weder kompakt beschreibbar noch exakt vorhersagbar.

Es ist nun allerdings im Prinzip ohne Weiteres möglich, sich eine im Computer generierte künstliche, pseudozufällige Welt vorzustellen, die vollkommen deterministisch ist und trotzdem in ihr existierenden Beobachtern überzeugend vorgaukelt, sie sei das nicht. In dieser Welt würden alle Beobachter und Beobachtungen einem völlig deterministischen Programm folgen, die Beobachter jedoch heisenbergähnlichen Schranken unterliegen. Das kann sie zu dem Glauben verleiten, ihre Welt sei nicht deterministisch und nicht vollständig beobachtbar. Der Programmierer dieser Welt könnte jedoch den Rechenprozess zu jedem Zeitpunkt anhalten, den gegenwärtigen Speicherinhalt in eine Datei schreiben (»dumpen«) und bis ins letzte Detail analysieren. Später könnte er das Programm dann weiterrechnen lassen, ohne dass ein interner Beobachter irgendeinen Effekt dieser Pause wahrnehmen könnte.

Die Quantenphysik hat eine grundlegende Eigenschaft, die Physikern lange Kopfzerbrechen bereitete. Nach ihr kann ein Quantensystem, das zum Beispiel aus mehreren verschränkten Teilchen besteht, sich im Prinzip räumlich unbegrenzt ausdehnen, ohne seinen Zustand zu verändern. Trotzdem »spüren« alle weit voneinander entfernten Teilchen es sofort, wenn man eines von ihnen manipuliert. Diese »Nichtlokalität« ist inzwischen zum Beispiel mit verschränkten Lichtquanten, die sich in Glasfaserkabeln über hundert Kilometer voneinander entfernt haben, experimentell bestätigt (SdW 6/2001, S. 21). Albert Einstein bezeichnete sie als

Echter Zufall oder Pseudozufall – spricht die Natur der reellen Zahlen gegen ein berechenbares Universum?

makroskopische Phänomene vorherzusagen, verwenden die Physiker zwar gerne die auf den Axiomen der reellen Zahlen beruhende Differenzialrechnung, obwohl die meisten reellen Zahlen gar nicht berechenbar sind (Kasten rechts). Andererseits muss die Differenzialrechnung keineswegs auch ein zutreffendes Modell für den mikroskopischen Bereich liefern. Viele Physiker sind in der Tat der Ansicht, dass das Universum endlich und durch kleinstmögliche Zeit- und Energieeinheiten gequantelt ist. Folglich wäre seine bisherige Geschichte – zumindest im Prinzip – formal durch ein diskretes Programm beschreibbar. Wie kurz und elegant könnte dieses sein?

Ockham und die Suche nach dem kürzesten Programm

Viele Wissenschaftler folgen der Regel des englischen Spätscholastikers und Philosophen William von Ockham (1280/5–1347/9), nach der unter allen Hypothesen, die eine gegebene Beobachtung erklären, die einfachste vorzuziehen sei. Demnach sind unter allen Programmen, welche die Beobachtungen reproduzieren, die kürzesten auch die besten. Offensichtlich scheint das Universum tatsächlich einfachen programmartigen Regeln zu folgen, zumindest in manchen Bereichen: Äpfel fallen immer wieder auf ähnliche Weise zu Boden, alle Elektronen verhalten sich scheinbar gleich. Dabei wären weit zufälliger und unvorhersagbarere Welten denkbar. Aber wie regelmäßig ist das Universum wirklich? Diese Frage führt direkt zur nächsten, nämlich wie stark seine Entwicklung durch ein geeignetes Programm komprimierbar ist.

Manche Quantenphysiker glauben, dass die Geschichte des Universums eine ungeheure Zahl von zufälligen, prinzi-

Die Physiker beziehen sich dabei gerne auf Erkenntnisse von Werner Heisenberg (1901–1976) und John Stewart Bell (1928–1990). Heisenbergs berühmte Unschärferelation besagt, dass man als Beobachter den Impuls und Ort eines physikalischen Objekts nicht gleichzeitig genau bestimmen kann. Um zum Beispiel den Zustand eines Elementarteilchens zu bestimmen, beschießt man es mit anderen Teilchen, wodurch sich aber sein Zustand ändert. Zur mathematischen Erfassung der resultierenden Ungewissheit ersetzt die Quantenmechanik präzise Vorhersagen durch Wahrscheinlichkeitsaussagen. Nach Auffassung vieler Physiker ist diese Unschärfe nicht allein ein Messproblem, sondern eine grundlegende Eigenschaft der Natur, gemäß der echte Zufälle passieren dürfen. Entgegen dem berühmten Ausspruch Albert Einsteins, dass Gott nicht würfele, scheint er das nach der Quantentheorie doch zu tun. Demnach wäre die Geschichte des Universums nicht von vornherein festge-

In Kürze

- ▶ Prinzipiell spricht nichts gegen die Existenz eines kurzen, optimalen Programms, das die **Geschichte unseres Universums** exakt berechnen kann.
- ▶ Es setzt voraus, dass es im Universum keine **unberechenbaren Zahlen** gibt.
- ▶ Nicht durch ein kurzes Programm berechenbar wäre der **echte Zufall**. Dessen Existenz nimmt die Quantenphysik zwar an, bleibt den Beweis jedoch schuldig.
- ▶ Man muss auch Programme berücksichtigen, die ihre Ausgabebits **nachträglich ändern** dürfen.
- ▶ Die Konsequenz eines **exakt berechenbaren Universums** wäre, dass unsere Zukunft vorherbestimmt ist.
- ▶ Eine **Vorhersage der Zukunft** wäre damit jedoch nicht möglich. Da das Programm auf einem Computer laufen müsste, der Teil unseres Universums ist, wäre es aus Prinzip zu langsam.

BERECHENBARE ZAHLEN UND ABZÄHLBARKEIT

ES GIBT HÖCHSTENS ABZÄHLBAR unendlich viele Programme in Form endlicher Ketten von Informationsbits wie zum Beispiel 010011101. Diese Bitketten lassen sich nämlich ebenso wie die Reihe der natürlichen Zahlen 1, 2, 3, ... alle auflisten: erst die kürzesten, die nur ein Bit lang sind, dann diejenigen, die zwei Bit lang sind, und so fort. Auch alle Brüche lassen sich aufzählen: erst die, die höchstens zwei Ziffern zur Darstellung ihres Paares (Nenner, Zähler) brauchen, dann diejenigen, die höchstens drei brauchen,

und so weiter. Die reellen Zahlen kann man allerdings nicht auflisten, wie der deutsche Mathematiker Georg Cantor (1845–1918) herausfand: Sie sind überabzählbar. Die meisten reellen Zahlen lassen sich weder als Bruch noch durch eine andere endliche programmartige Beschreibung darstellen – mit Ausnahme einiger weniger, wie zum Beispiel der Wurzel aus 2. Deren wohlbekanntes Programm muss zwar unendlich lange rechnen, um alle Nachkommastellen auszugeben, ist aber selbst sehr kurz.

»spukhafte Fernwirkung« und führte sie Mitte der 1930er Jahre als Beweis für die Unvollständigkeit der Quantentheorie an.

Diese Fernwirkung brachte den Physiker John Bell 1964 auf die Ungleichung, die heute seinen Namen trägt. Sie besagt im Wesentlichen Folgendes: Wenn Beobachter und Ereignisse im Universum in

Bislang haben wir gesehen, dass keine physikalischen Beobachtungen gegen Zuses Hypothese des berechenbaren Universums sprechen. Selbst die Unschärferelation und ihre Auswirkungen ließen sich im Prinzip in einer programmierten Welt so simulieren, dass interne Beobachter an die Existenz eines echten

Spricht die Quantenphysik gegen eine kurze Erklärung des Universums?

einem gewissen Sinn voneinander unabhängig sind, kann keine lokale Rechenregel die Nichtlokalität der Quantenphysik erklären. Was soll das heißen? Man könnte ja auf die Idee kommen, dass jedes Elementarteilchen ein paar »versteckte« Eigenschaften mit sich trägt, die den Physikern bisher unbekannt sind. In unserem verschränkten System könnte ein Teilchen in dem Wert einer versteckten Variablen alle relevanten Informationen über gewisse vergangene Ereignisse speichern. Das Ergebnis einer später an ihm vorgenommenen Messung könnte dann den Eindruck erwecken, das Teilchen sei unmittelbar von Messungen an anderen, sehr weit entfernten Teilchen beeinflusst worden, während es in Wirklichkeit diese Eigenschaft von Anfang an gehabt hätte.

Es stellt sich jedoch heraus, dass solche lokalen versteckten Variablen mit den experimentellen Daten unvereinbar sind. Wäre allerdings das Universum über globale versteckte Variablen oder einen anderen Weg deterministisch berechenbar, wäre natürlich auch Bells Annahme hinfällig, dass Beobachter und Ereignisse wirklich unabhängig sind. Das war Bell sehr wohl klar.

Zufalls glauben könnten. Namhafte Wissenschaftler wie Gerard 't Hooft, Träger des Physiknobelpreises von 1999, nehmen die Möglichkeit eines deterministischen Universums sehr ernst. Nun wollen wir aber eine Frage klären, der wir bisher aus dem Weg gegangen sind: Was alles ist denn überhaupt konstruktiv berechenbar?

Programme mit revidierbarer Ausgabe

Traditionelle Rechenmaschinen nehmen ein Programm als Eingabe entgegen, zum Beispiel eine Bitkette der Form 01001011... Diese Eingabe verarbeitet ein interner Mechanismus. In einer separaten Ausgabereinheit gibt er dann eine weitere, mit der Zeit wachsende Bitkette aus. Manche Programme halten dabei nie an, sondern rechnen immerzu fort.

Herkömmlicherweise wird dabei jedes einmal ausgegebene Bit als unveränderlich angesehen. Es stellt sich allerdings heraus, dass sehr viele mögliche Ausgabereihen nur unter gelockerten Rahmenbedingungen durch ein kurzes Programm beschreibbar sind. Dazu muss man den Rechenmechanismus so umge-

WISSEN

WAS HEUTE WICHTIG IST



Die Redaktion von **spektrumdirekt** informiert Sie schnell, fundiert und verständlich über den Stand der Forschung.

www.spektrumdirekt.de/heute

spektrumdirekt
Die Wissenschaftszeitung im Internet

stalten, dass die Programme einmal ausgegebene Bits nachträglich noch ändern dürfen. Ich habe hierzu definiert, dass eine Bitkette formal beschreibbar oder konstruktiv berechenbar ist, falls es ein Programm gibt, dessen Ausgabe auf diese Bitkette hin konvergiert. Das funktioniert nur, wenn jedes einzelne Bit der Ausgabekette nach endlicher Zeit aufhört, seinen Wert zu ändern.

Nehmen wir beispielsweise an, dass das N -te Ausgabebit 1 sein soll, falls das N -te Programm in der Liste aller möglichen Programme anhält (N ist eine beliebige natürliche Zahl). Diese Ausgabe lässt sich sehr kompakt durch ein Eingabeprogramm formulieren, das systematisch alle Programme aufzählt und in paralleler Weise durchrechnet. Dabei muss jedes Mal, wenn eines der Programme in der Liste – sagen wir das M -te – anhält, das zugehörige M -te Ausgabebit auf den Wert 1 gesetzt werden. Zudem muss allen Bits an den vorhergehenden Positionen 1 bis $M-1$ der vorläufige Wert 0 zugewiesen werden, sofern sie nicht schon gleich 1 sind. Das hat zur Folge, dass irgendwann jeder endliche Anfang der eigentlich unendlich langen Ausgabe konvergiert ist und sich nicht mehr ändert.

Allerdings können wir zu einem gegebenen Zeitpunkt in der Regel nicht wissen, ob ein bestimmtes Bit bereits stabil ist oder sich in Zukunft doch noch ändern wird. Ansonsten ließe sich das berühmte Halteproblem lösen, also die Frage, ob eine betrachtete Rechenvorschrift zu einem Ende gelangt. Dieses Problem ist jedoch unlösbar, wie die Mathematiker Kurt Gödel (1906–1978), Alonzo Church (1903–1995) und Alan Turing (1912–1954) in den 1930er Jahren nachgewiesen haben.

Es könnte sein, dass unsere bisherige Universumsgeschichte eine sehr kurze und kompakte Erklärung oder Beschreibung auf einer solchen Maschine besitzt, die ihre Ausgaben nachträglich ändern darf, nicht aber auf einem herkömmlichen Computer.

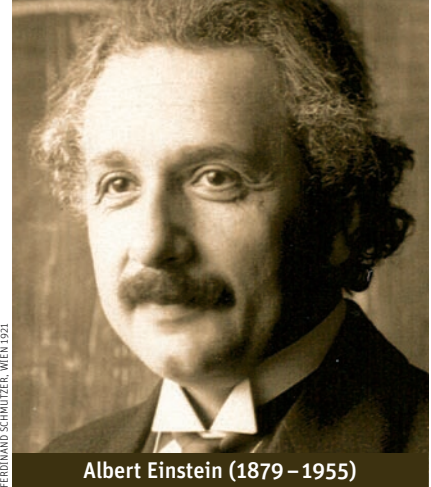
In den 1990er Jahren habe ich darauf hingewiesen, dass es einen sehr kurzen Algorithmus gibt, welcher alle Geschichten aller möglichen Universen ausgibt, solange sie nur berechenbar sind. Dieser Algorithmus ist noch dazu in einem gewissen Sinn extrem schnell, hält aber nie an. Er erstellt eine ständig wachsende Liste aller möglichen Programme. Am Anfang stehen die kürzesten mit einer

Länge von einem Bit, dann folgen die mit einer Länge von zwei Bit und so weiter. Die gedachte Rechenmaschine arbeitet nun im Time-Sharing-Betrieb alle aufgelisteten Programme systematisch ab. Dabei weist sie den Programmen nacheinander jeweils eine Zeitspanne (einen »Zyklus«) konstanter Länge zu. Ein Programm kommt umso häufiger an die Reihe, je kürzer es ist; genauer: Ein Programm der Länge N Bit muss 2^{N+1} Zyklen abwarten, bis es wieder einen Zyklus rechnen darf. Ist unser Universum eines der berechenbaren, dann wird jedes seiner zahlreichen Programme irgendwann genügend Zeit bekommen, um zum Beispiel die ersten 20 Milliarden Jahre durchzurechnen (seit dem Urknall sind knapp 14 Milliarden Jahre vergangen).

Kürzestes, schnellstes Programm

Dieser Algorithmus lässt sich in gebräuchlichen Programmiersprachen in relativ wenigen Zeilen implementieren. Natürlich gibt er neben dem unseren auch noch viele andere Universen mit anderen physikalischen Gesetzen aus, vorausgesetzt, der Rechner ist groß genug. Dabei kommt uns die Tatsache entgegen, dass der Informationsgehalt einer Menge oft geringer ist als derjenige ihrer einzelnen Elemente. Folglich kann das kürzeste Programm einer einzelnen Universumsgeschichte viel länger sein als das Programm, das alle möglichen Geschichten berechnet.

Interessanterweise gibt unser universeller Algorithmus die ersten N Bits einer willkürlich herausgegriffenen Geschichte, die wir mit G bezeichnen wollen, fast so schnell aus wie ein Programm, das wir P nennen. P sei dabei das denkbar schnellste Programm, welches speziell G berechnet und sonst nichts. P ist im Allgemeinen unbekannt. Unser Algorithmus berechnet G zwar nicht ganz so schnell wie P ; der Geschwindigkeitsverlust ist aber in einem gewissen Sinn vernachlässigbar, denn er ergibt sich direkt aus der Wahrscheinlichkeit, P richtig zu erraten. Diese Wahrscheinlichkeit ist konstant und hängt nicht von der beliebig wachsenden Bitzahl N ab. Theoretische Informatiker ignorieren derartige konstante Faktoren gerne und sagen, sowohl P als auch unser universeller Algorithmus haben dieselbe Geschwindigkeitsordnung. Tun wir das auch, dann ist unser universeller Algorithmus in einem



Albert Einstein (1879–1955)

asymptotischen Sinn auch der schnellste für alle berechenbaren Welten, einschließlich unserer!

Da es viele Programme gibt, die ein und dieselbe Geschichte ausrechnen, produziert unsere »optimale« Rechnung somit auch viele Kopien der Geschichte unseres Universums. Dabei werden zu jedem Zeitpunkt diejenigen Kopien am weitesten fortgeschritten sein, die sich durch kurze und schnelle Programme berechnen lassen. Da es uns gibt, wissen wir zumindest sicher: Wenigstens eines dieser Programme hat bereits lange genug gerechnet, um unsere Existenz zu ermöglichen. Aber welches von den vielen? Mit großer Wahrscheinlichkeit wird es eines der kürzesten und schnellsten Programme sein, die mit unserer Existenz kompatibel sind!

Selbst wenn unserer Universumsgeschichte eine ungeheure Zahl echt zufälliger Quantenereignisse zu Grunde liegen sollte, würde sich sofort die Frage erheben: Welches wäre der einfachste Pseudozufallsgenerator, der neben den physikalischen Gesetzen benötigt wird, um eine vergleichbare Welt zu berechnen? Wäre diese – wegen des ausgeschlossenen echten Zufalls simplere – Welt auf Grund ihrer Einfachheit und ihres kurzen Programms nicht die Essenz aller derartigen Welten und damit im philosophischen Sinn vielleicht sogar »wahrer« als unsere? Nach meiner bisherigen Argumentation stecken wir vermutlich jedoch sowieso schon in einer der einfachsten, nichtzufälligen Welten, die mit unserem Dasein vereinbar sind. Schließlich braucht selbst der optimale universelle Algorithmus viel mehr Zeit, um zufällige oder nahezu zufällige Varianten der Welt zu berechnen!

Nun müssten wir das Programm unseres speziellen Universums eigentlich nur noch identifizieren. Das wäre gewissermaßen die »Weltformel«, mit der wir das Kapitel der Grundlagenphysik schließen könnten. Für eine systematische Suche

hat uns womöglich der russische Informatiker Leonid Levin das richtige Werkzeug an die Hand gegeben: Levin entwickelte in den 1970er Jahren das Konzept einer optimalen universellen Suche, die dem obigen Algorithmus in vieler Hinsicht sehr ähnlich ist. Diese Suchmethode könnte unter Umständen zur Entdeckung eines kurzen Programms führen, das als Nebeneffekt nicht allein das bekannte Verhalten der Elementarteilchen simuliert. Es würde auch Ereignisse, die Physiker bisher als zufällig einstufen, im Nachhinein als pseudozufällig entlarven. Dazu zählt der radioaktive Zerfall.

Dieses Programm wurde bisher noch nicht entdeckt. Trotzdem lassen sich unter der Annahme, dass der optimale Algorithmus zur Berechnung aller Universen verwendet wird, bereits interessante Vorhersagen machen. So werden beispielsweise die als Studienobjekte be-

anpassen. Diese Wissenschaftler haben häufig keine philosophischen Probleme mit der Idee einer vollständigen berechenbaren Realwelt im Zuse'schen Sinn. Schließlich ist eine hinreichend gute Simulation von der Realität nicht zu unterscheiden. Auch Kinder, die bereits Erfahrung mit Videospielen und virtuellen Realitäten gesammelt haben, finden die Idee einer berechenbaren Welt oft natürlicher als ihre Eltern. Interessanterweise sind es vor allem Quantenphysiker, die sich ein wenig gegen derartiges Gedankengut sträuben, ohne dies jedoch allzu gut mit Fakten begründen zu können.

Albert Einstein, vielleicht der größte aller Physiker, war allerdings – wie schon gesagt – der festen Überzeugung, dass »Gott nicht würfelt«. Diese Sicht war bei den Quantenphysikern lange unpopulär. Inzwischen scheint es aber nicht mehr abwegig vorherzusagen, dass seine Idee

Rechner so programmiert, dass er alle berechenbaren Universen durchrechnet. Falls das unsrige berechenbar ist, wäre es darunter. In manchen simulierten Universen evolvieren Wesen, die ihrerseits Rechner bauen, mit denen sie wiederum Universen simulieren. (Nebenbei bemerkt bevorzugt auch die deterministische Evolution oft wohl denjenigen, der aus vermeintlich freiem Willen zum eigenen Vorteil Entscheidungen trifft, gegenüber demjenigen, der sich treiben lässt, weil ja sowieso alles vorherbestimmt sei.) In manchen Simulationen wird ganz nach dem Vorbild gewisser religiöser Überlieferungen gelegentlich in den Lauf einer Welt eingegriffen. Oder es wird in ihnen der berechenbare Inhalt eines Gehirns als eine Art Seele von einer berechenbaren Welt in eine andere, paradiesartige kopiert.

In unserem Universum erhöht sich auf absehbare Zeit die Rechenleistung pro Euro in jedem Jahrzehnt um den Faktor 1000. Als Folge dieser Entwicklung nehmen auch Überzeugungskraft und Beliebtheit virtueller Realitäten dramatisch zu, weshalb vielen Menschen derartiges Gedankengut mit der Zeit immer natürlicher und akzeptabler erscheint. Dass es sogar mathematisch optimale Methoden gibt, Welten zu schaffen und zu berechnen, eröffnet allerdings ein Feld, das die Philosophie und die Theologie bisher noch kaum diskutieren.

Der Gedanke an eine Simulationshierarchie von berechenbaren Universen, die ineinander verschachtelt sind, provoziert jedoch die Frage: Woher kommt der Rechner für das oberste Universum der Hierarchie? Sie muss vorerst offen bleiben. ◀

Würfelt Gott doch nicht? Vielleicht erlebt das deterministische Universum eine umfassende Renaissance

lieben Quantenrechner entgegen den Erwartungen nicht wesentlich schneller arbeiten können als traditionelle Rechner. Die Ursache liegt grob gesprochen darin, dass die von Quantenrechnern erhofften Effekte bei großen Problemen wesentlich mehr Rechenoperationen erfordern würden, als fast allen Programmen zur Verfügung stünden, die unser Universum berechnen.

Folgen für Philosophie und Theologie

Wenn jemand das spezielle Programm unserer Welt bald fände und damit ihr Verhalten im Prinzip erklären könnte, ließe sich der genaue Verlauf unserer Zukunft damit vermutlich trotzdem nicht schneller herausbekommen als durch schlichtes Abwarten. Der Grund liegt auf der Hand: Wir müssten den Rechner, auf dem das Programm für Prognosezwecke laufen würde, innerhalb unseres Universums bauen. Damit wäre er als Teil des Universums prinzipiell nicht in der Lage, schneller zu rechnen als das Universum selbst.

Heute berechnen zahlreiche Forscher künstlichen Lebens durch pseudozufällige, deterministische Simulationen erfolgreich die Evolution von Kunstorganismen, die sich an ihre Kunstumwelt

des deterministischen Universums eine umfassende Wiederbelebung erfahren wird. Erstens, weil nichts wirklich dagegen spricht, und zweitens, weil sie im Rahmen der Theorie der Berechenbarkeit die Beschreibung der Weltgeschichte prinzipiell ungeheuer vereinfachen würde. Schließlich würde die Notwendigkeit einer gigantischen zusätzlichen Informationsmenge zur Beschreibung wahrhaft zufälliger Ereignisse entfallen.

Solange niemand zeigen kann, dass sich das Universum zumindest teilweise echt zufällig verhält, ist die Wissenschaft gefordert, ein kurzes Programm zu suchen, das alle scheinbaren Zufälle seiner Geschichte im Prinzip berechnen und damit als Pseudozufälle entlarven kann. Falls der uns berechnende Prozess die Ressourcen eines »übergeordneten« Universums optimal ausnutzt, dann steht zu erwarten, dass dieses Programm nicht nur kurz, sondern auch schnell ist. Wir sollten uns anstrengen, es zu finden! Die dramatischen Konsequenzen für die Physik wären offensichtlich.

Die Theorie der berechenbaren Universen liefert einen rein rationalen und technisch orientierten Zugang zu Grundfragen der Philosophie und Theologie. Jeder kann ja zumindest im Prinzip zu einer Art Gott werden, indem er einen



Jürgen Schmidhuber ist Kodirektor des Instituts für künstliche Intelligenz IDSIA in Manno-Lugano, Professor an der Universität Lugano sowie an der Universität für Angewandte Wissenschaften (SUPSI) in der Südschweiz und Professor für kognitive Robotik an der TU München. Seit 1996 analysiert er die Konsequenzen eines berechenbaren Universums. Er entwickelte zudem eine mathematische Theorie der Schönheit und die Low-Complexity Art (Kaum komplexe Kunst).

Weiterführendes Material zu diesem Thema gibt es auf der Website des Schweizer Instituts für künstliche Intelligenz IDSIA:
www.idsia.ch/~juergen/