

TITELTHEMA: DEUTUNG DER QUANTENMECHANIK

DAS UNIVERSUM ALS ZELLULÄRER AUTOMAT

von Manon Bischoff



Die theoretische Beschreibung der Quantenmechanik weist bis heute Lücken auf. Der niederländische Physiker Gerardus 't Hooft versucht sie zu schließen. Im Gespräch mit dem Nobelpreisträger von 1999 versuchen wir, seine Vorstellung von der Wirklichkeit zu ergründen.

Herr 't Hooft, im August 1980 haben Sie in »Spektrum der Wissenschaft« einen Artikel über das Standardmodell der Teilchenphysik publiziert, in dem Sie die Welt subatomarer Teilchen nach damaligen Wissensstand erklären. Wie hat sich dieses theoretische Konzept seither verändert?

Damals war es das einfachste mathematische Modell, das mit den experimentellen Daten übereinstimmte. Wir hätten nie gedacht, dass sich diese Theorie über so viele Jahrzehnte behaupten würde. Im Gegenteil: Wir hatten erwartet, dass mit fortschreitender Zeit einige Veränderungen nötig seien. Natürlich haben wir durch Experimente in der Zwischenzeit großartige Entdeckungen gemacht, etwa als die Wissenschaftler am CERN 2012 das Higgs-Teilchen fanden. Doch das theoretische Kon-

zept hat sich über die knapp vier Jahrzehnte kaum verändert. Einige Forscher haben neue Arten von Teilchen erwartet, die auf eine übergeordnete Theorie deuten würden, doch diese blieben bislang aus.

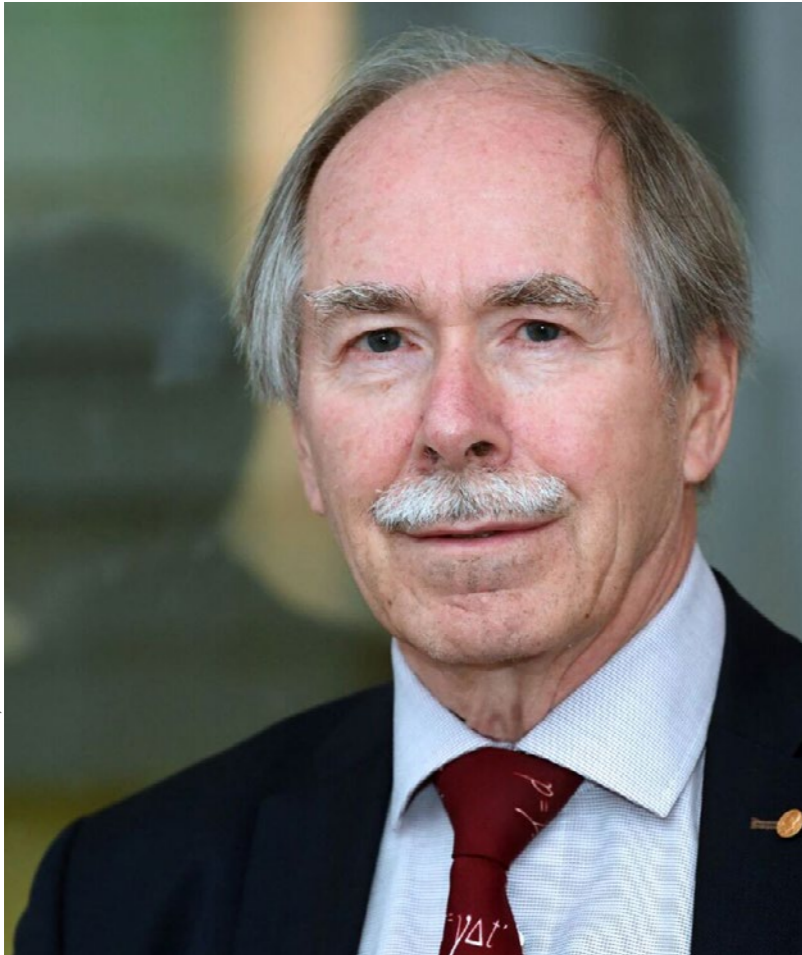
Das ist doch eine gute Nachricht, wenn das Standardmodell so gut passt.

Ja und nein. Denn selbst wenn es subatomare Partikel derzeit sehr gut beschreibt, birgt es einige Rätsel. Wir verstehen beispielsweise die fundamentalen Naturkonstanten nicht. Warum wiegt das Elektron genau so viel, wie es wiegt, und nicht mehr oder weniger? Die meisten Naturkonstanten können wir zwar sehr genau messen, aber wir wissen nicht, woher sie kommen. Jeder Versuch, die exakten Werte zu erklären, ist bisher gescheitert – bis auf das sogenannte anthropische Prinzip: Es besagt, dass die Naturkonstanten genau diese Werte haben, weil wir sonst nicht existieren

könnten. Allerdings sind die meisten Wissenschaftler mit dieser Argumentation unzufrieden.

Keine Theorie, die alle vier Grundkräfte vereinen soll, lässt sich derzeit experimentell überprüfen. Darum fordern viele Physiker, dass eine vereinheitlichte Theorie mathematisch gesehen einfach und elegant – »natürlich« – sein soll. Darin haben willkürlich anmutende Naturkonstanten keinen Platz. Den Begriff der Natürlichkeit prägten Sie bereits vor 40 Jahren. Sind Sie noch immer der Meinung, dass das der richtige Weg zu einer Weltformel ist, oder brauchen wir radikal neue Konzepte?

Diese Idee steht momentan stark unter Beschuss. Die »natürliche« Stringtheorie hat nämlich etliche Teilchen vorausgesagt, doch die Physiker am CERN konnten bisher kein einziges davon bestätigen. Ich weiß



Gerardus 't Hooft auf dem International Science Festival in Heidelberg.

nicht, ob die Natürlichkeit noch gerettet werden kann. Womöglich brauchen wir vollkommen neue Definitionen.

In Ihrem »Spektrum«-Artikel von 1980 haben Sie geschrieben, dass man »in den letzten Jahren [...] dem Ziel, eine übergreifende Theorie für alle vier Grundkräfte zu formulieren, nähergekommen« sei. Physiker suchen auch heute noch nach einer solchen Weltformel. Sind wir ihr nach 38 Jahren nun wirklich näher?

Das denke ich schon, allerdings haben wir noch einen weiten Weg vor uns. Dieser Bereich entwickelt sich sehr langsam. Dennoch haben sich die grundlegenden Ideen über die Jahre verändert: In der Stringtheorie nehmen die Forscher an, dass die Grundbausteine der Materie nicht punkt- sondern linienförmig sind. Doch wie gesagt, bisher ließ sich nichts davon bestätigen.

Glauben Sie noch an die Stringtheorie?

Viele Stringtheoretiker hatten gemeint, die Lösung fast gefunden zu haben. Ich habe immer gesagt, dass sie zu optimistisch sind. Das sollten sie nun endlich zugeben. Ehrlich gesagt denke ich, dass die String-

theorie einer Beschreibung unseres Universums nicht einmal nahe ist.

Welcher Ansatz erscheint Ihnen vielversprechender?

Momentan arbeite ich an möglichen Quanteneffekten, die in Schwarzen Löchern stattfinden können. So habe ich schon vor einigen Jahren bisher unbekannte Eigenschaften von Raum und Zeit enthüllt, etwa dass die Menge an Information im Raum begrenzt ist und mit der Oberfläche anwächst – und nicht wie erwartet mit dem Volumen. Es gibt weitere unglaubliche und ungeklärte Phänomene, beispielsweise, dass Schwarze Löcher Informationen zu vernichten scheinen. Ich gehe davon aus, dass wir noch viel von ihrer Erforschung lernen werden.

Neben Ihren kosmologischen Forschungsergebnissen haben Sie vor zwei Jahren ein Buch veröffentlicht, in dem Sie die Quantenmechanik aus einer neuen Perspektive darstellen. Warum sind Sie mit den bereits existierenden Interpretationen unzufrieden?

Mich stört, dass die ursprüngliche Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik, die auf Bohr und Heisenberg zurückgeht,

nicht erklärt, was im Kleinsten wirklich geschieht. Bei Experimenten messen wir etwas und erhalten ein Ergebnis, doch wir wissen nicht, wie es dazu kam. Wir strahlen beispielsweise ein Elektron auf einen **Doppelspalt** und können messen, durch welchen Spalt es gegangen ist, ohne zu wissen warum. Ein anderes Elektron könnte im nächsten Versuch den anderen Spalt durchqueren. Was genau ist mit dem Teilchen geschehen, so dass wir genau dieses Ergebnis messen? Das Problem ist, dass wir den exakten Ausgang eines einzelnen Experiments nicht vorhersagen können – die Quantenmechanik erlaubt uns lediglich, die Wahrscheinlichkeiten für alle möglichen Ergebnisse zu berechnen. Wenn wir ein und denselben Versuch 100-mal wiederholen, können wir abschätzen, wie oft dieses oder jenes Ereignis eintritt. Anders gesagt: Durch statistische Methoden treffen wir korrekte Vorhersagen. Doch das allein genügt mir nicht; ich möchte erfahren, was wirklich vor sich geht.

Es gibt neben der Kopenhagener Deutung ja auch noch andere **Interpretationen der Quantenmechanik. Was halten Sie von ihnen?**

In der Tat gibt es etliche Deutungen. Viele Physiker stört nämlich das fehlende Verständnis von Wirklichkeit. Die zwei bekanntesten Interpretationen, die Realität berücksichtigen, sind die **bohmsche Mechanik** und die **Viele-Welten-Theorie**. In beiden nehmen die Forscher an, dass alle möglichen Ausgänge eines Experiments tatsächlich eintreten – und zwar in parallelen Universen. Das halte ich jedoch für ein sehr fragwürdiges Konzept. Ich denke, dass die Wissenschaft die wahren Antworten noch nicht kennt; wir sind bisher einfach zu dumm.

In Ihrem Buch beschreiben Sie die Quantenmechanik durch **zelluläre Automaten. Was hat es damit auf sich?**

Ein zellulärer Automat ist ein einfaches Computermodell eines zeitlich veränderlichen Systems. Der Automat setzt sich aus zwei-, drei- oder mehrdimensionalen Zellen zusammen, die ein Gitter bilden. In den Zellen sind die zeitlich veränderlichen Eigenschaften der Theorie eingetragen, die »Freiheitsgrade«, wie der Ort oder die Geschwindigkeit eines Teilchens. Um die Naturgesetze nachzuahmen, gebe ich vor, dass eine Zelle zu jedem Zeitpunkt nur ihre

Nachbarzellen beeinflusst. Mit fortschreitender Zeit wird das System immer komplizierter, und irgendwann können schließlich alle Zellen miteinander wechselwirken.

Wie kamen Sie auf die Idee, die Quantenmechanik so zu beschreiben?

Der Knackpunkt der Quantenmechanik ist, dass sie **nicht kontinuierlich** ist. Die dynamischen Variablen – beispielsweise die Energie eines Teilchens – ändern sich immer nur stufenweise, sie sind »**gequantelt**«. Und genau diese Eigenschaft zeichnet auch die Einträge zellulärer Automaten aus, hier also die Freiheitsgrade.

Welche Vorteile bietet Ihre Beschreibung gegenüber anderen Formulierungen?

Sie ist extrem effizient. In der Viele-Welten-Interpretation und der bohmschen Mechanik nehmen Forscher an, dass es fast unendlich viele verschiedene Universen gibt. Das Modell eines zellulären Automaten umfasst dagegen bloß ein Universum und ist dadurch wesentlich ergiebiger.

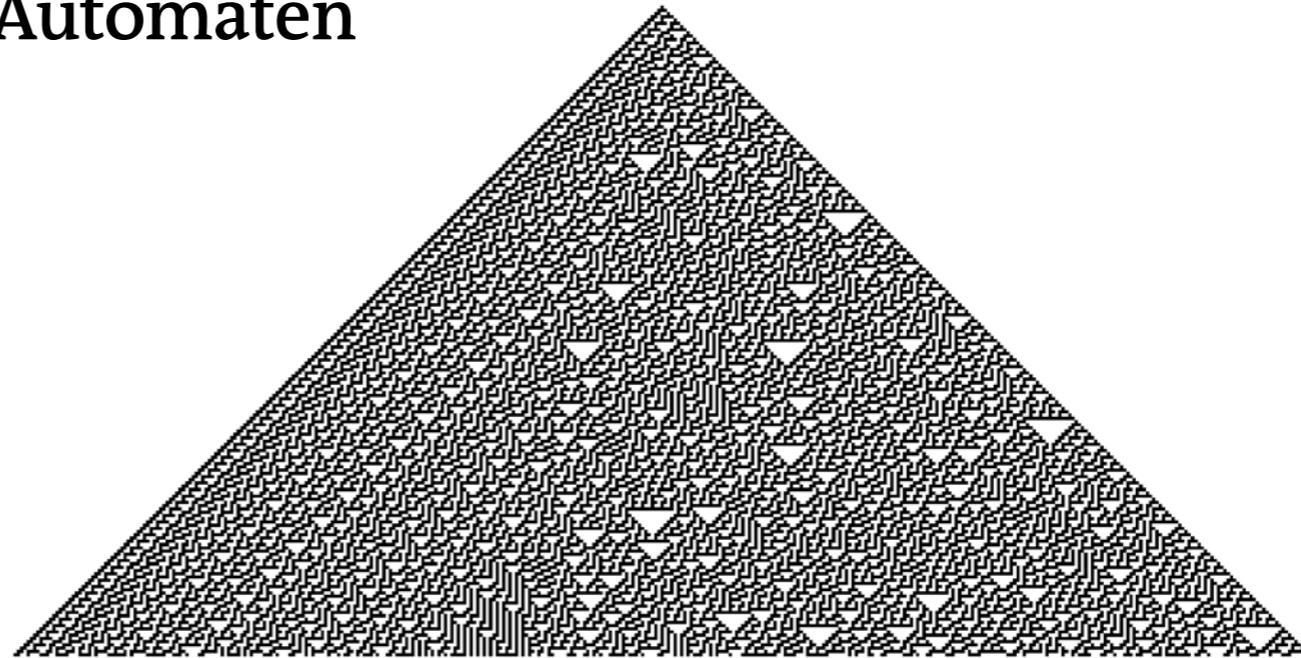
Glauben Sie, dass unser Universum ein zellulärer Automat ist?

Dem Prinzip nach **ja**. Denn beide Systeme teilen ähnliche Eigenschaften: Anfangs sind sie sehr einfach – das Universum ist äußerst klein und relativ homogen, und der zelluläre Automat hat einen unkomplizierten Ausgangszustand. Dann dehnen sie sich immer weiter aus und werden komplexer. Ich denke aber, dass meine Theorie vermutlich nur ein grob vereinfachtes Modell der Wirklichkeit darstellt. Die Zellen des Automaten könnten in viel komplizierteren Strukturen angeordnet sein als in den einfachen Gittern, die ich mir vorstelle.

Aus wie vielen Zellen bestünde ein Automat, der das gesamte Universum simuliert?

Im Prinzip bräuchten wir zu jedem Freiheitsgrad im Universum eine Zelle. Ein Freiheitsgrad entspricht einem Bit an Information. Nun besitzen alle existierenden Teilchen mehrere Freiheitsgrade, hinzu kommen noch die Eigenschaften von Raum und Zeit. Wie bereits erwähnt, haben wir herausgefunden, dass das Maß an Information im Universum begrenzt ist. Eine Fläche von einem Quadratmeter im dreidimensionalen Raum enthält unseren Berechnungen zufolge maximal 10^{69} Bit. Die-

Beispiel für einen einfachen zellulären Automaten



Einer der einfachsten zellulären Automaten ist eindimensional und enthält nur Nullen und Einsen. Der Anfangszustand, also die erste Zeile des Automaten, besteht in diesem Beispiel aus 15 Zellen, die alle Null sind, bis auf eine Eins in der Mitte. Nach jedem Zeitschritt baut sich unter der Zahlenfolge eine weitere auf, wobei der Automat die Vorschrift befolgt: Tritt über der neuen Zahlenreihe folgende Dreierkombination auf, ersetzt er die mittlere Zahl durch eine Neue:

000	111	110	101	100	011	010	110
0	0	0	0	1	1	1	1

Der zelluläre Automat liefert dann:

```
000000010000000
000000111000000
000001100100000
000011011110000
000110010001000
```

Dies lässt sich besser visualisieren, indem man die Nullen weiß färbt und die Einsen schwarz. Wählt man zudem mehr Einträge in der ersten Zeile und führt das zuvor beschriebene Schema weiter fort, ergibt sich das obige interessante Muster.

se Zahl ist endlich, wenn auch unvorstellbar groß: Sie übersteigt die Anzahl der Atome in der Milchstraße um ein Zehnfaches. Wir brauchen statistische Methoden, um mit einer solchen Menge an Information umzugehen. Und als genau das sehe ich die **Quantenmechanik**: Ein Modell, das eine riesige Zahl an Freiheitsgraden statistisch verarbeitet.

Ein zellulärer Automat ist ein klassisches Objekt und folgt damit nicht den Gesetzen der Quantenwelt. In den 1960er Jahren hat der Physiker John Bell allerdings bewiesen, dass es keine klassische Beschreibung der Quantenmechanik geben kann. Was bedeutet das für Ihre Arbeit?

Viele Wissenschaftler führen diese so genannten **No-go-Theoreme** als ernste Herausforderung meines Modells an. Aus den Theoremen folgt, dass die Quantenmechanik nicht durch eine klassische Theorie beschrieben werden kann, die lokal ist. Damit ist gemeint, dass sich Information weder rückwärts in der Zeit noch schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten darf. Die Theoreme setzen aber voraus, dass ein **Beobachter** einen **freien Willen** hat: Er muss

beispielsweise frei entscheiden können, ob er den Impuls oder den Ort eines Teilchens messen will. Wenn das Universum aber ein zellulärer Automat ist, dann ist der Experimentator selbst auch ein Teil davon. Die Wahl seiner Messung ist durch den Automaten also schon festgelegt – aus diesem Grund lassen sich die No-go-Theoreme gar nicht auf mein Modell anwenden.

Sie glauben also nicht an einen freien Willen?

Ich glaube, dass alle Naturgesetze vollkommen deterministisch sind. Nichts geschieht ohne Grund. Allerdings spielen dabei so viele Variablen eine Rolle, dass niemand sie jemals alle verstehen, geschweige denn kontrollieren kann. Darum gibt es in der Praxis überall so etwas wie einen freien Willen.

Trotz Ihrer Erklärung behaupten dennoch einige Wissenschaftler, dass Ihr Modell nicht lokal ist und damit den bellschen No-go-Theoremen nicht entgegen. Woran liegt das?

Der zelluläre Automat führt zu unglaublich starken Verbindungen zwischen den einzelnen Zellen. Wir verstehen noch nicht

richtig, wie sich diese Korrelationen zeitlich entwickeln. Sie führen aber zu interessanten Phänomenen, die uns dazu bringen, Lokalität neu zu definieren. Viele Wissenschaftler zitieren die Definitionen von Bell – mit denen ich nicht ganz einverstanden bin – und behaupten deshalb, in meinem Modell müsste sich Information in der Zeit zurückbewegen. Doch das scheint nur so, wenn man die starken Wechselwirkungen zwischen den Zellen nicht versteht. Wir müssen endlich versuchen zu begreifen, wie sich Information zeitlich entwickelt und ausbreitet.

Folgen Sie Blogs oder Foren im Internet und holen so die Meinungen anderer Wissenschaftler ein?

Ich habe mit einigen Philosophen über Determinismus und Willensfreiheit diskutiert, das war allerdings nicht immer einfach. Ansonsten beobachte ich, ob andere Forscher meinen Aussagen widersprechen. Dann möchte ich mich verteidigen und herausfinden, warum die Person nicht überzeugt ist. Manchmal hat jemand gute Gründe, die ich gerne verstehen möchte. Doch einige Leute haben sich völlig darauf versteift, dass sich die Quantenmechanik fun-

damental von einer klassischen Theorie unterscheiden muss. Deren Blogs helfen mir nicht wirklich weiter. Ich höre dann ab einem bestimmten Punkt auf, mich weiter damit zu beschäftigen.

Sie haben eine neue Interpretation der Quantenmechanik entwickelt. Die zu Grunde liegenden Formeln und Gesetzmäßigkeiten bleiben dabei unverändert. Hoffen Sie dennoch, durch Ihre Deutung auf eine neue Physik zu stoßen?

Wenn wir die Quantenmechanik besser verstehen, könnten wir genauere Modelle der Natur entwickeln. Eines meiner Ziele ist es ja, subatomare Teilchen besser zu verstehen.

Wie nah sind Sie diesem Ziel? Können Sie schon das Standardmodell der Teilchenphysik beschreiben?

Nein, wir sind noch recht weit davon entfernt. Ehrlich gesagt hoffe ich, dass eines Tages ein brillanter junger Mensch mit fabelhaften neuen Ideen auftaucht und uns weiterbringt. Eventuell müssen wir erst die Gravitation besser verstehen, um unsere Probleme zu lösen.

Die Theorie subatomarer Teilchen mit der Gravitation zu verbinden, zählt zu den schwierigsten Aufgaben der Physik. Wäre es nicht sinnvoller, mit einem einfacheren Problem zu starten?

Nicht unbedingt. Die Gravitation ist eine fundamentale Eigenschaft der Natur: Alles unterliegt ihr, und nichts kann ihr entkommen; sie krümmt sogar die Raumzeit. Wir haben anfangs versucht, eine Theorie subatomarer Teilchen ohne Gravitation zu entwickeln. Doch das ist extrem kompliziert, wir haben sehr viel Arbeit hineingesteckt und keine nennenswerten Erfolge verbucht. Es scheint so, als ob wir etwas übersehen. Und das tun wir tatsächlich: Wir vernachlässigen die Gravitation. Solange man sie nicht versteht, kann man möglicherweise keinen passenden zellulären Automaten formulieren.

Außerhalb der Physik sind Sie Botschafter des niederländischen Projekts Mars One, das bis 2040 den Roten Planeten besiedeln möchte. Wie begann Ihre Begeisterung für diese Mission?

Sie begann, als ich ein paar junge, enthusiastische Menschen kennen lernte. Sie rann-

ten mit dieser Idee herum, dass es an der Zeit wäre, über bemannte Marskolonien nachzudenken. Ich stimmte mit ihnen überein – auch wenn sie damals in ihrer Zeit- und Finanzplanung viel zu optimistisch waren. Selbst wenn die Siedler nicht auf die Erde zurückkehren, bringt ein solches Projekt erhebliche Kosten mit sich. Heute meine ich, dass wir zuerst über Kolonien auf dem Mond nachdenken sollten. Dennoch möchte ich die Menschen ermutigen, an solchen Ideen zu arbeiten. Auch wenn es noch ein langer Weg dorthin ist, bin ich überzeugt, dass wir in ferner Zukunft den Weltraum im großen Stil besiedeln werden. ↩

Das Interview fand während des vom DAI (Deutsch-Amerikanisches-Institut) organisierten »Geist Heidelberg – International Science Festival« statt.