

# 11 Eine moderne Interpretation der Quantenmechanik

## Die Quantenmechanik und die klassische Näherung

Als die Quantenmechanik entdeckt wurde, beeindruckte die Wissenschaftler am meisten der Gegensatz zwischen ihrem wahrscheinlichkeitstheoretischen Charakter und dem Determinismus der älteren, klassischen Physik, in der die genaue und vollständige Information über einen Anfangszustand grundsätzlich die genaue und vollständige Bestimmung des Endzustandes erlaubt, sofern nur die richtige Theorie verwendet wird. Ein derartiger Determinismus ist in der Quantenmechanik zwar niemals uneingeschränkt, aber oft näherungsweise gültig. Das betrifft die häufigen Fälle, in denen die klassische Physik annähernd richtige Ergebnisse liefert und die wir zusammenfassend als quasiklassischen Bereich bezeichnen können. Dieser quasiklassische Bereich umfaßt, grob gesprochen, das Verhalten schwerer Objekte. So läßt sich beispielsweise die Bewegung der Planeten um die Sonne für praktische Zwecke ohne quantenmechanische Korrekturen berechnen, die bei einem solchen Problem völlig vernachlässigt werden können. Wenn der quasiklassische Bereich nicht so bedeutsam wäre, hätten die Physiker die klassische Physik ursprünglich gar nicht erst entwickelt und angewandt, und klassische Theorien, wie die von Maxwell und Einstein, hätten die Ergebnisse von Beobachtungen nicht auf so erstaunlich präzise Weise Vorhersagen können. Dies ist ein weiterer Fall, in dem das alte Paradigma (im Sinne Thomas Kuhns) nicht durch ein neues Paradigma ersetzt wird, sondern innerhalb bestimmter Grenzen eine gültige Näherung bleibt (wie die Newtonsche Gravitation, die für Geschwindigkeiten weit unterhalb der Lichtgeschwindigkeit auch weiterhin eine äußerst nützliche Näherung der Einsteinschen Gravitationstheorie bleibt.) Dennoch stellt die klassische Physik nur eine Näherung dar, während die Quantenmechanik, nach unserem gegenwärtigen Kenntnisstand, vollkommen korrekt ist. Obgleich seit Entdeckung der Quantenmechanik im Jahre 1924 viele Jahrzehnte vergangen sind, nähern sich die Physiker erst jetzt einer wirklich befriedigenden Interpretation dieser Theorie, die uns ein tiefes Verständnis dessen gewährt, wie der quasiklassische Bereich unserer Alltagserfahrung aus der fundamentalen quantenmechanischen Eigenart der Natur hervorgeht.

## **Die approximative Quantenmechanik gemessener Systeme**

Die ursprüngliche, von ihren Entdeckern formulierte Version der Quantenmechanik wurde häufig - und wird noch immer - auf eine merkwürdig verkürzende und anthropozentrische Weise dargestellt. Man geht dabei mehr oder weniger von der Annahme aus, irgendeine experimentelle Situation (wie der radioaktive Zerfall einer bestimmten Kernart) werde immer wieder auf gleiche Weise wiederholt. Das Ergebnis des Experiments werde jedesmal - vorzugsweise von einem Physiker, der sich dabei einer technischen Vorrichtung bedient - beobachtet. Man hält es für wichtig, daß der Physiker und die Vorrichtung außerhalb des untersuchten Systems stehen. Der Physiker verzeichne die Eintrittshäufigkeiten der verschiedenen möglichen Ergebnisse des Experiments (wie etwa der Zerfallszeiten). Mit steigender Zahl der Experimente würden diese Häufigkeiten zu Näherungswerten für die Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen Ergebnisse, die von der quantenmechanischen Theorie vorhergesagt werden. (Die Wahrscheinlichkeit des radioaktiven Zerfalls als einer Funktion der Zeit steht in unmittelbarer Beziehung zum Prozentsatz der Atomkerne, die nach verschiedenen Zeitintervallen noch nicht zerfallen sind; dieser Prozentsatz ist in der Kurve auf Seite 201 dargestellt. Die Zerfallswahrscheinlichkeit folgt einer ähnlichen Kurve.)

Die ursprüngliche Interpretation der Quantenmechanik, die sich auf Serien gleicher Experimente, die außenstehende Beobachter durchführten, beschränkte, ist viel zu speziell, als daß sie heute als die fundamentale Beschreibung anerkannt werden könnte - zumal immer deutlicher geworden ist, daß die Quantenmechanik für das gesamte Universum gelten muß. Die ursprüngliche Interpretation ist nicht falsch, sie gilt jedoch nur für die Zustände, für deren Beschreibung sie entwickelt wurde. Allgemein betrachtet, muß sie zudem nicht nur als Sonderfall, sondern auch als Näherung gelten. Wir können sie daher als »approximative Quantenmechanik gemessener Systeme« bezeichnen.

## **Die moderne Interpretation**

Für die Beschreibung des Universums als Ganzes bedarf es zweifellos einer allgemeineren Interpretation der Quantenmechanik, da es in diesem

Fall weder einen außenstehenden Beobachter noch eine externe Apparatur und keine Möglichkeit der Wiederholung, der Beobachtung zahlreicher Kopien des Universums, gibt. (Jedenfalls dürfte es dem Universum ganz gleich sein, ob auf irgendeinem abgelegenen Planeten der Mensch entstanden ist, der die Geschichte des Weltalls aufklären will. Das Universum gehorcht den quantenmechanischen Gesetzen der Physik unabhängig davon, ob es von Physikern beobachtet wird.) Das ist einer der Gründe, weshalb in den letzten Jahrzehnten eine moderne Interpretation der Quantenmechanik ausgearbeitet wurde. Der zweite ausschlaggebende Grund ist das Bedürfnis, den Zusammenhang zwischen der Quantenmechanik und der approximativen klassischen Beschreibung der Welt um uns herum besser zu verstehen.

In frühen Darstellungen der Quantenmechanik ist oft implizit, manchmal auch explizit behauptet worden, es gebe einen klassischen Bereich *neben* der Quantenmechanik, so daß eine umfassende physikalische Theorie neben quantenmechanischen auch klassische Gesetze enthalten müsse. Während diese Einteilung eine Generation von Wissenschaftlern, deren Weltbild von der klassischen Physik geprägt war, befriedigt haben mag, erachten viele zeitgenössische Physiker sie als künstlich und überflüssig. Die moderne Interpretation der Quantenmechanik geht davon aus, daß der quasiklassische Bereich aus den quantenmechanischen Gesetzen einschließlich des Anfangszustandes zu Beginn der Expansion des Universums hervorgegangen ist. Eine der Hauptschwierigkeiten liegt in der Frage, wie diese Emergenz geschah.

Einer der Wegbereiter der modernen Interpretation war der verstorbene Hugh Everett III, der damals bei John A. Wheeler in Princeton studierte und später Mitglied der Weapons Systems Evaluation Group im Pentagon war. Nach ihm haben mehrere theoretische Physiker einschließlich James (»Jim«) Hartle und mir selbst an diesem Vorhaben gearbeitet. Hartle (der an der University of California in Santa Barbara lehrt und auch am Santa Fe Institute arbeitet) ist ein berühmter theoretischer Kosmologe und ein Experte in Einsteins allgemein-relativistischer Gravitationstheorie. Zu Beginn der sechziger Jahre betreute ich am Caltech seine Doktorarbeit über die Theorie der Elementarteilchen. Später schrieb er zusammen mit Stephen Hawking die bahnbrechende Abhandlung »Die Wellenfunktion des Universums«, die von grundlegender Bedeutung für die Quantenkosmologie sein sollte. Seit 1986 arbeiten Hartle und ich gemeinsam an einer

modernen Interpretation der Quantenmechanik, insbesondere in ihrer Beziehung zum quasiklassischen Bereich.

Wir halten Everetts Leistung für nützlich und wichtig, doch zugleich glauben wir, daß noch sehr viel Arbeit vor uns liegt. Zudem hat seine Terminologie und die seiner späteren Kommentatoren in manchen Fällen für Verwirrung gesorgt. So wird seine Interpretation oftmals mit dem Begriff »Vielwelten« beschrieben, während unserer Ansicht nach eigentlich »viele alternative Geschichten des Universums« gemeint sind. Ferner heißt es von diesen »Vielwelten«, sie seien »alle gleich real«, während wir es für weniger mißverständlich halten, von »vielen Geschichten, die mit Ausnahme ihrer unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten in der Theorie gleich behandelt werden«, zu sprechen. Die von uns empfohlene Terminologie baut auf der vertrauten Vorstellung auf, daß ein bestimmtes System verschiedene mögliche Geschichten durchlaufen kann, die jeweils ihre spezifischen Wahrscheinlichkeiten besitzen. Man sollte nicht unnötig Verwirrung stiften mit dem Versuch, sich viele »parallele Universen«, die alle gleich real sind, zu denken. (Ein bekannter Physiker und Experte in Quantenmechanik folgerte aus bestimmten Kommentaren zu Everetts Interpretation, daß jeder, der daran glaubt, eigentlich voller Begeisterung russisches Roulette mit hohem Einsatz spielen sollte, weil der Spieler in einigen der »gleich realen« Welten überleben und reich sein würde.)

Ein weiteres terminologisches Problem besteht darin, daß Everett in den meisten Zusammenhängen den Begriff »Wahrscheinlichkeit« vermied und statt dessen den weniger geläufigen, aber mathematisch gleichwertigen Begriff »Maß« verwendete; Hartle und ich sehen darin keinerlei Vorteil. Doch abgesehen von den terminologischen Unklarheiten ließ Everett zahlreiche wichtige Fragen unbeantwortet, so daß die Hauptschwierigkeit nicht in der Begrifflichkeit liegt, sondern in der Beseitigung dieser Lücken in unserem Verständnis der Quantenmechanik.

Jim Hartle und ich gehören zu einer internationalen Gruppe theoretischer Physiker, die mit verschiedenen Ansätzen an einer modernen Interpretation der Quantenmechanik arbeiten. Besonders wertvolle Beiträge stammen von Robert Griffiths und Roland Omnès, die wie wir von der großen Bedeutung von Geschichten überzeugt sind, sowie von Erich Joos, Dieter Zeh und Wojciech (»Wojtek«) Żurek, die leicht abweichende Ansichten vertreten. Die Formulierung der Quantenmechanik auf der Grundlage des Geschichtenmodells geht auf Richard (»Dick«)

Feynman zurück, der auf früheren Arbeiten Paul Diracs aufbaute. Diese Formulierung hilft nicht nur bei der begrifflichen Klärung der modernen Interpretation der Quantenmechanik, sondern auch und vor allem bei der Beschreibung der Quantenmechanik, wenn, wie im Fall der Quantenkosmologie, die relativistische Gravitationstheorie berücksichtigt werden muß. Man geht hierbei davon aus, daß die Geometrie der Raumzeit der quantenmechanischen Unbestimmtheit unterliegt, und die mit Geschichten arbeitende Methode bewältigt diese Situation besonders gut.

## **Der Quantenzustand des Universums**

Grundlegend für jede Behandlung der Quantenmechanik ist der Begriff des Quantenzustands. Betrachten wir dazu ein leicht vereinfachtes Bild des Universums, in dem jedes Teilchen außer seinem Ort und seinem Impuls keine weiteren Eigenschaften besitzt und in dem die Ununterscheidbarkeit sämtlicher Teilchen einer bestimmten Klasse (beispielsweise die Austauschbarkeit sämtlicher Elektronen) außer Betracht bleibt. Was versteht man dann unter einem Quantenzustand des gesamten Universums? Es empfiehlt sich, zunächst den Quantenzustand eines einzelnen Teilchens und dann zweier Teilchen zu erörtern, bevor man das ganze Universum angeht.

In der klassischen Physik wäre es zulässig gewesen, gleichzeitig Ort und Impuls eines bestimmten Teilchens mit beliebiger Genauigkeit zu bestimmen; in der Quantenmechanik dagegen ist dies bekanntlich aufgrund der Unbestimmtheitsrelation nicht erlaubt. Je genauer man den Ort eines Teilchens festlegt, um so unsicherer ist sein Impuls; diese Situation kennzeichnet einen bestimmten Quantenzustand eines einzelnen Teilchens, und zwar einen Zustand genauer Bestimmtheit des Ortes. In einem anderen Quantenzustand ist zwar der Impuls des Teilchens genau bekannt, der Ort aber völlig unbestimmt. Es gibt eine unendliche Zahl weiterer möglicher Quantenzustände für ein einzelnes Teilchen, in denen weder der Ort noch der Impuls genau bestimmt sind, sondern nur eine verschmierte Wahrscheinlichkeitsverteilung für beide existiert. So kann sich beispielsweise in einem Wasserstoffatom, das aus einem (negativ geladenen) Elektron im elektrischen Feld eines (positiv geladenen) Protons besteht, das Elektron im Quantenzustand der niedrigsten Energie befinden,

in dem sein Ort über einen atomaren Bereich »verschmiert« ist und auch sein Impuls eine entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilung aufweist.

Betrachten wir nun ein »Universum« aus zwei Elektronen. Es ist theoretisch möglich, daß sich jedes Elektron unabhängig vom anderen in einem bestimmten Quantenzustand befindet. In der Praxis geschieht das jedoch nicht oft, weil die beiden Elektronen, vor allem durch die elektrische Abstoßung zwischen ihnen, miteinander wechselwirken. Das Heliumatom beispielsweise besteht aus zwei Elektronen im elektrischen Feld eines zweifach positiv geladenen Atomkerns. Im niedrigsten Energiezustand des Heliumatoms trifft nicht zu, daß sich jedes der beiden Elektronen unabhängig vom anderen in einem bestimmten Quantenzustand befindet, obgleich man mitunter näherungsweise von einer solchen Situation ausgeht. Infolge der Wechselwirkung zwischen den Elektronen ist ihr gemeinsamer Quantenzustand vielmehr ein solcher, in dem die Quantenzustände der beiden Elektronen eng miteinander verzahnt (korreliert) sind. Interessiert man sich nur für eines der beiden Elektronen, kann man sämtliche Orte (oder Impulse oder Werte irgendeines anderen Merkmals) des zweiten Elektrons »aufsummieren«. Das erste Elektron befindet sich dann nicht in einem bestimmten (»reinen«) Quantenzustand, sondern besitzt eine Reihe von Wahrscheinlichkeiten für mehrere reine Einelektronen-Quantenzustände. Ein solches Elektron befindet sich in einem sogenannten gemischten Quantenzustand.

Wir können nun gleich zur Betrachtung des gesamten Universums übergehen. Wenn sich das Universum in einem reinen Quantenzustand befände, dann wären die Quantenzustände aller Einzelteilchen im Weltall miteinander verknüpft. Würden wir dann sämtliche Zustände einiger Teile des Universums »aufsummieren«, erhielten wir für den Rest des Universums (den Bereich, der »verfolgt« und nicht aufsummiert wird) einen gemischten Quantenzustand.

Das Universum als Ganzes befindet sich möglicherweise in einem reinen Quantenzustand. Hartle und Hawking, die von dieser Annahme ausgehen, haben für den reinen Zustand, der zu Beginn der Expansion des Universums existierte, eine spezielle Form vorgeschlagen. Wie schon erwähnt, beschreibt ihre Hypothese diesen ursprünglichen Quantenzustand des Universums mit Hilfe der vereinheitlichten Theorie der Elementarteilchen. Diese vereinheitlichte Theorie erklärt auch, wie sich der Quantenzustand mit der Zeit verändert. Aber nicht einmal dann, wenn

man den Quantenzustand des gesamten Universums - nicht nur zu Beginn, sondern für jeden beliebigen Zeitpunkt - vollständig beschreiben, hätte man eine Interpretation der Quantenmechanik.

Der Quantenzustand des Universums gleicht einem Buch, das die Antworten auf unzählige verschiedene Fragen enthält. Doch ohne eine Liste von Fragen, die man an das Buch richtet, ist es relativ nutzlos. Die moderne Interpretation der Quantenmechanik beginnt demnach mit einer Erörterung der geeigneten Fragen, die man zum Quantenzustand des Universums stellen kann.

Da die Quantenmechanik probabilistisch und nicht deterministisch ist, haben diese Fragen zwangsläufig mit Wahrscheinlichkeiten zu tun. Hartle und ich machen uns, wie Griffiths und Omnès, die Tatsache zunutze, daß die Fragen sich letztlich immer auf alternative Geschichten des Universums beziehen. (Wenn wir den Begriff Geschichte verwenden, so nicht um die Vergangenheit auf Kosten der Zukunft hervorzuheben; auch verstehen wir darunter nicht in erster Linie schriftliche Zeugnisse im Sinne der Kulturgeschichte. Geschichte ist in unserem Verständnis einfach eine Schilderung einer zeitlichen Folge von Ereignissen - in der Vergangenheit, Gegenwart oder Zukunft. Die Fragen über alternative Geschichten können beispielsweise lauten: »Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, daß sich gerade diese spezifische Geschichte des Universums verwirklicht und nicht eine alternative Geschichte?« oder: »Vorausgesetzt, diese Annahmen über eine Geschichte des Universums sind wahr. Wie hoch ist dann die Wahrscheinlichkeit, daß die zusätzlichen Aussagen ebenfalls wahr sind?« Diese letzte Frage erscheint oftmals in der geläufigeren Formulierung: »Vorausgesetzt, diese Annahmen über die Vergangenheit oder die Gegenwart sind wahr. Wie hoch ist dann die Wahrscheinlichkeit, daß sich die Aussagen über die Zukunft bewahrheiten?«

## **Alternative Geschichten auf der Galopprennbahn**

Ein Ort, an dem man Erfahrungen mit Wahrscheinlichkeiten sammeln kann, ist eine Galopprennbahn, wo Wahrscheinlichkeiten sich auf das beziehen, was man echte Siegeschancen nennen könnte. Wenn die echten Siegeschancen eines bestimmten Pferdes 1 zu 3 stehen, dann beträgt die Wahrscheinlichkeit, daß das Pferd siegt,  $1/4$ ; stehen die Chancen 1 zu 2, ist die Wahrscheinlichkeit  $1/3$  und so weiter. (Selbstverständlich sind die

tatsächlich an der Rennbahn angezeigten Gewinnchancen keine echten Chancen und entsprechen somit keinen echten Wahrscheinlichkeiten. Wir werden später auf diesen Punkt zurückkommen.) Nehmen an einem Rennen zehn Pferde teil, dann hat jedes Pferd irgendeine positive Siegeswahrscheinlichkeit (die sich bei einer lahmen Mähre allerdings auf Null reduziert!), und diese zehn Wahrscheinlichkeiten addieren sich zu 1, wenn es unter den Pferden nur einen Sieger geben kann. Die zehn alternativen Ergebnisse sind dann *disjunkt* (nur eines kann eintreten) und *vollständig* (eines davon muß eintreten). Eine offenkundige Eigenschaft dieser zehn Wahrscheinlichkeiten ist, daß sie *additiv* sind; die Wahrscheinlichkeit, daß entweder das dritte oder das vierte Pferd siegen wird, ist gleich der Summe der einzelnen Siegeswahrscheinlichkeiten des dritten und des vierten Pferdes.

Eine noch größere Parallele zwischen den Siegeschancen beim Galopprennen und Geschichten des Universums kann man ziehen, wenn man eine Folge von Galopprennen betrachtet, zum Beispiel acht Rennen mit jeweils zehn Pferden. Nehmen wir der Einfachheit halber an, daß nur der Sieg zählt (nicht die Zweitoder Drittplatzierung) und daß es pro Rennen nur einen Sieger gibt (keine toten Rennen). Jede Liste mit acht Siegern ist dann eine Art Geschichte, und diese Geschichten sind disjunkt und vollständig, wie bei einem einzelnen Rennen. Die Anzahl der alternativen Geschichten ist gleich dem Produkt von acht Zehnerfaktoren (einer für jedes Rennen), also insgesamt hundert Millionen.

Die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Siegesfolgen addieren sich genauso wie die Siegeswahrscheinlichkeiten der einzelnen Pferde in einem Rennen: die Wahrscheinlichkeit, daß sich eine bestimmte Siegesfolge oder eine andere verwirklicht, ist gleich der Summe der Einzelwahrscheinlichkeiten der beiden Folgen. Einen Zustand, in dem entweder eine Folge oder eine andere eintritt, kann man eine »kombinierte Geschichte« nennen.

Bezeichnen wir nun die beiden alternativen Geschichten als A und B. Die additive Eigenschaft fordert dann, daß die Wahrscheinlichkeit der kombinierten Geschichte »A oder B« gleich der Wahrscheinlichkeit von A plus der Wahrscheinlichkeit von B ist. In anderen Worten: Die Wahrscheinlichkeit, daß ich morgen nach Paris fliege oder zu Hause bleibe, ist gleich der Summe der Wahrscheinlichkeiten, nach Paris zu fliegen und zu Hause zu bleiben. Eine Größe, die dieser Regel nicht ge-

horcht, ist keine Wahrscheinlichkeit.

## Alternative Geschichten in der Quantenmechanik

Angenommen, wir betrachteten eine Menge alternativer Geschichten des Universums und diese Geschichten seien vollständig und disjunkt. Schreibt die Quantenmechanik nun immer jeder Geschichte eine bestimmte Wahrscheinlichkeit zu? Überraschenderweise ist dies nicht immer der Fall. Vielmehr ordnet sie jedem *Paar* von Geschichten die Größe  $D$  zu, und sie liefert eine Regel für die Berechnung von  $D$  in Abhängigkeit vom Quantenzustand des Universums. Die beiden Geschichten eines gegebenen Paares können verschieden sein, wie etwa die Alternativen A und B, oder auch gleich, wie etwa A und A. Der Wert von  $D$  wird durch einen Ausdruck wie etwa  $D(A, B)$ , sprich:  $D$  von A und B, angegeben. Sind die Geschichten des Paares beide A, dann erhalten wir  $D(A, A)$ . Bilden beide die kombinierte Geschichte A oder B, dann wird der Wert von  $D$  als  $D(A \text{ oder } B, A \text{ oder } B)$  bezeichnet.

Wenn die beiden Geschichten eines Paares gleich sind, ist  $D$  - wie ein Wahrscheinlichkeitswert - eine Zahl zwischen Null und Eins. Tatsächlich kann  $D$  unter bestimmten Bedingungen als Wahrscheinlichkeit der Geschichte interpretiert werden. Um diese Bedingungen herauszufinden, untersuchen wir die Beziehung zwischen den folgenden Größen:

$$D(A \text{ oder } B, A \text{ oder } B)$$

$$D(A, A)$$

$$D(B, B)$$

$$D(A, B) \text{ plus } D(B, A).$$

Die ersten drei Größen sind Zahlen zwischen Null und Eins und gleichen somit Wahrscheinlichkeiten. Die letzte Größe kann größer oder kleiner oder gleich Null sein und ist keine Wahrscheinlichkeit. Die Regel für die Berechnung von  $D$  schreibt in der Quantenmechanik vor, daß die erste Größe die Summe der drei anderen Größen ist. Wenn jedoch die letzte Größe immer gleich null ist, sobald sich A und B voneinander unterscheiden, ist  $D(A \text{ oder } B, A \text{ oder } B)$  genau gleich  $D(A, A)$  plus  $D(B, B)$ . Mit anderen Worten: Wenn  $D$  immer null ist, sobald die beiden Geschichten unterschiedlich sind, dann besitzt  $D$  von einer Geschichte und derselben Geschichte immer die additive Eigenschaft und kann somit als Wahrscheinlichkeit dieser Geschichte interpretiert werden.

Die vierte Größe in der obenstehenden Liste heißt Interferenzterm zwischen den Geschichten A und B. Wenn sie *nicht* für jedes Paar verschiedener Geschichten in der Menge null ist, kann man diesen Geschichten in der Quantenmechanik keine Wahrscheinlichkeiten zuordnen. Sie »interferieren« (überschneiden sich).

Da die Quantenmechanik bestenfalls Wahrscheinlichkeiten vorhersagen kann, versagt sie bei Geschichten, die miteinander interferieren. Derlei Geschichten sind nur nützlich, um nichtinterferierende zusammengesetzte Geschichten zu bilden.

## **Feinkörnige Geschichten des Universums**

Vollkommen feinkörnige Geschichten des Universums sind Geschichten, die das Universum in jedem beliebigen Zustand so vollständig wie möglich beschreiben. Was hat die Quantenmechanik über sie zu sagen?

Gehen wir weiterhin von dem vereinfachten Bild des Universums aus, in dem Teilchen außer Ort und Impuls über keine weiteren Eigenschaften verfügen und in dem die Ununterscheidbarkeit aller Teilchen eines bestimmten Typs außer Betracht bleiben. Wäre die klassische, deterministische Physik uneingeschränkt gültig, dann könnte man die Orte und Impulse sämtlicher Teilchen im Universum jederzeit genau bestimmen. Dann könnte die klassische Dynamik im Prinzip exakt die Orte und Impulse sämtlicher Teilchen für jeden beliebigen künftigen Zeitpunkt vorhersagen. (Das Chaos-Phänomen bringt Situationen hervor, in denen die kleinste Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Ausgangsorte oder -impulse zu beliebig großen Unbestimmtheiten bei künftigen Prognosen führen kann; in der klassischen Physik hingegen wäre unter der Voraussetzung vollständiger Information der vollkommene Determinismus nach wie vor gültig.)

Wie sieht der entsprechende Zustand in der Quantenmechanik aus, zu der die klassische Physik lediglich eine Näherung darstellt? Zum einen ist es hier nicht länger sinnvoll, den genauen Ort und den genauen Impuls eines Teilchens gleichzeitig angeben zu wollen; das geht aus der berühmten Unbestimmtheitsrelation hervor. In der Quantenmechanik könnte man daher den Zustand des vereinfachten Universums zu einem bestimmten Zeitpunkt einfach durch die Aufenthaltsorte sämtlicher Teilchen beschreiben (oder durch die Aufenthaltsorte einiger Teilchen und die

Impulse anderer, oder durch die Impulse aller Teilchen, oder auf unendlich viele andere Weisen). Eine Art vollkommen feinkörniger Geschichte des Universums bestünde aus den Angaben der Orte sämtlicher Teilchen zu jedem beliebigen Zeitpunkt.

Da die Quantenmechanik probabilistisch und nicht deterministisch ist, könnte man erwarten, sie liefere für jede feinkörnige Geschichte einen Wahrscheinlichkeitswert. Das ist jedoch nicht der Fall. Die Interferenzterme zwischen feinkörnigen Geschichten verschwinden in der Regel nicht, und deshalb können solchen Geschichten keine Wahrscheinlichkeiten zugeschrieben werden.

Beim Pferderennen braucht sich der Wetter jedoch nicht um irgendwelche Interferenzterme zwischen zwei Siegerserien zu kümmern. Wieso nicht? Wie kommt es, daß der Wetter mit echten Wahrscheinlichkeiten zu tun hat, die sich nach den üblichen Regeln addieren, während die Quantenmechanik auf der feinkörnigen Ebene lediglich Größen liefert, deren Addition durch Interferenzterme erschwert wird? Die Antwort lautet, daß man, um echte Wahrscheinlichkeiten zu erhalten, hinreichend grobkörnige Geschichten betrachten muß.

## **Grobkörnige Geschichten**

Die Serie von acht Pferderennen dient nicht nur als Metapher, sondern als ein reales Beispiel einer sehr grobkörnigen Geschichte des Universums. Da wir nur die Liste der Sieger betrachten, besteht die Grobkörnigkeit darin,

1. sämtliche Zeitpunkte in der Geschichte des Universums mit Ausnahme jener, in denen die Rennen gewonnen werden, außer Betracht zu lassen ;
2. zu den betrachteten Zeitpunkten nur die an den Rennen beteiligten Pferde zu verfolgen und sämtliche anderen Objekte im Universum auszuklammern und
3. unter diesen Pferden nur die Sieger der Rennen zu verfolgen ; alle Teile des Pferdes mit Ausnahme der Nasenspitze werden vernachlässigt.

Bei quantenmechanischen Geschichten des Universums bedeutet Grobkörnigkeit in der Regel, daß man nur bestimmte Dinge zu bestimmten Zeitpunkten und bis zu einer bestimmten Gliederungstiefe verfolgt. Eine grobkörnige Geschichte kann als eine

Klasse alternativer feinkörniger Geschichten betrachtet werden, die alle die gleichen Dinge verfolgen, sich aber im Hinblick auf alle möglichen Verhaltensweisen dessen, was nicht verfolgt, sondern aufsummiert wird, voneinander unterscheiden. In dem Beispiel der Pferderennen ist jede grobkörnige Geschichte gleich der Klasse aller feinkörnigen Geschichten, die - an diesem bestimmten Nachmittag und auf diesem bestimmten Rennplatz - dieselbe Serie der acht erstplazierten Pferde verfolgen, obwohl die feinkörnigen Geschichten in dieser Klasse sich hinsichtlich aller möglichen alternativen Ausprägungsformen jedes beliebigen anderen Merkmals der Geschichte des Universums voneinander unterscheiden!

Sämtliche feinkörnigen Geschichten des Universums werden derart in Klassen eingeordnet, daß jede feinkörnige Geschichte in einer und nur in einer Klasse enthalten ist. Diese vollständigen und disjunkten Klassen bilden die grobkörnigen Geschichten (wie etwa die verschiedenen möglichen Sequenzen der Sieger von acht Rennen, sofern es keine unentschiedenen Rennen gibt). Nehmen wir an, eine bestimmte Klasse enthalte nur zwei feinkörnige Geschichten, J und K; dann lautet die grobkörnige Geschichte »J oder K«, was bedeutet, daß entweder J oder K eintritt. Enthält eine Klasse zahlreiche feinkörnige Geschichten, dann ist die grobkörnige Geschichte die kombinierte Geschichte, in der jede einzelne feinkörnige Geschichte statthaben kann.

Mathematiker würden diese grobkörnigen Geschichten »Äquivalenzklassen« feinkörniger Geschichten nennen. Jede feinkörnige Geschichte ist in einer und nur einer Äquivalenzklasse enthalten, und die Mitglieder der Klasse werden als äquivalent behandelt.

Nehmen wir an, die einzigen Objekte im Universum seien die an den acht Rennen teilnehmenden Pferde und einige Pferdebremsen; nehmen wir weiterhin an, jedes Pferd könne nur gewinnen oder nicht gewinnen. Jede feinkörnige Geschichte in dieser absurd vereinfachten Welt besteht dann aus einer Folge erstplazierter Pferde und einer spezifischen Schilderung dessen, was die Fliegen angeht. Wenn die grobkörnigen Geschichten ausschließlich die Pferde und deren Siege verfolgen und die Fliegen außer acht lassen, dann besteht jede dieser Geschichten aus der Menge feinkörniger

Geschichten, die eine bestimmte Folge erstplazierter Pferde und einen Bericht über das Schicksal der Fliegen enthalten. Im allgemeinen ist jede grobkörnige Geschichte eine Äquivalenzklasse feinkörniger Geschichten,

die durch eine bestimmte Schilderung der verfolgten Phänomene und irgendeine der möglichen alternativen Schilderungen all dessen, was nicht verfolgt wird, charakterisiert sind.

## **Grobkörnigkeit kann Interferenzterme auswaschen**

Wie kann bei quantenmechanischen Geschichten des Universums die Zusammenfassung feinkörniger Geschichten zu Äquivalenzklassen grobkörnige Geschichten mit echten Wahrscheinlichkeiten hervorbringen? Wie kommt es, daß zwischen hinreichend grobkörnigen Geschichten keine Interferenzterme stehen? Die Antwort liegt darin, daß der Interferenzterm zwischen zwei grobkörnigen Geschichten der Summe sämtlicher Interferenzterme zwischen Paaren feinkörniger Geschichten, die in diesen beiden grobkörnigen Geschichten enthalten sind, entspricht. Addiert man all diese Terme mit ihren positiven und negativen Vorzeichen, führt dies zu umfassenden Kürzungen, so daß entweder eine kleine positive oder negative Zahl oder Null herauskommt. (Erinnern wir uns daran, daß  $D$  von einer Geschichte und derselben Geschichte immer, wie eine echte Wahrscheinlichkeit, zwischen Null und Eins liegt; diese Größen kürzen sich nicht, wenn man sie addiert.)

Man kann sagen, daß jegliches Verhalten all der Dinge im Universum, die in den grobkörnigen Geschichten außer acht bleiben, in diesem Summierungsprozeß gewissermaßen »aufsummiert« wurde. Sämtliche Details, die nicht in grobkörnigen Geschichten eingehen, sämtliche nicht verfolgten Zeitpunkte, Orte und Objekte werden aufsummiert. So könnten zum Beispiel die Äquivalenzklassen sämtliche feinkörnigen Geschichten zusammenfassen, in denen die Orte bestimmter Teilchen zu jedem beliebigen

Zeitpunkt genau festgelegt sind, während sich alle übrigen Teilchen irgendwo in dem vereinfachten Universum aufhalten können. Wir sagen dann, daß die Orte der ersten Teilchenmenge zu jedem Zeitpunkt verfolgt werden, während die der zweiten Teilchenmenge außer Betracht gelassen oder aufsummiert werden.

Eine weitere Erhöhung der Grobkörnigkeit könnte darin bestehen, daß man die Aufenthaltsorte der Teilchen der ersten Menge nur zu bestimmten Zeitpunkten verfolgt, so daß alles, was in der übrigen Zeit geschieht, aufsummiert wird.

## **Dekohärenz grobkörniger Geschichten - echte Wahrscheinlichkeiten**

Ist der Interferenzterm zwischen jedem Paar grobkörniger Geschichten - entweder genau oder in sehr guter Näherung - null, dann bezeichnet man alle grobkörnigen Geschichten als *dekohärent*. Die Größe  $D$  von jeder grobkörnigen Geschichte und derselben Geschichte ist dann eine echte Wahrscheinlichkeit mit additiver Eigenschaft. Da die Quantenmechanik in der Praxis immer auf Mengen dekohärenter grobkörniger Geschichten angewandt wird, kann sie Wahrscheinlichkeiten Vorhersagen. (Übrigens nennt man  $D$  das *Dekohärenz-Funktional*; der Begriff »Funktional« deutet an, daß die Größe von Geschichten abhängig ist.)

In unserem Beispiel der nachmittäglichen Pferderennen läßt sich die verwendete Grobkörnigkeit folgendermaßen zusammenfassen: das Schicksal aller Objekte im Weltall wird mit Ausnahme der Sieger der Galopprennen auf einer bestimmten Rennbahn aufsummiert; und zu allen beliebigen Zeiten werden Ereignisse aufsummiert, ausgenommen die Momente der Siege in den acht Rennen an einem bestimmten Tag. Die resultierenden grobkörnigen Geschichten sind dekohärent und besitzen echte Wahrscheinlichkeiten. Aufgrund unserer Alltagserfahrungen überrascht uns dieses Ergebnis nicht weiter, doch sollten wir genauer untersuchen, wie es dazu kommt.

## **Verknüpfung und Mechanismen der Dekohärenz**

Worin liegt letztlich die Erklärung für die Dekohärenz - für jenen Mechanismus, der bewirkt, daß sich die Interferenzterme zu Null addieren, und der die Zuordnung von Wahrscheinlichkeiten erlaubt? Die Erklärung liegt in der Verknüpfung dessen, was in den grobkörnigen Geschichten verfolgt wird, mit dem, was außer Betracht bleibt oder aufsummiert wird. Die an den Rennen beteiligten Pferde und Jockeys sind in Kontakt mit Luftmolekülen, Sandkörnern und Pferdekot auf der Rennbahn, von der Sonne emittierten Photonen sowie Pferdebremsen - Objekten, die allesamt in den grobkörnigen Geschichten der Rennen aufsummiert werden. Die verschiedenen möglichen Ergebnisse der Pferderennen sind mit den verschiedenen Schicksalen all der Dinge verknüpft, die in den grobkörnigen Geschichten außer Betracht bleiben. Doch diese Schicksale

werden aufsummiert, und die Quantenmechanik sagt uns, unter geeigneten Bedingungen verschwinden im Endergebnis die Interferenzterme zwischen den Geschichten, die verschiedene Schicksale der ausgeklammerten Objekte beinhalten. Aufgrund der Verknüpfung verschwinden auch die Interferenzterme zwischen verschiedenen Ergebnissen der Rennen.

Es ist verwirrend, statt dieser dekohärenten grobkörnigen Geschichten den genau entgegengesetzten Fall feinkörniger Geschichten zu betrachten, die Interferenzterme ungleich Null aufweisen und keine echten Wahrscheinlichkeiten besitzen. Diese Geschichten könnten jedes Elementarteilchen jeden Pferdes und alles, was mit jedem Pferd in Kontakt kam, über den gesamten Zeitraum der Rennen verfolgen. Nehmen Sie das berühmte Experiment, in dem ein von einer winzigen Quelle emittiertes Photon auf seinem Weg zu einem bestimmten Punkt in einem Detektor unbehindert einen von zwei Schlitzen in einem Schirm passieren kann - diesen beiden interferierenden Geschichten kann keine Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden. Daher ist es müßig zu sagen, durch welchen der beiden Schlitze das Photon hindurchschlüpfte.

## **Wahrscheinlichkeiten und angezeigte Wettkurse**

Um der Klarheit willen ist nochmals hervorzuheben: Die Wahrscheinlichkeiten für hinreichend grobkörnige Geschichten, die die Quantenmechanik zusammen mit einer richtigen physikalischen Theorie ergeben, sind die besten Wahrscheinlichkeiten, die man berechnen kann. Für eine Folge von Galopprennen entsprechen sie dem, was wir echte Siegeschancen genannt haben. Ganz anders verhält es sich mit den an einer Galopprennbahn angezeigten Wettkursen. Sie spiegeln lediglich die Einschätzungen der Wetter hinsichtlich der bevorstehenden Rennen wider. Zudem addieren sich die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten nicht einmal zu Eins, da der Rennveranstalter seine Kosten abdecken muß.

## **Dekohärenz für ein Objekt auf einer Umlaufbahn**

Um die Allgemeingültigkeit der Dekohärenz zu veranschaulichen, verlassen wir die Erde und wenden uns einem Beispiel im Weltall zu: der näherungsweise Beschreibung der Umlaufbahn eines Objekts im

Sonnensystem. Die Größe dieses Objekts kann von einem großen Molekül über ein Staubkorn, einen Kometen oder einen Planetoiden bis zu einem Planeten reichen. Wir betrachten grobkörnige Geschichten, in denen die Schicksale aller anderen Objekte im Universum ebenso wie alle inneren Eigenschaften des Objekts selbst aufsummiert werden und nur seine Schwerpunkt-Position zu allen Zeiten übrigbleibt. Darüber hinaus nehmen wir an, daß die Position selbst nur näherungsweise bestimmt wird, so daß nur kleine Raumzonen betrachtet und alle möglichen Positionen innerhalb jeder Zone aufsummiert werden. Schließlich gehen wir davon aus, daß die grobkörnige Geschichte die meisten Ereignisse aufsummiert und die näherungsweise Position des Objekts nur in einer Sequenz diskreter Zeitpunkte, zwischen denen kurze Intervalle liegen, verfolgt.

Sagen wir, das in der Umlaufbahn befindliche Objekt habe die Masse  $M$ , die linearen Abmessungen der kleinen Raumzonen lägen in der Größenordnung  $X$  und die Zeitintervalle in der Größenordnung  $T$ . Die verschiedenen möglichen grobkörnigen Geschichten unseres Objekts im Sonnensystem werden mit einem hohen Genauigkeitsgrad über weite Wertebereiche der Größen  $M$ ,  $X$  und  $T$  dekohärent sein. Der für diese Dekohärenz verantwortliche Mechanismus ist wieder die häufige Wechselwirkung mit Objekten, deren Schicksale aufsummiert werden. In einem bekannten Beispiel handelt es sich dabei um die Photonen, aus denen sich die elektromagnetische Hintergrundstrahlung zusammensetzt; sie stammt aus der Zeit, als das Universum (infolge des Urknalls) zu expandieren begann. Das eine Umlaufbahn beschreibende Objekt im Sonnensystem wird wiederholt mit solchen Lichtquanten zusammenstoßen und sie streuen. Nach jedem Stoß werden das Objekt und das jeweilige Photon ihre Bewegungsrichtung ändern. Da wir jedoch die unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen und Energien sämtlicher Photonen aufsummieren, werden die Interferenzterme zwischen diesen Ausbreitungsrichtungen und Energien ausgewaschen und somit die Interferenzterme zwischen verschiedenen grobkörnigen Geschichten des Objekts auf der Umlaufbahn.

Die Dekohärenz der Geschichten (die aufeinanderfolgende angenäherte Positionen des Schwerpunkts des Objekts im Sonnensystem zu bestimmten Zeitpunkten angeben) ist auf die wiederholten Wechselwirkungen des Objekts mit Dingen, die aufsummiert werden, zurückzuführen, wie etwa mit den Photonen der Hintergrundstrahlung.

Dieser Vorgang liefert die Antwort auf eine Frage, die mir Enrico Fermi

zu Beginn der fünfziger Jahre, als wir Kollegen an der Universität Chicago waren, immer wieder gestellt hat: »Wenn die Quantenmechanik zutrifft, wieso ist dann der Planet Mars nicht über seine ganze Umlaufbahn verteilt?« Die herkömmliche Antwort, nach der Mars zu jeder Zeit an einem bestimmten Ort steht, weil die Menschen ihn betrachten, kannten wir beide - doch sie erschien Fermi genauso dumm wie mir. Die richtige Erklärung erbrachten lange nach seinem Tod die Arbeiten von Theoretikern wie Dieter Zeh, Erich Joos und Wojtek Żurek über Mechanismen der Dekohärenz, wie etwa demjenigen, der sich auf die Photonen der Hintergrundstrahlung bezieht.

Auch die von der Sonne emittierten Photonen, die am Mars streuen, werden aufsummiert, wodurch sie zur Dekohärenz verschiedener Positionen des Planeten beitragen. Gerade diese Photonen sind es, die dem Menschen erlauben, den Planeten Mars zu sehen. Während also seine Beobachtung des Mars den Menschen auf eine falsche Fährte lockt, kann der physikalische Vorgang, der diese Beobachtung ermöglicht, als teilweise Erklärung für die Dekohärenz verschiedener grobkörniger Geschichten der Bewegung dieses Planeten um die Sonne angesehen werden.

## **Dekohärente Geschichten bilden einen Verzweigungsbaum**

Derartige Dekohärenzmechanismen ermöglichen die Existenz des quasiklassischen Bereichs, der unsere Alltagserfahrung einschließt. Dieser Bereich besteht aus dekohärenten grobkörnigen Geschichten, die eine baumartige Struktur bilden. Jorge Luis Borges hat in einer seiner glänzenden Kurzgeschichten eine solche Struktur anschaulich als einen »Garten sich gabelnder Wege« beschrieben. An jedem Verzweigungspunkt gibt es disjunkte Alternativen. Ein solches Alternativenpaar wurde oft mit einer Straßengabelung verglichen - etwa in dem Gedicht *The Road Not Taken* von Robert Frost.

Die erste Verzweigung dieser Struktur in alternative Möglichkeiten vollzieht sich mit - oder unmittelbar nach - Beginn der Expansion des Universums. Kurze Zeit darauf spaltet sich dann jeder Zweig in weitere Alternativen auf, und dieser Vorgang setzt sich nun unbegrenzt fort. An jeder Verzweigung besitzen die Alternativen wohldefinierte Wahrscheinlichkeiten. Zwischen ihnen gibt es keine quantenmechanische Interferenz.

Diese Situation läßt sich besonders gut am Beispiel der Pferderennen veranschaulichen. Jedes Rennen geht mit einer Verzweigung in zehn Alternativen hinsichtlich der möglichen Sieger einher, und für jeden Sieger gibt es eine weitere Verzweigung in zehn Alternativen hinsichtlich des Siegers des nächsten Rennens.

Beim Rennwettbewerb wirkt sich das Ergebnis eines Rennens in der Regel nicht besonders stark auf die Siegeswahrscheinlichkeiten des nächsten Rennens aus (beispielsweise wenn ein Jockey über seine Niederlage in einem vorangehenden Rennen tief deprimiert ist). Beim Verzweigungsbaum alternativer Geschichten des Universums dagegen kann sich das Ergebnis an einer Verzweigung nachhaltig auf die Wahrscheinlichkeiten bei späteren Verzweigungen auswirken, ja es kann sogar die Eigenart der Alternativen bei späteren Verzweigungen beeinflussen. So kann beispielsweise die Verdichtung von Materie, aus der der Planet Mars hervorgegangen ist, auf einem quantenmechanischen Zufallsereignis basieren, das vor Milliarden von Jahren stattfand ; daraus folgt, daß an den Zweigen, an denen kein solcher Planet auftauchte, keine weiteren, explizit mit alternativen Schicksalen des Planeten Mars verknüpfte Verzweigungen vorkämen.

Die baumartige Struktur alternativer dekohärenter grobkörniger Geschichten des Universums unterscheidet sich von Stammbäumen, wie sie für die natürlichen Sprachen und die biologischen Arten erstellt werden. Bei Stammbäumen sind sämtliche Zweige in der gleichen historischen Überlieferung präsent. Zum Beispiel gingen alle romanischen Sprachen aus einer späten Version des Lateinischen hervor; sie bilden jedoch keine Alternativen. Französisch, Spanisch, Portugiesisch, Italienisch, Katalanisch und andere romanische Sprachen werden heute nebeneinander gesprochen, und selbst die ausgestorbenen romanischen Sprachen, wie das Dalmatische, hat man zur gleichen Zeit gesprochen. Im Gegensatz dazu sind die Zweige des Baumes alternativer dekohärenter Geschichten disjunkt, und nur ein Zweig ist der Beobachtung zugänglich. Sogar die Interpretatoren der Arbeiten von Hugh Everett, die von »vielen gleich realen Welten« sprechen, behaupten nicht, mehr als eine dieser »Zweig-Welten« beobachtet zu haben.

## Hohe Trägheit und annähernd klassisches Verhalten

Die Dekohärenz alleine (die Verzweigungen von Geschichten in unabhängige Alternativen mit wohldefinierten Wahrscheinlichkeiten hervorbringt) ist nicht die einzige wichtige Eigenschaft des quasiklassischen Bereichs, der unsere Alltagserfahrung mit einschließt. Dieser Bereich zeigt auch weitgehend klassisches Verhalten - daher »quasiklassisch«. Nicht nur die sukzessiven Positionen des Planeten Mars in kurz aufeinanderfolgenden Zeitpunkten haben echte Wahrscheinlichkeiten. Vielmehr sind die Positionen zu diesen Zeitpunkten auch in hohem Maße miteinander korreliert (Wahrscheinlichkeiten sehr nahe an Eins), und sie entsprechen in ausgezeichneter Näherung einer wohldefinierten klassischen Umlaufbahn um die Sonne. Diese Umlaufbahn gehorcht den klassischen Newtonschen Gesetzen für die Bewegung im Schwerefeld der Sonne und anderer Planeten, wobei Einsteins verbesserte (allgemein-relativistische) klassische Theorie und eine sehr geringe Reibungskraft aus Stößen von Lichtquanten wie der Photonen der Hintergrundstrahlung nur sehr geringfügige Korrekturen erforderlich machen. Erinnern wir uns daran, daß diese Objekte in den grobkörnigen Geschichten, die die Bewegung des Planeten Mars verfolgen, außer Betracht bleiben und somit aufsummiert werden. Das ist die Ursache dafür, daß grobkörnige Geschichten dekohärieren.

Wie kann der Planet eine deterministische, klassische Umlaufbahn beschreiben, wenn er ständig durch zufällige Stöße der Photonen, die unentwegt seine Bahn kreuzen, erschüttert wird? Die Antwort lautet : Je schwerer ein Objekt auf einer Umlaufbahn ist, um so weniger unregelmäßiges Verhalten zeigt es und um so unbeirrter folgt es seiner Umlaufbahn. Es ist die Masse  $M$  des Planeten, seine Trägheit, die den Erschütterungen widersteht und ihm erlaubt, sich in sehr guter Näherung klassisch zu verhalten. Ein Atom oder ein kleines Molekül ist zu leicht, um angesichts all der potentiellen Stoßpartner im Sonnensystem auch nur annähernd eine gleichmäßige Umlaufbahn beschreiben zu können. Ein großes Staubkorn ist schon schwer genug, um näherungsweise einer Umlaufbahn zu folgen, und die Umlaufbahn eines kleinen Raumschiffes ist sogar noch gleichmäßiger. Aber selbst ein solches Raumschiff wird von dem Sonnenwind, der aus von der Sonne emittierten Elektronen besteht, ein wenig aus der Bahn geworfen. Zusammenstöße des Raumfahrzeugs

mit diesen Elektronen reichten aus, um bestimmte hochempfindliche Experimente zur Überprüfung der Einsteinschen Gravitationstheorie zu stören; aus diesem Grund wäre es wünschenswert, für diese Experimente ein Sekundärradar auf dem Mars, statt eines Transponders auf einer Raumsonde zu benutzen. Obgleich wir schweren Objekten quasi-klassisches Verhalten zugeschrieben haben, wäre es genauer, dieses Verhalten Bewegungen, die mit hinreichend hoher Trägheit verbunden sind, zuzuschreiben. Eine Probe stark gekühlten flüssigen Heliums kann groß und schwer sein und dennoch bizarre Quanteneffekte zeigen - beispielsweise über den Rand eines offenen Behälters schwappen, weil sich einige Heliumatome mit geringer Trägheit bewegen.

## **Fluktuationen**

Physiker versuchen gelegentlich zwischen Quanten- und klassischen Fluktuationen zu unterscheiden, wobei zu den letzteren beispielsweise »thermische Schwankungen« gehören, die mit den Bewegungen der Moleküle in einem heißen Gas zusammenhängen. Die zur Erzielung quantenmechanischer Dekohärenz erforderliche Grobkörnigkeit verlangt die Aufsummierung zahlreicher Variablen, und diese können durchaus einige der Variablen umfassen, die solche Molekularbewegungen beschreiben. Aus diesem Grund werden Quanten- und klassische »thermische« Fluktuationen gerne in einen Topf geworfen. Ein schweres Objekt, das annähernd eine klassische Umlaufbahn beschreibt, widersteht gleichzeitig den Wirkungen beider Fluktuationsarten. Umgekehrt können sich beide Arten erheblich auf ein leichteres Objekt auswirken.

Die durch wiederholte Stöße der Teilchen verursachte unregelmäßige Molekularbewegung wurde zu Beginn des 19. Jahrhunderts erstmals von dem Botaniker Robert Brown beschrieben, nach dem dieses Phänomen »Brownsche Bewegung« heißt. Sie läßt sich leicht beobachten, wenn man einen Tropfen Tinte in Wasser gibt und die Tintenkörnchen unter einem Mikroskop betrachtet. Ihre ruckartigen Bewegungen wurden von Einstein quantitativ als Stöße der Wassermoleküle erklärt, und so wurden Moleküle erstmals der Beobachtung zugänglich gemacht.

## Schrödingers Katze

In einem quasiklassischen Bereich gehorchen Objekte näherungsweise den klassischen Gesetzen. Sie unterliegen zwar Fluktuationen, doch sind dies Einzelereignisse, die von einem weitgehend klassischen Verhaltensmuster überlagert werden. Sobald jedoch eine Fluktuation in der Geschichte eines ansonsten klassischen Objekts auftritt, kann sie beliebig verstärkt werden. So kann ein Mikroskop das Bild eines Tintenkörnchens, das von einem Molekül angestoßen wird, vergrößern, und eine Fotografie kann das vergrößerte Bild zeitlich unbegrenzt erhalten.

Dieses Phänomen erinnert an das berühmte Gedankenexperiment mit Schrödingers Katze, bei dem ein Quantenereignis so verstärkt wird, daß es über Tod oder Leben einer Katze entscheidet. Eine solche Verstärkung ist durchaus möglich, wenn auch nicht sehr nett. So kann man eine Vorrichtung bauen, die Leben oder Tod der Katze zum Beispiel von der Bewegungsrichtung eines Kernbruchstückes, das bei einem radioaktiven Zerfallsprozeß freigesetzt wird, abhängig macht. (Mit Hilfe thermonuklearer Waffen könnte man heute dafür sorgen, daß das Schicksal einer ganzen Stadt in der gleichen Weise determiniert wird.)

Gewöhnlich beschreibt man bei der Erörterung von Schrödingers Katze als nächstes die angebliche Quanteninterferenz zwischen den Zuständen »lebende Katze« und »tote Katze«. Doch steht die lebende Katze, zum Beispiel durch ihr Atmen, in starker Wechselwirkung mit der Außenwelt. Und sogar die tote Katze wechselwirkt noch in gewissem Maße mit der Luft. Es hilft auch nichts, die Katze in einen Kasten zu setzen, denn der Kasten steht ebenso in Wechselwirkung mit der Außenwelt wie mit der Katze. Somit gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten für Dekohärenz zwischen grobkörnigen Geschichten, in denen die Katze lebt, und solchen, in denen sie stirbt. Die Zustände »lebende Katze« und »tote Katze« dekohärieren; es kommt also zu keiner Interferenz zwischen ihnen.

Vielleicht ist es dieser unsinnige Interferenzaspekt der Katzen-geschichte, der Stephen Hawking zu der Äußerung veranlaßte: »Wenn ich jemanden von Schrödingers Katze sprechen höre, greife ich nach meinem Gewehr.« Jedenfalls parodiert er damit die Bemerkung (die oftmals einem führenden Nazi zugeschrieben wird, aber tatsächlich in dem frühen nazifreundlichen Stück *Schlageter*<sup>1</sup> von Hanns Johst vorkommt): »Wenn

---

<sup>1</sup>München 1933

ich Kultur höre, entsichere ich meine Browning.«

Nehmen wir an, das Quantenereignis, das über das Schicksal der Katze befindet, habe bereits stattgefunden, aber wir wüßten das Ergebnis erst dann, wenn wir den Kasten mit der Katze öffneten. Da die beiden Ergebnisse dekohärent sind, unterscheidet sich diese Situation nicht von einer klassischen, wenn wir eine Katzenbox öffnen und das arme Tier, das eine lange Flugreise hinter sich hat, entweder tot oder lebend vorfinden, wobei jeder Zustand eine bestimmte Wahrscheinlichkeit besitzt. Dennoch hat man Berge von Papier damit verschwendet, den vermeintlich seltsamen quantenmechanischen Zustand der Katze, die zur gleichen Zeit tot und lebendig ist, zu diskutieren. Kein wirkliches quasiklassisches Objekt kann ein solches Verhalten zeigen, weil die Wechselwirkung mit dem übrigen Universum zur Dekohärenz der Alternativen führt.

## **Zusätzliche Grobkörnigkeit für Trägheit und der quasiklassische Bereich**

Der quasiklassische Bereich verlangt Geschichten, die hinreichend grobkörnig sind, um in vorzüglicher Näherung zu dekohärieren; darüber hinaus verlangt er eine zusätzliche Grobkörnigkeit, damit das, was in den Geschichten verfolgt wird, genügend Trägheit besitzt, um den Fluktuationen, die zwangsläufig mit dem, was aufsummiert wird, verknüpft sind, weitgehend zu widerstehen. Daher kommt es immer wieder zu kleinen und manchmal auch großen Abweichungen vom klassischen Verhalten.

Hohe Trägheit erfordert deshalb eine zusätzliche Grobkörnigkeit, weil dann große Brocken Materie verfolgt werden können und diese Brocken hohe Massen haben können. (Stabile oder fast stabile Elementarteilchen mit riesiger Masse wären eine andere Quelle hoher Trägheit. Doch sind derartige Teilchen experimentell noch nicht nachgewiesen worden, auch wenn sie möglicherweise existieren und, in diesem Fall, eine wichtige Rolle in den ersten Augenblicken der Expansion des Universums gespielt haben könnten.)

## Meßbarkeit und Messung

Ein Quantenereignis kann mit einem Vorgang im quasiklassischen Bereich vollkommen korrelieren. Das geschieht beispielsweise in dem sinnvollen Teil der Katzengeschichte, wo ein solches Ereignis mit dem Schicksal des Tieres korreliert. Ein einfacheres und weniger künstliches Beispiel liefert ein radioaktiver Atomkern, der als Verunreinigung in einem Glimmerkristall vorkommt und, so nehmen wir an, in zwei elektrisch geladene Fragmente zerfällt, die sich in entgegengesetzte Richtungen ausbreiten. Die Bewegungsrichtung eines Fragments ist vor dem Zerfallsereignis völlig unbestimmt ; danach aber korreliert sie vollkommen mit einer im Glimmer verbliebenen Spur. Quasiklassische Geschichten, die Dinge wie die bei der Entstehung der Spur emittierte weiche Strahlung aufsummieren, lassen die verschiedenen Richtungen mit je einem kleinen Streubereich dekohärent. Eine solche Spur bleibt bei gewöhnlichen Temperaturen Zehntausende von Jahren oder noch länger erhalten, und natürlich ist die bloße Persistenz ein (wenn auch triviales) Beispiel für eine klassische Geschichte. Der radioaktive Zerfall ist hier mit dem quasiklassischen Bereich in Berührung gekommen.

Die in Mineralien auftretende Anhäufung von Spuren, die von Abbauprodukten spontaner Kernspaltungen stammen, wird mitunter zur Datierung dieser Mineralien verwendet; diese Methode wird als Festkörperspurverfahren bezeichnet, und sie kann auf mehrere hunderttausend Jahre altes Gestein angewandt werden. Nehmen wir an, ein Physiker, der mit dieser Methode arbeitet, prüft eine bestimmte Spur. Bei seinem Versuch, das Alter des Steins zu bestimmen, nimmt er nebenbei eine Messung der Zerfallsrichtung des radioaktiven Atomkerns vor. Die Spur aber befindet sich dort seit ihrer Entstehung; sie entsteht nicht erst, wenn der Physiker sie analysiert (wie man aus einigen ungenauen Darstellungen der Quantenmechanik folgern könnte). Die Meßbarkeit bestand seit dem Zerfall des Atomkerns und der Entstehung der Spur; zu diesem Zeitpunkt kam eine hohe Korrelation mit dem quasiklassischen Bereich zustande. Die tatsächliche Messung hätte von einer Kakerlake oder irgendeinem anderen komplexen adaptiven System ausgeführt werden können. Sie besteht in der »Feststellung«, daß eine bestimmte Alternative aus einer Menge dekohärenter Alternativen mit verschiedenen Wahrscheinlichkeiten eingetreten ist. Genau das gleiche geschieht auf der

Galopprennbahn, wenn ein bestimmtes Pferd dabei »beobachtet« wird, wie es eines der Rennen gewinnt. Dieser Sieg, der bereits irgendwo im quasiklassischen Bereich registriert ist, wird nun auch im Gedächtnis des Beobachters - unabhängig davon, ob dieser über eine hohe oder eine niedrige Intelligenz verfügt - gespeichert. Und doch haben viele kluge, ja glänzende Wissenschaftler die angebliche Bedeutung des menschlichen Bewußtseins beim Meßvorgang hervorgehoben. Ist das Bewußtsein wirklich so wichtig? Was bedeutet eigentlich »feststellen« und »beobachten«?

## **Ein IGUS - ein komplexes adaptives System als Beobachter**

In diesem Zusammenhang entspricht eine Beobachtung einer Art Auslichtung des Baumes der verzweigten Geschichten. An einem bestimmten Verzweigungspunkt bleibt nur einer der Zweige erhalten. (Genauer gesagt: An jedem dieser Zweige wird nur dieser Zweig selbst erhalten.) Die abgeschnittenen Zweige werden weggeworfen und mit ihnen sämtliche Teile des Baumes, die aus den abgeschnittenen Zweigen wachsen.

In gewissem Sinne hat der Kernspaltungsspuren aufweisende Glimmer bereits eine Auslichtung vorgenommen, indem er die tatsächliche Bewegungsrichtung des Spaltbruchstücks registrierte und dadurch alle anderen Richtungen ausschied. Ein komplexes adaptives System, das die Spur beobachtet, vollzieht diese Auslichtung jedoch auf explizitere Weise, indem es die Beobachtung in den Datenstrom aufnimmt, aus dem es seine Schemata abstrahiert. In seinem anschließenden Verhalten kann sich dann die Tatsache widerspiegeln, daß es eine bestimmte Spurrichtung beobachtet hat.

Ein komplexes adaptives System, das als Beobachter agiert, verdient einen besonderen Namen. Jim Hartle und ich nennen es ein IGUS, für *Information Gathering and Utilizing System* (Informationssammelungs- und -verarbeitungssystem). Wenn das IGUS in hohem Maße über Bewußtsein und Selbstbewußtsein verfügt (so daß es seiner selbst innewird, wie es die Richtung einer Kernspaltungsspur wahrnimmt), um so besser. Aber wozu ist dies nötig? Hat eine Messung, die irgendein Mensch vornimmt, und sei es ein recht beschränkter, wirklich eine größere Bedeutung als eine Messung, die ein Gorilla oder ein Schimpanse ausführt? Und wenn nicht,

warum soll man dann nicht einen Affen durch einen Chinchilla oder eine Kakerlake ersetzen?

Wenn es um die Auslichtung des Verzweigungsbaumes der Geschichten geht, sollte man vielleicht zwischen einem menschlichen Beobachter, der sich in der Quantenmechanik auskennt (und sich mithin des Ursprungs des Baumes bewußt ist), und einem, der keine Ahnung davon hat, differenzieren. In gewissem Sinne besteht zwischen ihnen ein größerer Unterschied als zwischen einem Menschen, der nichts von Quantenmechanik versteht, und einem Chinchilla.

Ein IGUS kann, sobald ein bestimmtes Ergebnis feststeht, mehr als alternative Geschichtszweige entfernen, es kann auch im voraus mit Hilfe einer quantenmechanischen Näherung der Wahrscheinlichkeiten auf dieses Ergebnis setzen. Das vermag nur ein komplexes adaptives System zu leisten. Anders als ein Stück Glimmer kann ein IGUS seine Wahrscheinlichkeitsschätzungen für künftige Ereignisse in ein Schema einbauen und sein künftiges Verhalten an diesem Schema ausrichten. So mag beispielsweise ein wüstenbewohnendes Säugetier einige Tage nach dem letzten Regen eine weite Strecke zu einem tiefen Wasserloch zurücklegen, nicht hingegen zu einer seichten Tränke, denn die Wahrscheinlichkeit, daß das tiefe Loch noch Wasser enthalten wird, ist größer.

Die Auslichtung ersetzt das, was man in der traditionellen Interpretation der Quantenmechanik meistens den »Zusammenbruch der Wellenfunktion« nennt. Die beiden Beschreibungen sind zwar mathematisch miteinander verwandt, aber oft wird der Zusammenbruch der Wellenfunktion als ein geheimnisvolles, spezifisch quantenmechanisches Phänomen dargestellt. Da die Auslichtung jedoch nichts anderes als die Feststellung ist, daß aus einer Menge *dekoherenter* Alternativen die eine oder andere stattgehabt hat, ist sie uns recht vertraut. Ein anschauliches Beispiel dafür ist etwa die Feststellung, daß ich zu guter Letzt nicht nach Paris geflogen, sondern zu Hause geblieben bin. Sämtliche Geschichtszweige, die von meiner Reise nach Paris abhingen, sind damit ausgeschieden; ihre Wahrscheinlichkeiten sind jetzt gleich null, gleich, wie hoch sie vorher gewesen sein mögen.

In Darstellungen des sogenannten Zusammenbruchs der Wellenfunktion wird oft nicht klargestellt, daß die Auslichtung selbst dann, wenn sie mit der Messung eines Quantenereignisses verbunden ist, dennoch eine

gewöhnliche Unterscheidung zwischen dekohärenten Alternativen bleibt. Quantenereignisse können nur auf der Ebene des quasiklassischen Bereichs nachgewiesen werden.

Dort gibt es lediglich klassische Wahrscheinlichkeiten, wie beim Würfeln oder beim Werfen einer Münze, wobei die Wahrscheinlichkeiten mit Bekanntwerden des Ergebnisses Eins und Null werden. Der quasiklassische Bereich eröffnet die Möglichkeit, daß das Ergebnis recht dauerhafte »Spuren« hinterläßt. Diese Spuren können bei quasigewisser Übereinstimmung jeder Spur mit der vorangehenden in einer quasiklassischen Folge beliebig vergrößert oder kopiert werden. Sobald ein Quantenereignis mit dem quasiklassischen Bereich korreliert (und so der Zustand der Meßbarkeit eintritt), wird das spezifische Ergebnis an einem bestimmten Geschichtszweig zu einer Tatsache.

## **Selbstbewußtsein und freier Wille**

Da wir nun einmal das Problem des Bewußtseins angeschnitten haben, wollen wir uns in einem kurzen Exkurs etwas eingehender damit befassen. Das menschliche Gehirn weist im Vergleich zu dem unserer nächsten Verwandten, den Menschenaffen, stark vergrößerte Stirnlappen auf. Neurobiologen haben in den Stirnlappen Bereiche ausgemacht, in denen offenbar Selbstbewußtsein und Wille lokalisiert sind, die beim Menschen als besonders hoch entwickelt gelten.

In Zusammenhang mit den vielen parallel ablaufenden psychischen Prozessen beim Menschen scheint das Phänomen Bewußtsein oder Aufmerksamkeit einem sequentiellen Prozeß zuordenbar, einer Art Scheinwerfer, der in rascher Folge von einem Sinneskanal auf den anderen oder von einer Vorstellung auf die andere gerichtet werden kann. Wenn wir glauben, uns mit vielen verschiedenen Dingen gleichzeitig zu befassen, bewegen wir den Scheinwerfer in Wirklichkeit vielleicht ständig zwischen den verschiedenen Objekten unserer Aufmerksamkeit hin und her. Die parallel ablaufenden psychischen Prozesse sind dem Bewußtsein in unterschiedlicher Weise zugänglich, und einige Triebfedern des menschlichen Verhaltens liegen in psychischen Tiefenschichten begraben, die sich nur schwer dem Bewußtsein erschließen.

Dennoch sagen wir, Äußerungen und andere Handlungen seien weitgehend bewußtseinsgesteuert, und in dieser Aussage spiegelt sich

nicht nur die Erkenntnis wider, daß das Bewußtsein wie eine Art Scheinwerfer funktioniert, sondern auch die feste Überzeugung, daß wir bis zu einem gewissen Grad über einen freien Willen verfügen und zwischen Alternativen wählen können. Diese Wahlfreiheit ist zum Beispiel ein zentraler Aspekt in dem bereits erwähnten Gedicht *The Road Not Taken*.

Welches objektive Phänomen bringt diesen subjektiven Eindruck der Willensfreiheit hervor? Wenn man sagt, eine Entscheidung werde frei getroffen, möchte man damit zum Ausdruck bringen, daß sie von vorausliegenden Ereignissen nicht völlig determiniert wird. Was ist die Ursache dieser scheinbaren Unbestimmtheit?

Die verlockende Erklärung besteht darin, eine solche Entscheidung mit fundamentalen Unbestimmtheiten in Verbindung zu bringen, vorzugsweise mit quantenmechanischen, die durch klassische Phänomene wie das Chaos verstärkt werden. Eine von einem Menschen getroffene Entscheidung hätte dann nichtvoraussagbare Merkmale, die man im Rückblick als frei gewählt bezeichnen könnte. Man kann sich allerdings fragen, welches Merkmal der menschlichen Hirnrinde die Wirkungen quantenmechanischer Fluktuationen und des Chaos gerade hier so deutlich hervortreten läßt.

Statt lediglich auf diese einfachen physikalischen Wirkungen einzugehen, können wir auch Prozesse betrachten, die direkter mit dem Gehirn und dem Bewußtsein verknüpft sind. Erinnern wir uns daran, daß bei einer bestimmten Grobkörnigkeit *sämtliche* aufsummierten (nicht verfolgten) Phänomene scheinbare Unbestimmtheiten (wie etwa thermische Schwankungen) beisteuern können, die mit den quantenmechanischen Fluktuationen in einen Topf geworfen werden. Da der Suchscheinwerfer des Bewußtseins viele parallel ablaufende psychische Prozesse nicht beleuchtet, werden diese Vorgänge in den extrem grobkörnigen Geschichten, an die wir uns bewußt erinnern, aufsummiert. Die daraus resultierenden Unbestimmtheiten scheinen stärker zum subjektiven Eindruck des freien Willens beizutragen als die im engeren Sinne physikalisch bedingten Unbestimmtheiten. Mit anderen Worten: Das Verhalten der Menschen wird häufiger von versteckten Motiven beeinflußt als von den Ergebnissen eines inneren Generators von Zufalls- oder Pseudozufallszahlen. Allerdings verfügen wir nur über wenige gesicherte Kenntnisse auf diesem Gebiet, und wir sind vorläufig auf Spekulationen angewiesen. (Spekulationen über diese Fragen sind

keineswegs neu und meistens recht vage. Ich sehe jedoch keinen Grund, warum man diese Frage nicht in Form einer ernsthaften wissenschaftlichen Untersuchung der möglichen Rolle verschiedener Unbestimmtheiten für die Funktionsweise der menschlichen Hirnrinde und der damit einhergehenden mentalen Prozesse weiterverfolgen sollte.)

## **Was zeichnet den quasiklassischen Bereich unserer Erfahrung aus?**

In den grobkörnigen Geschichten des quasiklassischen Bereichs, der auch unsere Erfahrungswelt umfaßt, werden bestimmte Arten von Variablen verfolgt, während die übrigen aufsummiert, also ausgeklammert werden. Welche Arten werden verfolgt? Grob gesprochen, verfolgt der gewöhnliche quasiklassische Bereich Gravitations- und elektromagnetische Felder sowie Größen, die, wie Energie, Impuls und elektrische Ladung, vollkommen erhalten bleiben, und Größen, die näherungsweise erhalten bleiben, wie die Anzahl der Versetzungen (Unregelmäßigkeiten), die ein geladenes Teilchen beim Durchtritt durch ein Kristall erzeugt. Eine Größe wird Erhaltungsgröße genannt, wenn ihr Gesamtbetrag in einem geschlossenen System in der Zeit konstant bleibt; sie wird Fasterhaltungsgröße genannt, wenn ihr Gesamtbetrag in einem geschlossenen System in der Zeit nur geringfügig schwankt. Eine Erhaltungsgröße wie die Energie kann nicht erzeugt oder vernichtet, sondern allenfalls umgewandelt werden. Die Versetzungen in einem Kristall hingegen können natürlich erzeugt werden, zum Beispiel indem man ein geladenes Teilchen hindurchschickt; allerdings können diese Versetzungen Zehntausende oder sogar Hunderttausende von Jahren überdauern, und in diesem Sinne werden sie annähernd erhalten.

Der quasiklassische Bereich unserer vertrauten Erfahrung bezieht die Aufsummierung aller Größen mit Ausnahme der Wertebereiche dieser Erhaltungs- und Fasterhaltungsgrößen innerhalb kleiner Rauminhalte mit ein. Diese Rauminhalte müssen aber allemal so groß sein, daß sie die erforderliche Trägheit besitzen, um den Schwankungen, die mit den Wirkungen sämtlicher aufsummierten Variablen verknüpft sind, zu widerstehen. Das heißt, den Schwankungen wird so viel Widerstand entgegengesetzt, daß die erfaßten Größen quasiklassisches Verhalten zeigen.

Diese Größen müssen in Zeitintervallen verfolgt werden, die nicht zu nahe beieinanderliegen, so daß die alternativen grobkörnigen Geschichten dekohärieren können. Allgemein gilt: Wird die Körnigkeit zu fein (weil die Zeitintervalle zu kurz, die Volumina zu klein oder die Wertebereiche der verfolgten Größen zu schmal sind), erwächst die Gefahr der Interferenz zwischen den Geschichten.

Betrachten wir eine Menge alternativer grobkörniger Geschichten, die maximal verfeinert sind, so daß jede weitere Steigerung der Feinkörnigkeit die Dekohärenz oder den quasiklassischen Charakter der Geschichten oder beides zerstören würde. Die kleinen Volumina, in denen die Erhaltungs- und Festerhaltungsgrößen in geeigneten Zeitintervallen verfolgt werden, können dann zwar das gesamte Universum abdecken, aber mit einer Grobkörnigkeit in Raum und Zeit (und in den Wertebereichen der Größen), die gerade hinreicht, um dekohärente und quasiklassische alternative Geschichten hervorzubringen.

Die vertraute Erfahrungssphäre des Menschen und der Systeme, mit denen er in Kontakt steht, ist ein sehr viel grobkörnigerer Bereich als ein solcher maximal quasiklassischer Bereich. Es bedarf eines sehr hohen Maßes zusätzlicher Grobkörnigkeit, um von diesem maximal quasiklassischen Bereich in einen der Beobachtung zugänglichen Bereich vorzudringen. Dieser beobachtbare Bereich erstreckt sich lediglich auf sehr begrenzte Regionen der Raumzeit, und die Belegung dieser Variablen ist in diesen Regionen nur sehr punktuell. (So ist beispielsweise das Innere von Sternen und sonstigen Planeten einer Beobachtung praktisch nicht zugänglich, und auch die Vorgänge auf ihrer Oberfläche lassen sich nur sehr grobkörnig erfassen.)

Die grobkörnigen Geschichten des maximal quasiklassischen Bereichs hingegen müssen nicht alle der menschlichen Beobachtung unzugänglichen Variablen aufsummieren und sie somit ausklammern. Statt dessen können diese Geschichten Beschreibungen der alternativen Ergebnisse von räumlich und zeitlich beliebig weit entfernten Prozessen beinhalten. Sie können sogar Ereignisse zu Beginn der Expansion des Universums erfassen, als es vermutlich noch nirgendwo komplexe adaptive Systeme gab, die als Beobachter hätten agieren können.

Fassen wir zusammen: Ein maximal quasiklassischer Bereich besteht aus einer vollständigen Menge disjunkter grobkörniger Geschichten des Universums, die die gesamte Raumzeit abdecken, dekohärieren, meistens

annähernd klassisch und gerade so feinkörnig sind, daß sie mit den übrigen Bedingungen in Einklang stehen. Die in diesem - von uns erörterten - speziellen maximal quasiklassischen Bereich verfolgten Größen sind Wertevorräte von Erhaltungs- und Faserhaltungsgrößen über kleine Volumina. Den uns vertrauten Erfahrungsbereich erhält man dadurch, daß man auf diesen maximalen Bereich ein extrem hohes Maß an zusätzlicher Grobkörnigkeit anwendet, das den Fähigkeiten unserer Sinne und Instrumente entspricht.

## **Die Zweigabhängigkeit verfolgter Größen**

Es ist wichtig, noch einmal hervorzuheben, daß die spezifischen, zu einem bestimmten Zeitpunkt verfolgten Größen von dem Ergebnis einer früheren Verzweigung der Geschichten abhängig sein können. So wird beispielsweise die Verteilung der Masse in der Erde, wie sie die in jedem Volumen einer Unzahl kleiner Volumina im Planeten enthaltene Energiemenge repräsentiert, vermutlich seit Entstehung der Erde von grobkörnigen Geschichten verfolgt. Doch was ist, wenn die Erde eines Tages infolge einer gegenwärtig nicht vorhersehbaren Katastrophe in tausend Stücke zerbricht? Was ist, wenn die Erde bei der Katastrophe verdampft, wie dies in einigen zweitklassigen Kinofilmen zu sehen ist? In den Geschichten, in denen dies geschieht, werden die grobkörnigen Geschichten nach der Katastrophe vermutlich andere Größen verfolgen als zuvor. Anders ausgedrückt: Was Geschichten bei einer bestimmten Grobkörnigkeit verfolgen, kann zweigabhängig sein.

## **Individuelle Objekte**

Wir haben den quasiklassischen Bereich, der unsere vertraute Erfahrungswelt umfaßt, mit Hilfe von Wertebereichen von Feldern und Erhaltungs- oder Faserhaltungsgrößen in kleinen Raumvolumina beschrieben. Doch wie erklärt sich die Entstehung individueller Objekte wie etwa eines Planeten?

Schon früh in der Geschichte des Universums begannen Materiemassen unter dem Einfluß der gravitativen Anziehung zu kondensieren. Die Schilderungen der alternativen grobkörnigen Geschichten nach dieser Zeit

sind viel prägnanter, wenn sie unter Heranziehung der so entstandenen Objekte beschrieben werden. Es ist viel einfacher, die Bewegung eines Sternensystems aufzuzeichnen, als all die wechselwirkenden Materiedichteschwankungen in einer Billion Billionen kleiner Volumina einzeln aufzulisten, die bei der Bewegung des Sternensystems auftreten.

Als aus den Galaxien Sterne, Planeten und Planetoiden hervorgingen und sich an einigen Orten komplexe adaptive Systeme wie die Lebewesen auf der Erde entwickelten, wurde die Existenz individueller Objekte zu einem immer charakteristischeren Merkmal des quasiklassischen Bereichs. Zahlreiche Regelmäßigkeiten des Universums lassen sich am prägnantesten anhand dieser Objekte beschreiben; aus diesem Grund stellen die Eigenschaften individueller Objekte einen Großteil der effektiven Komplexität des Universums dar.

Meistens ist die Beschreibung individueller Objekte dann am einfachsten, wenn die Definition den Zuwachs oder den Verlust relativ kleiner Materiemengen in Betracht zieht. Wenn ein Meteorit auf einem Planeten einschlägt oder eine Katze atmet, verändert sich dadurch weder die Identität des Planeten noch die der Katze.

Doch wie kann man Individualität messen? Man kann beispielsweise eine Menge ähnlicher Objekte betrachten und auf einer bestimmten Ebene der Grobkörnigkeit die Eigenschaften, die sie voneinander unterscheiden, so kurz wie möglich beschreiben, (wie etwa die verlorenen Federn der elf Kondore, die ich beim Verzehr eines toten Kalbs beobachtete). Die Zahl der Bits in der Beschreibung eines typischen Individuums kann dann mit der Anzahl Bits verglichen werden, die für die Zählung der Individuen der Menge erforderlich ist. Enthält die Beschreibung für die spezifische Ebene der Grobkörnigkeit mehr Bits als die Zählung, dann besitzen die Objekte der Menge Individualität.

Betrachten wir die Menge aller Menschen, die sich gegenwärtig auf etwa 5,5 Milliarden beläuft. Um jeder Person eine andere Zahl zuzuschreiben, benötigt man etwa 32 Bits, weil 2, 32mal mit sich selbst multipliziert, 4294967296 ergibt. Doch schon ein flüchtiger Blick aus der Nähe auf jede Person kann im Verein mit einer kurzen Befragung mühelos viel mehr als 32 Bits Information aufdecken. Und bei gründlicherer Analyse eines jeden Menschen kommt noch sehr viel mehr Individualität zum Vorschein. Wieviel zusätzliche Information wird erst verfügbar sein, wenn wir das individuelle Genom jedes Menschen entziffern können.

In unserer Galaxie gibt es etwa hundert Milliarden Sterne - nicht gerechnet die potentiellen Dunkelsterne, die die Astronomen vielleicht eines Tages entdecken werden. Um jedem Stern eine Seriennummer zuzuschreiben, brauchte man etwa 37 Bits. Über die in der Nähe befindliche Sonne sind den Astronomen viel mehr Daten bekannt, doch ist für andere Sterne die Körnigkeit viel gröber. Die Position am Himmel, die Helligkeit, das Spektrum des emittierten Lichts und die Bewegung lassen sich je nach Entfernung mit mehr oder minder großer Genauigkeit messen. Die Gesamtzahl der Bits liegt in der Regel nicht weit über 37, in manchen Fällen kann sie sogar darunter liegen. Mit Ausnahme der Sonne weisen die Sterne, wie die Astronomen sie heute beobachten können, eine gewisse, aber keine sonderlich große Individualität auf.

Die spezifische Grobkörnigkeit der heutigen Beobachtungen läßt sich dadurch vermeiden, daß man in den maximal quasiklassischen Bereich übergeht, der aus alternativen Geschichten besteht, die die gesamte Raumzeit abdecken und nicht nur dekohärent und fast klassisch sind, sondern aufgrund ihrer Dekohärenz und Quasiklassizität in gewisser Hinsicht auch maximal feinkörnig. Wo es zweckmäßig erscheint, kann man diese Geschichten anhand individueller Objekte formulieren, die außergewöhnlich detailgenau verfolgt werden und ein entsprechend hohes Maß an Individualität aufweisen.

Im üblichen maximal quasiklassischen Bereich ist die Information über jeden beliebigen Stern sehr viel größer als unsere Kenntnisse über die Sonne. Ebenso ist die Information über jeden einzelnen Menschen sehr viel umfassender als unser heute verfügbares Wissen. Wahrscheinlich könnte kein komplexes adaptives System, das einen Stern oder einen Menschen beobachtet, eine derart gigantische Informationsmenge wirklich verwerten. Zudem würde sich ein Großteil der Daten auf zufällige oder pseudozufällige Fluktuationen der Massendichte im Innern eines Sterns oder eines Knochens oder Muskels beziehen. Es ist schwer vorstellbar, wozu ein komplexes adaptives System eine solche Unmenge Informationen verwenden sollte. Allerdings könnten Regelmäßigkeiten innerhalb des Datenstroms sehr nützlich sein; so machen sich beispielsweise Mediziner derartige Regelmäßigkeiten zunutze, wenn sie mit Hilfe der Kernspin- oder Computertomographie Krankheiten diagnostizieren. Wie gewöhnlich besteht das deskriptive Schema, das ein komplexes adaptives System als Beobachter formuliert, aus einer

prägnanten Liste der Regelmäßigkeiten, und die Länge einer solchen Liste ist ein Maß für die effektive Komplexität des beobachteten Objekts.

## **Der proteische Charakter der Quantenmechanik**

Wie klassische probabilistische Situationen, etwa eine Folge von Pferderennen, bilden auch die grobkörnigen alternativen Geschichten des Universums, die den maximalen quasiklassischen Bereich darstellen, eine baumartige Struktur mit wohldefinierten Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Möglichkeiten an jedem Verzweigungspunkt. Worin unterscheidet sich dann die Quantenmechanik von der klassischen Mechanik? Ein offensichtlicher Unterschied liegt darin, daß die Grobkörnigkeit in der Quantenmechanik unverzichtbar ist, wenn die Theorie sinnvolle Aussagen machen soll. In die klassische Mechanik dagegen wird die Grobkörnigkeit nur wegen der Ungenauigkeit von Messungen oder einer sonstigen praktischen Beschränkung eingeführt. Doch ein weiterer Unterschied könnte mehr als alles andere die kontraintuitive Eigenart der Quantenmechanik erklären - ihren proteischen Charakter. Erinnern wir uns, daß Proteus in der klassischen Mythologie ein Prophet wider Willen war, der vielerlei Gestalt annehmen konnte. Damit man von ihm Voraussagen erhielt, mußte man seiner in einer seiner zahlreichen Verwandlungen habhaft werden.

Kehren wir zu unseren vereinfachten feinkörnigen Geschichten des Universums zurück, die den Ort jedes Teilchens im Universum zu jedem Zeitpunkt genau angeben. In der Quantenmechanik beruht die Feststellung des Ortes jedoch auf einer willkürlichen Entscheidung. Auch wenn es nach Heisenbergs Unbestimmtheitsrelation unmöglich ist, zugleich Ort und Impuls eines bestimmten Teilchens mit beliebiger Genauigkeit anzugeben, so kann man durchaus zu einigen dieser Zeitpunkte statt des Ortes den Impuls genau bestimmen. Folglich können feinkörnige Geschichten auf viele verschiedene Weisen ausgewählt werden, wobei jedes Teilchen zu bestimmten Zeitpunkten durch seinen Impuls und zu den übrigen Zeitpunkten durch seinen Ort bestimmt ist. Zudem gibt es eine unendliche Vielfalt weiterer, subtilerer Methoden, feinkörnige Geschichten des Universums aufzustellen.

## **Gibt es viele nichtäquivalente quasiklassische Bereiche?**

Wir können für jede dieser Mengen feinkörniger Geschichten zahlreiche verschiedene Grobkörnigkeiten erwägen und fragen, welche, wenn überhaupt eine, in einen maximal quasiklassischen Bereich führen, der sich durch dekohärente grobkörnige Geschichten auszeichnet, die mit laufend geringeren und manchmal größeren Abweichungen annähernd klassisches Verhalten zeigen. Außerdem können wir fragen, ob tatsächlich nennenswerte Unterschiede zwischen ihnen bestehen oder ob sie alle mehr oder minder gleich sind.

Jim Hartle und ich gehören zu den Wissenschaftlern, die eine Antwort auf diese Frage suchen. Bis zum Beweis des Gegenteils bleibt es denkbar, daß eine große Menge nichtäquivalenter maximaler quasiklassischer Bereiche existiert, von denen der uns vertraute Bereich nur ein Beispiel ist. Angenommen, dies sei der Fall, was unterscheidet dann den uns vertrauten quasiklassischen Bereich von allen anderen?

Jene, die sich der ersten Interpretation der Quantenmechanik anschließen, sagen, die Menschen hätten sich dafür entschieden, bestimmte Größen zu messen, und diese Entscheidung trüge mit dazu bei, den quasiklassischen Bereich, mit dem wir es zu tun haben, zu bestimmen. Etwas allgemeiner formuliert, könnten sie sagen, der Mensch ist nur imstande, bestimmte Größen zu messen, und der quasiklassische Bereich muß zumindest teilweise auf diesen Größen basieren.

## **Heimstätte komplexer adaptiver Systeme**

Zwar garantiert die Quasiklassizität allen Menschen und allen Systemen, die mit uns in Verbindung stehen, die Möglichkeit zum Datenvergleich, so daß wir alle mit demselben Bereich zu tun haben. Wird aber dieser Bereich in einem kollektiven Willensakt von uns *ausgewählt*? Eine solche Sichtweise wäre - wie andere

Aspekte der alten Interpretation der Quantenmechanik - unnötig anthropozentrisch.

Ein anderer, weniger subjektiv gefärbter Ansatz besteht darin, mit einem maximal quasiklassischen Bereich zu beginnen und festzustellen, daß er an bestimmten Zweigen binnen bestimmter Zeitspannen und in bestimmten räumlichen Regionen genau jene Mischung aus

Regelmäßigkeit und Zufälligkeit zeigt, die die Entwicklung komplexer adaptiver Systeme begünstigt. Das fast klassische Verhalten liefert die Regelmäßigkeit, während die Abweichungen vom Determinismus - die Fluktuationen - das Zufallselement beisteuern. Verstärkungsmechanismen einschließlich solcher, die Chaos erzeugen, erlauben einigen dieser Zufallsschwankungen, in Korrelation mit dem quasiklassischen Bereich zu treten und Verzweigungen hervorzubringen. Komplexe adaptive Systeme entwickeln sich also in Verbindung mit einem bestimmten maximal quasiklassischen Bereich, der in keiner Weise von diesen Systemen entsprechend ihren Fähigkeiten ausgewählt wurde. Vielmehr determinieren der Aufenthaltsort und die Fähigkeiten der Systeme das Ausmaß der zusätzlichen Grobkörnigkeit (die in unserem Fall tatsächlich sehr grob ist), die auf den bestimmten maximal quasiklassischen Bereich Anwendung findet, um zu dem Bereich zu gelangen, der von den Systemen wahrgenommen wird.

Angenommen, die Quantenmechanik des Universums erlaube, mathematisch gesehen, mehrere mögliche maximal quasiklassische Bereiche, die wirklich nichtäquivalent seien. Nehmen wir ferner an, komplexe adaptive Systeme entwickelten sich eigentlich, um eine bestimmte Grobkörnigkeit von jedem dieser maximal quasiklassischen Bereiche zu nutzen. Dann würde jeder Bereich eine Reihe alternativer grobkörniger Geschichten des Universums liefern, und Informationssammlungs- und -verarbeitungssysteme (IGUSe) würden in jedem einzelnen Fall die Ergebnisse der verschiedenen probabilistischen Verzweigungen am Baum möglicher Geschichten registrieren, der in den beiden Fällen ein recht unterschiedliches Aussehen hätte !

Bestünde zwischen den ansonsten unterschiedlichen quasiklassischen Bereichen ein bestimmter Grad an Übereinstimmung in den verfolgten Phänomenen, dann könnten die beiden IGUSe einander gewahr werden und sogar in gewissem Umfang miteinander kommunizieren. Doch ein Großteil dessen, was ein IGUS verfolgt, könnte das andere IGUS nicht direkt wahrnehmen. Nur mit Hilfe einer quantenmechanischen Berechnung oder Messung könnte ein IGUS das gesamte Spektrum der vom anderen wahrgenommenen Phänomene erfassen. (Dies mag manch einen an die Beziehung zwischen Mann und Frau erinnern.)

Könnte ein Beobachter, der einen Bereich benutzt, wirklich erkennen, daß andere Bereiche - mit ihren eigenen Mengen sich verzweigender

Geschichten und ihren eigenen Beobachtern - als alternative Beschreibungen der möglichen Geschichten des Universums verfügbar sind? Dieser faszinierende Fragenkomplex ist von Science-fiction-Autoren aufgeworfen worden (die manchmal im Anschluß an den russischen Theoretiker Starobinsky den Ausdruck »Koboldwelten« verwenden), doch erst jetzt schenken ihm die Spezialisten auf dem Gebiet der Quantenmechanik die gebührende Beachtung.

Die theoretischen Physiker, die an der modernen Interpretation der Quantenmechanik arbeiten, möchten, daß die Epoche zu Ende geht, die unter dem Diktum von Niels Bohr stand: »Wer behauptet, über die Quantenmechanik nachdenken zu können, ohne verrückt zu werden, zeigt damit bloß, daß er nicht das Geringste davon verstanden hat.«