

Wie viele Everett-Welten gibt es eigentlich?

H. D. Zeh – www.zeh-hd.de (Dezember 2010 – zuletzt geändert: 4. 5.12)

Diese Frage wird häufig gestellt, wenn jemand zum ersten Mal etwas über die Viele-Welten-Theorie hört (s. etwa www.zeh-hd.de/VieleWelten.pdf). Sie besitzt zwar nicht einmal im Prinzip eine eindeutige Antwort, denn objektiv (also von einem Standpunkt, den Max Tegmarks die quantenmechanische "Vogelperspektive" nennt) existiert nur eine einzige Quantenwelt. Da wir als Beobachter aber Teil dieser Welt sind, müssen wir uns mit der sich aus unserer Situation darin ergebenden "Froschperspektive" begnügen, die im Rahmen einer universellen Quantentheorie erst die phänomenologischen (also separat wahrgenommenen) "Welten" begründen kann. Wir existieren als subjektive Beobachter offenbar in einer dieser sich ständig verzweigenden Welten und können daher jeweils auch nur diese wahrnehmen. Es geht also hier um einen Zusammenhang zwischen den Welten der "klassischen" Erscheinungen und einer Quantenwelt, über die uns nur die Theorie etwas sagen kann. Auch wenn dieser Zusammenhang gar nicht eindeutig definiert ist, ist es lehrreich, wenigstens die Gründe dafür genauer zu verstehen. Die theoretische Quantenwelt beruht dabei, wie jedes kosmologische Konstrukt, auf der hypothetischen Extrapolation der uns bekannten Naturgesetze – in diesem Falle der Schrödingerschen Quantendynamik. Ein psychologisches Problem ergibt sich aber gerade für Physiker aus der ursprünglichen Rezeption der formalen Theorie durch ihre Begründer, die eine nichtlokale Realität gar nicht in Erwägung zogen und das Zustandekommen der klassischen Begriffe, wie wir es heute verstehen, noch nicht erkannten. Daher postulierten sie die Existenz zweier grundsätzlich verschiedener Theorien für die Mikro- und die Makrowelt oder stellten gar die Existenz einer realen Welt ganz in Frage (s. www.zeh-hd.de/Realitaet.pdf).

Wie auch immer man die verschiedenen phänomenologischen "Welten" innerhalb einer Quantenwelt begrifflich genau von einander trennt, ihre Zahl ist so ungeheuer groß, daß sie allein schon viele Menschen und, gemeinsam mit den genannten psychologischen Problemen, anscheinend auch die meisten Physiker davon abhält, die Existenz der anderen Welten ernsthaft für möglich zu halten. Dabei müßte uns die Geschichte der Kosmologie eigentlich eines Besseren lehren. Nur rein konkret denkenden Menschen

erscheint schon die Zahl N der Gasmoleküle in einem Kubikzentimeter (ca. 10^{20} , also 100 Trilliarden) als "unvorstellbar". Die Zahl der Fixsterne von 10^{22} im uns zugänglichen Universum liegt noch etwas höher und wird trotzdem heute keineswegs als absurd angesehen – auch wenn eine solche Zahl von potentiellen Kopien des ehemals als unsere Welt angesehenen Sonnensystems den Menschen zu Zeiten von Kepler oder Newton als völlig extravagant erschienen wäre. Mit mangelnder Vorstellbarkeit sollte eine Ablehnung also nicht begründet werden, denn all diese Zahlen sind sehr wohl "denkbar" (also logisch konsistent). Das gilt auch für die noch sehr viel größeren Zahlen Z der möglichen Mikrozustände eines physikalischen Systems, die wir aus der statistischen Physik kennen. Ihr Logarithmus definiert die Entropie S , wenn man die Boltzmannsche Konstante gleich eins setzt, also Temperaturen in Energieeinheiten mißt. Somit gilt $Z = e^S \equiv \exp(S)$, wobei die thermodynamische Entropie additiv, also proportional zur Zahl der Teilchen im System ist. Man erhält also für einen Kubikzentimeter eines Gases eine Zustandszahl der Art $Z = z^N = e^{Ns} \approx \exp(10^{20}s)$, wobei s die Entropie je Molekül ist. Die Zahl $z = e^s$ ist die Zahl der Planck-Zellen der Größe h^3 , die jedem Molekül im Durchschnitt zur Verfügung stehen. Die molekulare Entropie s ist unter normalen Bedingungen numerisch etwa gleich 10 und hängt nur schwach (logarithmisch) von Temperatur und Dichte ab.

Doppelexponenten dieser Art liegen aber wirklich weit jenseits unseres Vorstellungsvermögens, worauf sogar schon berühmte Physiker und Mathematiker hereingefallen sind. Wenn man etwa die obige Zahl Z mit dem gewaltigen Faktor einer Trilliarde (10^{18}) multiplizieren will, muß man lediglich den Exponenten 10^{20} auf $10^{20.0043}$ erhöhen, was das enorme Größenpotential der Doppelexponenten zum Ausdruck bringt: Trotz des riesigen Faktors unterscheiden sich die Entropien also kaum merklich. Für kosmologische Zwecke, wie hier beabsichtigt, muß man zur Berechnung der Entropie für N sogar die Zahl der Teilchen im uns zugänglichen Universum (überwiegend Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung), nämlich 10^{88} , wählen. Obwohl nicht aufwändiger zu schreiben (also auch zu "denken") ist das numerisch ein gigantischer Unterschied für Z .

Die Everett-Welten hängen eng mit diesen statistischen Möglichkeiten zusammen, denn die quantenmechanische Wellenfunktion beschreibt zu jeder Zeit eine Superposition aller möglichen "Konfigurationen" (klassische Zustände der gerade gezählten Art). Gelegentlich wird daher behauptet, laut Everett existiere eben alles, was im Prinzip möglich ist. Superpositionen definieren jedoch *individuelle* quantenmechanische Zu-

stände – daher gibt es aus der Vogelperspektive auch nur *eine* Quantenwelt. Aber selbst aus unserer Froschperspektive tragen noch sehr viele klassische Konfigurationen zu jeweils nur einer gemeinsamen "Welt" bei. So ist etwa ein Elektron im Wasserstoffatom oder im Streuversuch gleichzeitig an unendlich vielen Positionen, existiert aber in Form seiner ausgedehnten Wellenfunktion in jeder "Welt", in der seine Position nicht gerade gemessen wurde, in nur einem einzigen Quantenzustand. Seine verschiedenen Positionen darin sind also nicht separat zu zählen. Die meisten der als separat zu betrachtenden "Welten" sind darüberhinaus als extrem unwahrscheinlich anzusehen, wie sich aus der sich dynamisch aus einer universellen Anfangsbedingung entwickelnden Wellenfunktion des Universums (eben der als eindeutig angenommenen Quantenwelt) ergibt. Dazu gehören etwa solche Everett-Welten, in denen die Tröpfchen in einer Wilsonschen Nebelkammer nach einem α -Zerfall nicht näherungsweise längs gerader Linien (scheinbarer Bahnen) liegen. Diese „Leere“ des fundamentalen Konfigurationsraums zeigt sich auch empirisch in der Abwesenheit von ansonsten zu erwartenden „Rekohärenzprozessen“ (das sind inverse Dekohärenzprozesse – also Vereinigungen von existierenden Everett-Welten).

Bei unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten w_i von Zuständen oder Welten kann man ihnen immer noch eine effektive Zustands- oder Weltenzahl Z_{eff} durch das Inverse einer mittleren Wahrscheinlichkeit, $Z_{\text{eff}} = 1/\langle w \rangle = 1/\sum_i w_i^2$, zuordnen. (Die eckigen Klammern bezeichnen hier einen Mittelwert.) Das Hauptproblem bleibt aber, welche Teile ("Komponenten") der Wellenfunktion denn überhaupt separate "Welten" bilden, also einen eigenen Indexwert i in der obigen Summe rechtfertigen, denn formal gibt es unendlich viele Komponenten. Laut Everetts Vorstellungen führen erst makroskopisch unterschiedliche Meßergebnisse auf verschiedenen Welten. Was aber macht den Unterschied aus?

Betrachten wir etwa eine Messung, die lediglich feststellt, ob ein Atomkern bereits zerfallen ist oder noch nicht (nicht unbedingt mittels einer dabei umzubringenden Katze). Das Ergebnis "ja" oder "nein" definiert jeweils eine verbleibende Partialwellenfunktion für das System Kern plus Meßapparat plus Umgebung. Die Zahl der Everett-Welten hätte sich also verdoppelt, jedoch wird die Veränderung der Zahl Z_{eff} wegen der unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten im allgemeinen geringer sein als ein Faktor 2. Wiederholen wir das Experiment mit einem zweiten Atomkern, und macht jemand in Australien gerade (einmal) das gleiche Experiment, so erhalten wir eine Zunahme der

effektiven Zahl Z_{eff} von Everett-Welten um einen Faktor, der maximal 2^3 ist. Finden gleichzeitig sogar M Messungen statt, die im Durchschnitt auf m_{eff} verschiedene Ergebnisse führen, so erhalten wir bereits eine Vergrößerung von Z_{eff} um den Faktor m_{eff}^M . Für die Zahl der heute existierenden Everett-Welten muß M gleich der Zahl aller bisher im Universum durchgeführten irreversiblen Messungen sein, wobei wir unter "Messungen" alle Ereignisse zu verstehen haben, die man traditionellerweise durch einen Kollaps der Wellenfunktion beschreibt. Diese numerische Abschätzung könnte sich also ebensogut auf die möglichen Endzustände einer rein stochastischen Theorie beziehen und ist somit ganz unabhängig von Everetts Annahme vieler "realer" Welten.

Jedenfalls erhalten wir wieder Zahlen von der Form der oben diskutierten Doppelpotenzen, denn M muß ebenso wie die Teilchenzahl einer hohen Zehnerpotenz entsprechen, ist andererseits aber deutlich kleiner als diese. Denn wenn ein Meßergebnis makroskopisch sein soll, kann Z_{eff} im Gegensatz zur oben betrachteten Zahl der mikroskopischen Zustände Z höchstens gleich der Zahl der *makroskopisch* verschiedenen möglichen Zustände sein, von denen, wie gesagt, die meisten sogar als unwahrscheinlich praktisch ausgeschlossen werden können. Während nun in der Kopenhagener Interpretation rein pragmatisch und ad hoc entschieden würde, wann eine "Messung" vorliegt, gibt die Dekohärenztheorie, die gerade auf der Annahme einer Universalität der Schrödinger-Dynamik beruht, uns quantitative Kriterien, die jedoch nur sehr aufwändig allgemein auszuwerten wären. Dabei erkennt man aber unter anderem, daß Messungen einer kontinuierlichen Variablen keineswegs zu unendlich vielen makroskopisch verschiedenen Ergebnissen m_{eff} führen, da durch den realistischen Dekohärenzprozeß endliche "Kohärenzlängen" verbleiben, innerhalb derer die Superposition auch lokal weiterbesteht. Die Kohärenz verschwindet zwar nur asymptotisch mit dem Abstand zwischen zwei Meßwerten, man erhält aber eine *effektive Diskretisierung* der Meßergebnisse, die endlichen Anzahlen m_{eff} von "Meßergebnissen" entspricht. Ähnliches gilt, wenn man Zerfallszeiten kontinuierlich registriert – also nicht, wie in obigem Beispiel, nur einmal mißt –, wiewohl schon die kontinuierliche Registrierung des Zerfallszustandes eines einzelnen Atomkerns auf eine recht große Zahl von Welten führt.

Wichtig ist, daß der Dekohärenzprozeß stets und ohne Beteiligung eines menschlichen Beobachters abläuft und keine eigentliche Messung voraussetzt. Da Superpositionen aus der Vogelperspektive betrachtet immer erhalten bleiben, beschreibt ihre Dekohärenz also nur den Verlust ihrer Beobachtbarkeit für uns lokale "Frösche". Die *potenti-*

ell dabei auftretende Aufspaltung des Beobachterzustands ist also die eigentliche Motivation für die begriffliche Trennung der "Welten" (den scheinbaren Kollaps).

In der statistischen Physik, in der es auf das Abzählen der möglichen verschiedenen (in der Quantentheorie auch orthogonalen) Mikrozustände ankommt, betrachtet man die makroskopischen Eigenschaften gewöhnlich als objektiv vorgegeben (unabhängig von unserem tatsächlichen Wissensstand). Die Entropie ist etwa eine Funktion von Energie und Volumen eines Gases, auch wenn diese gar nicht bekannt sind. Sind für diese makroskopischen Größen also nur Wahrscheinlichkeiten bekannt, so bedingen diese keine physikalische Entropie sondern "fehlende Information", für die man formal aber noch eine Informationsentropie S_{inf} durch ihre ("subjektive") Wahrscheinlichkeitsverteilung definieren kann. Die physikalische Entropie S_{phys} bezieht sich dann nur auf die verbleibenden möglichen Mikrozustände für jeden Makrozustand. Somit erwartet man ihre durchschnittliche Zahl als $\langle \exp(S_{phys}) \rangle = \exp(S) / \langle \exp(S_{inf}) \rangle \approx \exp(S - \langle S_{inf} \rangle) \approx \exp(S)$. (Die spitzen Klammern bedeuten hier einfach Durchschnittswerte.) Die Näherung ganz rechts trotz der erheblichen Größe des Nenners $\langle \exp(S_{inf}) \rangle$ sollte verständlich werden, wenn man sich die anzunehmenden extrem unterschiedlichen Zehnerpotenzen für S und S_{inf} vergegenwärtigt. Unter deterministischen Dynamiken ist aber nur die totale Entropie S ("Ensemble-Entropie") eine Erhaltungsgröße, so daß man Information und physikalische Entropie ineinander umwandeln kann (s. etwa Kap. 3.3 in www.time-direction.de).

Die Zahlen $\exp(S_{inf})$, die unseren durchschnittlichen Mangel an Wissen über die makroskopische Welt beschreiben, sind jedoch noch immer deutlich kleiner als die gesuchte Zahl Z_{eff} der Everettwelten, da die meisten durch Dekohärenz "klassisch" gewordenen Variablen trotzdem "thermalisiert" (also chaotisch und unkontrollierbar) werden und daher *nicht* als makroskopisch gegeben angesehen werden. Erst bei der Ablesung des Meßergebnisses oder einer anderen tatsächlichen Beobachtung verzweigt sich auch der Beobachter in verschiedene Everett-Welten, wobei seine individuelle "Wahl" nur subjektive Bedeutung haben kann (in jeder Welt eben anders). Deswegen kann der durch einen objektiven Dekohärenzprozeß beschriebene *scheinbare* Kollaps der Wellenfunktion auch keine überlichtschnellen physikalischen Einflüsse beschreiben, obwohl das Auftreten eines Teilchens "hier" dessen Wellenfunktion gemäß Kollapsvorstellungen überall sonst zum Verschwinden zu bringen scheint. Die scheinbar verschwindenden Anteile existieren gemäß der Schrödinger-Gleichung in "anderen Welten" weiter.

Betrachten wir als Beispiel den Spin eines Neutrons oder die Polarisation eines Photons, zwei typische Realisierungen eines "qubits", das für das Konzept von Quantencomputern benutzt wird. Im Streuexperiment kann man den Strahl solcher Teilchen je nach Spin oder Polarisation mittels eines inhomogenen Magnetfeldes oder eines Polarisators aufspalten (mit Amplituden, die von der Ursprungspolarisation abhängen). Das definiert aber noch keine zwei neuen Welten, da man die beiden Teilstrahlen in derselben Welt wieder kohärent vereinen kann. Erst wenn die beiden Strahlen (in Form von Wellenpaketen) durch Wechselwirkung mit der weiteren Umgebung irreversibel dekohäriert werden – etwa durch eine Messung mit einem makroskopischen Apparat – entstehen gemäß der Schrödinger-Gleichung zwei autonome Welten, die gegebenenfalls auch den Beobachter in zwei verschiedenen Zuständen enthalten.

Als nächstes können wir nun eine Anordnung von N qubits beliebiger Art als Elemente eines potentiellen Quantencomputers betrachten. Die Superposition ihrer Zustände führt auf 2^N Komponenten, die aber wie die beiden obigen Strahlen vor ihrer Dekohärenz alle in *einer* Welt existieren müssen, wenn der Quantencomputer funktionieren soll. Bei handelsüblichen Computern oder im Nervensystem werden die Zustände aller dort im Prinzip ebenfalls vorhandenen qubits ständig dekohäriert (sie werden damit zu klassischen bits), so daß man eine Aufspaltung in 2^N Everett-Welten erhält, die nicht mehr miteinander interferieren können. Wenn David Deutsch davon spricht, daß ein Quantencomputer gleichzeitig in verschiedenen Welten rechnet, ist das vielleicht ein hübsches Bild für Journalisten, widerspricht aber einem angemessenen Konzept von Everettschen Welten. Deutsch definiert Welten nicht als Wellenfunktionen, sondern als klassische Bahnen oder Feynman-Pfade, von denen es selbst in jeder Everett-Welt noch unendlich viele gäbe, die aber bestenfalls formale Hilfskonstrukte sind. Trotzdem scheint diese Fehlinterpretation oder Trivialisierung der "Vielen Welten" weit verbreitet zu sein.

Die Bedeutung des Dekohärenzkonzepts für die Natur der Everettschen Verzweigungen kann man sich am Modell eines sich verzweigenden Baumes klarmachen. Betrachtet man den Baum in einer zweidimensionalen Projektion (auf einem Foto), so scheinen sich die Zweige überall zu kreuzen, obwohl sie dreidimensional getrennt voneinander bleiben. Man kann sich also vorstellen, daß ihre Abstände mit zunehmender Dimensionszahl des Raumes rapide wachsen müßten, wenn sie alle einem gemeinsamen Stamm (dem Urknall?) entsprungen sind. Ähnliches geschieht etwa bei einem Stern-

Gerlach-Experiment. In der durch das Experiment ausgezeichneten Ebene lassen sich die beiden Wellenpakete mit einigem Aufwand wieder in einem Paket vereinigen und zur Interferenz bringen. Erlaubt man ihnen, sich mittels weiterer inhomogener Magnetfelder auch in der dritten Dimension auszubreiten, wird das schon etwas schwieriger. Bei Wechselwirkung mit der Umgebung kommen aber zunehmend weitere Dimensionen des Konfigurationsraums für die Dynamik des Wellenpakets hinzu, so daß das Vorhaben ganz aussichtslos wird und jede derartige Verzweigung als irreversibel angesehen werden kann. Die vielen Zweige ergeben sich aus den Annahmen einer universellen deterministischen Schrödingergleichung und eines gemeinsamen „Stammes“ (des Ursprungs der Kausalität), während wir aus unserer Froschperspektive nur einen einsamen, sich stochastisch entwickelnden Zweig in einem ansonsten völlig „leeren“ Konfigurationsraum als real ansehen, da es keine kausalen Zusammenhänge zwischen den Zweigen mehr gibt. Die dynamische Trennung der durch Dekohärenz entstehenden Zweige erfolgt jedoch graduell und bleibt in den meisten Fällen praktisch ohne jeden Einfluß auf irgendwelche Beobachterzustände. Dann bleibt auch die Frage, ob und ab wann solche Zweige eigene „Welten“ bilden, reine Definitionssache, während ein realer Kollapsprozeß durch eine wohldefinierte Modifikation der Schrödingergleichung gegeben sein müßte.

Auch wenn die Größenordnung der effektiven Zahl von Everett-Welten (im groben Sinne der Doppelsexponenten) durch den objektiven Dekohärenzprozeß trotz solcher Detailfragen recht gut definiert ist, läßt sie sich nur schwer abschätzen. Sie liegt irgendwo im sehr weiten Bereich zwischen den Zahlen der möglichen Makro- und Mikrozustände dieser Welt. Zwar ließe sie sich mit etwas Mühe deutlich besser eingrenzen, bliebe aber vorwiegend von akademischer Bedeutung und anscheinend ohne jede praktische Konsequenz.