Andreas Krumpel

Vieleweltentheorie

Das Thema meines heutigen Referats ist eine Theorie, die unter dem Namen Vieleweltentheorie (engl.: "Many World Interpretation" oder kurz: MWI) bekannt geworden ist.
Begonnen hat alles mit einem Mann, **Dr. Hugh Everett III (geb. 1930, gest. 1982),**

der 1957 als Doktorand an der Princeton University eine Doktorarbeit mit dem Titel "The Theory of the Universal Wave-Function" einreichte. Eine kürzere Version wurde noch im selben Jahr unter dem Titel "Relative State Formulation of Quantum Mechanics"[1] veröffentlicht. Sein Doktorvater, John Archibald Wheeler akzeptierte seine Folgerungen zwar nicht (er war Anhänger der Kopenhagener Deutung, auch wenn er sie für unvollständig hielt), unterstützte Everetts Ideen aber in einem anderen Artikel, um sie mit bekannt zu machen.[2] Dennoch fand die Theorie 10 Jahre lang keine Beachtung, bis sie schließlich von Bryce S. DeWitt und Neill Graham wieder entdeckt und durch ihre Interpretation als „Vieleweltentheorie" bekannt wurde.
Everett nannte seine Arbeit eine Theorie der relativen Zustände. Was genau das bedeutet, wird noch erläutert. Er selber hat es vermieden, seine mathematische Theorie ausführlich zu interpretieren. Das wurde dann etliche Jahre später von verschiedenen Leuten auf verschiedene Weisen getan. Um Verwirrungen zu vermeiden, werde ich zunächst die mathematische Grundlage der Theorie vorstellen und anschließend auf einige der Interpretationen zu sprechen kommen.

Worum geht es also in der Arbeit von Everett?

Der konventionellen Formulierung der Quantenmechanik zufolge wird ein physikalisches System vollständig durch eine Zustandsfunktion ψ beschrieben, die ein Element eines Hilbertraumes $\mathcal{H}$ ist. Sie hat zwar keine reale Bedeutung im Sinne von Messbarkeit, legt jedoch die Wahrscheinlichkeiten der Ergebnisse fest, die durch mehrere Beobachtungen eines Systems durch einen externen Beobachter erhalten werden. Nun gibt es zwei völlig verschiedene Wege, auf denen sich die Zustandsfunktion ändern kann:

[1] *Reviews of Modern Physics* 29, 454-62 (1957)
[2] fälschlicherweise wurde die Theorie Everetts lange als „Everett-Wheeler Theorie bezeichnet.

Prozess 1: Die diskontinuierliche Änderung, herbeigeführt durch die Anwendung eines Projektors (Filters) $P(\phi_i) = |\phi_i\rangle\langle\phi_i|$, der eine Komponente von ψ, parallel zu dem Eigenzustand $|\phi_i\rangle$ mit der Wahrscheinlichkeit $|\langle\phi_i|\psi\rangle|^2$ herausfiltert.
(→Zustandsreduktion)

Prozess 2: Die kontinuierliche, deterministische Änderung des Zustandes eines isolierten Systems mit der Zeit, gemäß der Wellenfunktion $A\psi = \partial\psi/\partial t$, wobei A ein linearer Operator ist.

Everett postuliert nun, dass eine ausschließliche Wellenmechanik (nur Prozess 2 also) eine vollständige Theorie darstellt. Oder, mit anderen Worten:
Postulat:

Alle isolierten Systeme entwickeln sich gemäß der Schrödinger-Gleichung:

$$H\psi = -\frac{\hbar}{i}\frac{\partial\psi}{\partial t}.$$

Wie wir noch sehen werden, sind zwei direkte Konsequenzen dieses Postulats:

- Es kann kein bestimmtes Ergebnis bei einer Quantenmessung geben (→ kein Zusammenbruch der Wellenfunktion).

- Das gesamte Universum entwickelt sich entsprechend der Schrödinger-Gleichung, da es sich definitionsgemäß um ein isoliertes System handelt. (→ kein Heisenbergschnitt-Problem)
  (Aus diesem Grund wird die MWI oft auch als „universal gültige QM“ bezeichnet.)

Das sieht auf den ersten Blick ziemlich verlockend aus: Die vorherrschende Interpretation der QM, die Kopenhagener Deutung, versagt nämlich genau in diesen beiden Punkten:

Ihr zufolge unterscheiden sich die Objekte im ganz Kleinen in ihrem Verhalten von denen, die wir vollständig mit Hilfe der klassischen Mechanik beschreiben können.
Da stellt sich natürlich die Frage: Wo hört diese qm Welt auf und wo beginnt die klassische? Also, auf welchem Niveau bricht die Wellenfunktion tatsächlich noch (oder schon) zusammen? In dem Vortrag von .... (Kopenhagener Deutung) wurde bereits auf das Problem hingewiesen: (Folie: „Wohin lege ich den sog. Heisenbergschnitt?“).
Und dann ist da noch das Konzept des Zusammenbruchs der Wellenfunktion, das in den frühen 1930 von John von Neumann eingeführt wurde und seitdem zu einem wesentlichen Bestandteil der orthodoxen Interpretation der QM geworden ist. Aber woher wissen wir, dass die Funktion tatsächlich zusammenbricht? Die Antwort lautet: Wir wissen es nicht. Der Zusammenbruch erklärt, warum aus der ursprünglichen Superposition von Eigenzuständen vor der Quanten-Messung ein einzelner nach der Messung übrigbleibt. Aber es handelt sich hier um eine ziemlich unbefriedigende Erklärung. Die Kopenhagener Lösung des Messproblems besteht darin, zu sagen, dass es keine Lösung gibt.
Wie dem auch sei, Everetts Theorie umgeht einfach diese Probleme. Sie wirft jedoch auch eine Menge anderer auf, auf die ich später noch zu sprechen komme.

Wie ich bereits gesagt habe, basiert die MWI auf reiner **Wellenmechanik**. Keine Abrupte Änderung des Zustandes. Wenn aber das gesamte Universum qm behandelt werden soll und es aufgrund dessen keinen außenstehenden Beobachter mehr gibt, was bedeutet das für den Zustand? Wie muss dieser beschaffen sein? Wie in dem Referat über die „De Broglie-Bohm-Theorie“ bereits erwähnt wurde, muss eine jede universelle Theorie eine Wellenfunktion des Universums liefern können. Und diese Wellenfunktion müsste aus verschränkten Zuständen bestehen, um die Abhängigkeit der Untersysteme voneinander auszudrücken.

Aus diesem Grund ist das wichtigste Konzept in Everett's Sichtweise das des **„Relativen Zustandes“**:

Ein geschlossenes System kann aus mehreren Untersystemen bestehen. Der einfachste Fall ist der eines geschlossenen Systems Σ, bestehend aus zwei Untersystemen *S* und *A*, mit assoziierten Hilberträumen $\mathcal{H}_S$ und $\mathcal{H}_A$. Dann ist, wie sie alle wissen, der Hilbertraum von Σ das Tensorprodukt der Hilberträume $\mathcal{H}_S$, $\mathcal{H}_A$: $\mathcal{H}_\Sigma = \mathcal{H}_S \otimes \mathcal{H}_A$. Sind weiterhin $\{|s_k\rangle\}$ eine Basis der Zustände für *S* und $\{|a_j\rangle\}$ eine der Zustände für *A*, dann ist die Wellenfunktion des Gesamtsystems Σ:

$$|\psi^\Sigma\rangle = \sum_{j,k} c_{jk} |s_k\rangle |a_j\rangle \qquad (1)$$

Wir können nun für jeden beliebigen Zustand des einen Untersystems einen korrespondierenden *relativen* Zustand des anderen Untersystems aufschreiben. Wenn wir z.B. den Zustand $|s_l\rangle$ für *S* wählen, wobei das Gesamtsystem in dem Zustand (1) sein soll, dann wird der korrespondierende *relative* Zustand von *A* folgendermaßen aussehen:

$$|A(s_l)\rangle = N_l \sum_j c_{jl} |a_j\rangle, \qquad (2)$$

wobei N_l eine Normalisierungskonstante ist. Man sieht, dass der Relativzustand zu $|s_l\rangle$ nur von diesem Vektor abhängt und unabhängig ist von den anderen zu $|s_l\rangle$ orthogonalen Basisvektoren $\{|s_k\rangle\}$ ($k \neq l$).
Mit Hilfe des Ausdruckes (2) kann man (1) dann auch in folgender Form schreiben:

$$\boxed{|\psi^\Sigma\rangle = \sum_k \frac{1}{N_k} |s_k\rangle |A(s_k)\rangle} \qquad (3)$$

Hieran erkennt man, dass im allgemeinen nicht so etwas wie ein einzelner Zustand für ein Untersystem eines Gesamtsystems existiert. Untersysteme besitzen keine Zustände, die unabhängig von denen der restlichen Untersysteme sind. Sie stehen für gewöhnlich miteinander in Beziehung. Man kann willkürlich einen Zustand für ein Untersystem wählen und bekommt damit den relativen Zustand für den Rest.
Everett schreibt dazu:

"Thus we are faced with a fundamental relativity of states, *which is implied by the formalism of composite systems. It is meaningless to ask the absolute state of a subsystem – one can only ask the state relative to a given state of the remainder of the subsystem."*[3]

Ich möchte nun ein einfaches Modell für einen Messprozess vorstellen, das auf von Neumann zurückgeht und das Konzept des relativen Zustandes verdeutlicht. Unser isoliertes System sei eine Welt, die aus zwei dynamischen Größen, einem System S (Basis (eigentliche Zustände): $\{|s_k\rangle\}$; Eigenwerte: s_k) und einem Apparat A (Basis (uneigentliche Zustände): $\{|a_j\rangle\}$; Eigenwerte: a_j) besteht. Wir nehmen der Einfachheit halber an, dass der Eigenwert s_k des Systems ein diskretes Spektrum aufweist, während der Eigenwert a_j kontinuierlich sei.

Der Zustand der Welt kann dann anfänglich durch einen normierten Vektor der Form

$$|\psi^{S+A}\rangle = |\psi^{S}\rangle|\psi^{A}\rangle \tag{4}$$

dargestellt werden, wobei sich $|\psi^{S}\rangle$ auf das System und $|\psi^{A}\rangle$ auf den Apparat bezieht. In diesem Zustand sind das System und der Apparat unkorreliert. Bringt man nun die beiden Systeme miteinander in Beziehung, so wird der Apparat einen Zustand annehmen, der von dem des Systems abhängt. Der Anfangszustand (4) wird sich also im Laufe der Messung verändern. Diese Veränderung wird auf eine Veränderung des Apparatzustandes zurückzuführen sein. Unser Apparat ist ja schließlich unser Referenzpunkt, dasjenige Untersystem, welches über das andere etwas „lernt". Da der Gesamtzustand (4) nach den orthonormalen Basisvektoren

$$|s_k\rangle|a_j\rangle$$

entwickelt werden kann, müssen sich diese nach der Messung verändern:

$$|s_k\rangle|a_j\rangle \rightarrow |s_k\rangle|a_j + gs_k\rangle, \tag{5}$$

g ist hier eine Kopplungskonstante (regelbar). Das ist folgendermaßen zu verstehen: Wenn zu Beginn das System in dem Zustand $|s_k\rangle$ war und der Apparat in dem Zustand $|a_j\rangle$, dann bedeutet die rechte Seite von (5), dass durch die „Beobachtung" des Apparates an dem System, sich der Zustand des Apparates bleibend von $|a_j\rangle$ nach $|a_j + gs_k\rangle$ verändert hat. Der Apparat hat also eine Art „Gedächtnis" in dem das Ergebnis des Messprozesses gespeichert wird.

Der Vorgang (5) wird durch einen sog. Kopplungsoperator *U* realisiert:

$$U|s_k\rangle|a_j\rangle = |s_k\rangle|a_j + gs_k\rangle \tag{6}$$

Dieser Operator wurde von Everett in seiner Originalarbeit nicht direkt erwähnt. Er wies nur darauf hin, dass der Zustand auf der rechten Seite von (5) eine Lösung der zugehörigen

[3] "Relative State Formulation of Quantum Mechanics", *Reviews of Modern Physics,* 29, 454-62 (1957)

Schrödinger-Gleichung darstellt. Die Wahl von *U* wurde im wesentlichen von von Neumann formuliert.
Damit kann ich den Gesamtzustand nach der Messung angeben:

$$\begin{aligned}\left|\psi_1^{\mathrm{S+A}}\right\rangle &= U\left|\psi^{\mathrm{S}}\right\rangle\left|\psi^{\mathrm{A}}\right\rangle \\ &= U\sum_k \left|s_k\right\rangle \underbrace{\left\langle s_k \middle| \psi^{\mathrm{S}}\right\rangle}_{\equiv\psi^{\mathrm{S}}(s_k)} \cdot \int_j \left|a_j\right\rangle \underbrace{\left\langle a_j \middle| \psi^{\mathrm{A}}\right\rangle}_{\equiv\psi^{\mathrm{A}}(a_j)} dj \\ &= \sum_k \psi^{\mathrm{S}}(s_k) \int_j U\left|s_k\right\rangle\left|a_j\right\rangle \psi^{\mathrm{A}}(a_j) dj\end{aligned}$$

oder

$$\boxed{\left|\psi_1^{\mathrm{S+A}}\right\rangle = \sum_k \psi^{\mathrm{S}}(s_k)\left|s_k\right\rangle\left|\psi^{\mathrm{A}}[s_k]\right\rangle}, \tag{7}$$

wobei

$$\left|\psi^{\mathrm{A}}[s_k]\right\rangle = \int_j \left|a_j + g s_k\right\rangle \psi^{\mathrm{A}}(a_j) dj$$

Wie man anhand von (7) erkennt, ist ein Ergebnis des Messprozesses, dass der Zustand des Apparates nicht mehr unabhängig definiert werden kann. Er kann nur noch *relativ* zu dem Zustand des Systems ausgedrückt werden.
Des weiteren sieht man, dass der Zustandsvektor (7) nach der Messung nicht auf einen eindeutigen Wert der Systemobservablen führt, falls nicht $\left|\psi^{\mathrm{S}}\right\rangle$ zufällig einer der Basisvektoren $\left|s_k\right\rangle$ ist.

Nach der Kopenhagener Deutung kollabiert ein Zustandsvektor sofort, nachdem er die Form (7) annimmt. Die Wellenfunktion besteht dann nicht mehr aus einer Vielzahl von Paketen, sondern reduziert sich auf ein einziges Paket und der Vektor $\left|\psi_1^{\mathrm{S+A}}\right\rangle$ reduziert sich auf das zugehörige Element $\left|s_k\right\rangle\left|\psi^{\mathrm{A}}[s_k]\right\rangle$. Man kann dabei nicht sagen, auf welches Element der Überlagerung er sich reduziert. Statt dessen schreibt man den verschiedenen Möglichkeiten eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zu, deren Gewichte gegeben sind durch

$$w(s_k\left|\psi^{\mathrm{S}}\right.) = \left|\left\langle s_k \middle| \psi^{\mathrm{S}}\right\rangle\right|^2. \tag{8}$$

Everett dagegen behauptet, so etwas wie ein Zusammenbruch der Wellenfunktion findet nicht statt. Schließlich lässt der Ausdruck (7) keine Festlegung auf einen bestimmten Zustand erkennen. Wir müssen alle Zustände erst einmal als gleichberechtigt betrachten.
Wenn wir aber annehmen, dass die Wellenfunktion nicht zusammenbricht, müssen wir erklären, warum wir physikalische Objekte so wahrnehmen, als hätten sie eindeutige Positionen. Und wie könne wir die Unbestimmtheit des Messausgangs, beschrieben durch (8), dann erklären? Oder anders gesagt: Wie lässt sich die mathematische Forderung (7) mit unseren alltäglichen Erfahrungen (8) in Übereinstimmung bringen?

Um eine Antwort auf diese Fragen zu geben, möchte ich zunächst das eben besprochene Modell verallgemeinern. Den bisherigen Apparat A werde ich im folgenden als Beobachter B bezeichnen, da sein Zustand sich relativ zu dem System dauerhaft verändern muss, während der Systemzustand gleich bleibt.

Wir schreiben den Zustand unseres Beobachters B, dessen „Gedächtnis“ Einträge von Ereignissen $s_k, t_l, \ldots, u_m$ enthält, ganz allgemein in der Form

$$\left|\psi^{\mathrm{B}}[\cdots, s_k, t_l, \cdots, u_m]\right\rangle$$

Die Symbole in den eckigen Klammern, die chronologisch angeordnet sind, stehen demnach für Erinnerungen, die in Beziehung zu den vergangenen Erfahrungen des Beobachters stehen.

Wie wir bereits gesehen haben, versteht man unter der *Beobachtung einer Observablen A* (mit den Eigenzuständen $\left|s_k\right\rangle$) eines Systems S durch den Beobachter B, dessen anfänglicher Zustand $\left|\psi^{\mathrm{B}}[\cdots]\right\rangle$ ist, eine Wechselwirkung, die in einer bestimmten Zeit den Zustand

$$\left|\psi^{\mathrm{S+B}}\right\rangle = \left|s_k\right\rangle\left|\psi^{\mathrm{B}}[\cdots]\right\rangle, \qquad \text{(\textit{vor} der Beobachtung)}$$

in einen neuen Zustand der Form

$$\left|\psi^{\mathrm{S+B'}}\right\rangle = \left|s_k\right\rangle\left|\psi^{\mathrm{B}}[\cdots, s_k]\right\rangle, \qquad \text{(\textit{nach} der Beobachtung)}$$

überführt. Also, der Systemzustand, sofern er ein Eigenzustand ist, bleibt unverändert und der Zustand des Beobachters verändert sich dermaßen, dass er für einen Beobachter steht, der sich „im Klaren“ darüber ist, um welchen Eigenzustand es sich handelt.

Wenn der anfängliche Systemzustand dagegen kein Eigenzustand ist, sondern ein allgemeiner Zustand $\left|\psi^{\mathrm{S}}\right\rangle = \sum_k \psi^{\mathrm{S}}(s_k)\left|s_k\right\rangle$, dann wird der Zustand nach der Messung die bereits bekannte Form (7) haben:

$$\left|\psi^{\mathrm{S+B'}}\right\rangle = \sum_k \psi^{\mathrm{S}}(s_k)\left|s_k\right\rangle \cdot \left|\psi^{\mathrm{B}}[\cdots, s_k]\right\rangle$$

Wenn die Welt nun nicht nur aus diesen beiden Untersystemen besteht, sondern aus *n* Systemen mit den Zuständen $\left|\psi^{\mathrm{S_1}}\right\rangle$, $\left|\psi^{\mathrm{S_2}}\right\rangle$, ..., $\left|\psi^{\mathrm{S_n}}\right\rangle$ und dem Beobachter in dem anfänglichen Zustand $\left|\psi^{\mathrm{B}}[\cdots]\right\rangle$ und die einzige Wechselwirkung während der Messzeit zwischen $\left|\psi^{\mathrm{S_1}}\right\rangle$ und $\left|\psi^{\mathrm{B}}[\cdots]\right\rangle$ stattfindet, dann geht der Gesamtzustand vor der Beobachtung:

$$\left|\psi^{\mathrm{S_1+S_2+\cdots+S_n+B}}\right\rangle = \left|\psi^{\mathrm{S_1}}\right\rangle\left|\psi^{\mathrm{S_2}}\right\rangle\cdots\left|\psi^{\mathrm{S_n}}\right\rangle\left|\psi^{\mathrm{B}}[\cdots]\right\rangle \qquad \text{(\textit{vor} der Beobachtung)}$$

über in den Endzustand

$$\left|\psi^{\mathrm{S_1+S_2+\cdots+S_n+B'}}\right\rangle = \sum_k \psi^{\mathrm{S_1}}(s_k)\left|s_k\right\rangle\left|\psi^{\mathrm{S_2}}\right\rangle\cdots\left|\psi^{\mathrm{S_n}}\right\rangle\left|\psi^{\mathrm{B}}[\cdots, s_k]\right\rangle \quad \text{(\textit{nach} der Beobachtung),}$$

Es lässt sich also folgende Regel aufstellen:

Regel 1: Die Beobachtung einer Observablen *A* mit den möglichen Eigenwerten $\{s_k\}$ und Eigenfunktionen $\{|s_k\rangle\}$ in einem System S_1, durch den Beobachter B, verändert den Gesamtzustand der Welt folgendermaßen:

$$|\psi^{S_1}\rangle|\psi^{S_2}\rangle\cdots|\psi^{S_n}\rangle|\psi^{B}[\cdots]\rangle \quad \rightarrow \quad \sum_k \psi^{S_1}(s_k)|s_k\rangle|\psi^{S_2}\rangle\cdots|\psi^{S_n}\rangle|\psi^{B}[\cdots, s_k]\rangle,$$

wobei: $\psi^{S_1}(s_k) = \langle s_k|\psi^{S_1}\rangle$.

Wenn wir nun eine zweite Beobachtung durchführen, wobei unser Gesamtzustand jetzt eine Superposition ist, können wir Regel 1 einzeln auf jedes Element der Superposition anwenden, da jedes einzelne Element der Wellengleichung genügt und sich unabhängig von den restlichen Elementen verhält. Anschließend superponieren wir die Ergebnisse, um den Gesamtzustand nach dieser zweiten Messung zu erhalten. Das lässt sich folgendermaßen formulieren:

Regel 2: Regel 1 kann separat auf jedes Element einer Superposition von Gesamtzuständen angewendet werden. Die Ergebnisse werden superponiert, wodurch man den gesamten Zustand nach der Messung erhält. In dem Sinne verändert die Beobachtung einer weiteren Observablen *B* mit den möglichen Eigenwerten $\{t_l\}$ und Eigenfunktionen $\{|t_l\rangle\}$ in einem System S_2, durch den Beobachter B, den anfänglichen Zustand

$$\sum_k \psi^{S_1}(s_k)|s_k\rangle|\psi^{S_2}\rangle\cdots|\psi^{S_n}\rangle|\psi^{B}[\cdots, s_k]\rangle$$

in den Endzustand nach der Messung

$$\sum_{k,l} \psi^{S_1}(s_k)\psi^{S_2}(t_l)|s_k\rangle|t_l\rangle|\psi^{S_3}\rangle\cdots|\psi^{S_n}\rangle|\psi^{B}[\cdots, s_k, t_l]\rangle,$$

wobei: $\psi^{S_2}(t_l) = \langle t_l|\psi^{S_2}\rangle$.

Diese beiden Regeln, die direkt aus dem Superpositionsprinzip folgen, geben eine Anleitung, Gesamtzustände nach Messungen zu finden, für eine beliebige Zahl von Beobachtungsprozessen in beliebiger Kombination.

Jetzt sind wir prinzipiell in der Lage, dem Everettschen Zustand eine (a posteriori) Interpretation zu geben. Um eine solche **Interpretation für diese Gesamtzustände** nach den Messungen zu finden, führt Everett folgendes **Beispiel** an: Man stelle sich eine Welt vor, in der ein Beobachtersystem B (mit dem Anfangszustand $|\psi^{B}[\cdots]\rangle$) *in* einer Anzahl von getrennten, identischen Systemen, welche anfänglich die selben Zustände $|\psi^{S_1}\rangle = |\psi^{S_2}\rangle = \cdots = |\psi^{S_n}\rangle = \sum_k s_k|s_k\rangle$ haben, dieselbe Observable *A* misst. Wie immer

werden die möglichen Eigenwerte von *A* mit $\{s_k\}$ und die Eigenfunktionen mit $\{|s_k\rangle\}$ bezeichnet. Der Anfangszustand des Gesamtsystems ist demnach

$$\psi_0^{S_1+S_2+\cdots+S_n+B} = |\psi^{S_1}\rangle|\psi^{S_2}\rangle\cdots|\psi^{S_n}\rangle|\psi^{B}[\cdots]\rangle.$$

Wir nehmen an, dass die Messungen der Systeme der Reihenfolge nach vorgenommen werden; zu erst wird S_1, dann S_2 usw. gemessen. Nach Regel 1 wird der Zustand dann nach der ersten Messung folgendermaßen aussehen:

$$\psi_1^{S_1+S_2+\cdots+S_n+B} = \sum_k \psi^{S_1}(s_k)|s_k\rangle|\psi^{S_2}\rangle\cdots|\psi^{S_n}\rangle|\psi^{B}[\cdots, s_k^1]\rangle.$$

Nach der zweiten Messung von S_2, hat der Zustand sich gemäß Regel 2 so verändert:

$$\psi_2^{S_1+S_2+\cdots+S_n+B} = \sum_{k,l} \psi^{S_1}(s_k)\psi^{S_2}(s_l)|s_k\rangle|s_l\rangle|\psi^{S_3}\rangle\cdots|\psi^{S_n}\rangle|\psi^{B}[\cdots, s_k^1, s_l^2]\rangle.$$

Nach *r* Messungen, wobei $r \le n$, wird der Zustand, gemäß Regel 2, die Gestalt

$$\psi_r^{S_1+S_2+\cdots+S_n+B} = \sum_{k,l,\cdots t} \psi^{S_1}(s_k)\psi^{S_2}(s_l)\cdots\psi^{S_r}(s_t)|s_k^{S_1}\rangle|s_l^{S_2}\rangle\cdots|s_t^{S_r}\rangle|\psi^{S_{r+1}}\rangle\cdots|\psi^{S_n}\rangle|\psi^{B}[\cdots, s_k^1, s_l^2, \cdots, s_t^r]\rangle$$

haben. Einen solchen Zustand sieht Everett als eine Superposition von Zuständen

$$\psi'_{k,l,\ldots,t} = |s_k^{S_1}\rangle|s_l^{S_2}\rangle\cdots|s_t^{S_r}\rangle\cdot|\psi^{S_{r+1}}\rangle\cdots|\psi^{S_n}\rangle|\psi^{B}[\cdots, s_k^1, s_l^2, \cdots, s_t^r]\rangle,$$

wobei jeder von denen den Beobachters B mit einer bestimmten Erinnerung beschreibt (d.h. mit einer individuellen Konfiguration von Gedächtniseinträgen $[\cdots, s_k^1, s_l^2, \cdots, s_t^r]$). Des weiteren werden die bereits beobachteten Systeme relativ zu ihm durch die Eigenzustände $|s_k^{S_1}\rangle, |s_l^{S_2}\rangle, \cdots, |s_t^{S_r}\rangle$ beschrieben, während die restlichen Systeme $S_{r+1}, \cdots, S_n$ unverändert bleiben.

Führt man nach der *r*-ten Messung eine wiederholte Messung an einem bereits beobachteten System durch, z.B. dem System S_2, dann wird jedes Element der resultierenden Superposition nach dieser Messung den Beobachter mit folgender Konfiguration an Gedächtniseinträgen beschreiben: $[\cdots, s_k^1, \underline{s_l^2}, \cdots, s_t^r, \underline{s_l^2}]$.

Dieser letzte Gedächtniseintrag stimmt also mit dem entsprechenden früheren überein.

Dem Beobachter, beschrieben durch irgendein Element der Superposition, muss sich folgendes Bild ergeben: Jede vorangegangene Beobachtung eines Systems hat einen Sprung dieses Systems in einen Eigenzustand bewirkt – und zwar scheinbar völlig willkürlich. Und in diesem Eigenzustand scheint das System dann zu bleiben, da jede wiederholte Messung den bereits erhaltenen Messwert aufs neue ergibt.

Das wiederum bedeutet aber, dass für jeden Beobachter, der durch einen der Zustände der Superposition beschrieben wird, Prozess 1 (erste Folie auflegen) gültig zu sein scheint (das gilt aber nur für dieses spezielle Beispiel, wie wir gleich noch sehen werden).

Everett schließt also:

Nach einer beliebigen Anzahl von Beobachtungen gibt es nicht nur einen Zustand, in dem sich der Beobachter befindet. Das isolierte System (die Welt) wird nach den Beobachtungen durch eine Superposition von Zuständen charakterisiert. Jedes Element dieser Superposition enthält einen bestimmten Beobachterzustand, sowie den zugehörigen Systemzustand.
Das bedeutet aber, dass jede Beobachtung (oder Wechselwirkung) eine „Verzweigung" des **Beobachterzustandes** in viele verschiedene Zustände zur Folge hat. Jede weitere Messung führt zu einer weiteren Verzweigung der Beobachterzustände.

Nun sind alle Elemente in der Superposition gleichberechtigt. Kein Zustand ist realer als die anderen. Und es ist unnötig anzunehmen, dass alle bis auf einen zerstört werden, da jeder dieser Zustände der Schrödinger-Gleichung genügt, unabhängig davon, ob es die anderen Zustände gibt oder nicht.
Aber wie hat man sich das vorzustellen? Na ja, darauf gibt Everett eigentlich keine richtige Antwort: Er meint, all diese Elemente der Superposition existieren – *irgendwie* – gleichzeitig. Auf dieses *irgendwie* geht Everett nicht weiter ein. Er meint aber, die Tatsache, dass wir eine solche Verzweigung der Beobachterzustände noch nie haben beobachten können, spreche nicht gegen die Gültigkeit seiner Theorie:

"Arguments that the world picture presented by this theory is contradicted by experience, because we are unaware of any branching process, are like the criticism of the Copernican theory that the mobility of the earth as a real physical fact is incompatible with the common sense interpretation of nature because we feel no such motion."[4]

Und das ist auch alles, was Everett dazu sagt: Sie existieren einfach *irgendwie*.

An diesem Punkt setzen die Interpretationen der Theorie von Everett an.
Doch zunächst gab es zumindest eine Ergänzung in Form zwei weiterer Axioms von N. Graham, da die Theorie von Everett offensichtliche Schwächen aufweist.

Diese lassen sich an folgendem einfachen Beispiel demonstrieren: Stellen sie sich vor, dass der Spin eines vorher polarisierten Spin-$\frac{1}{2}$-Teilchens durch eine makroskopische Stern-Gerlach Apparatur gemessen wurde; und zwar dermaßen, dass die Wahrscheinlichkeit, die Spinorientierung $+\frac{1}{2}$ zu messen $|a|^2 = \frac{2}{3}$ beträgt. Man hat also folgenden Endzustand einer einfachen Welt, bestehend aus zwei Untersystemen:

$$\psi = a\left|\phi_1^S\right\rangle\left|\phi_1^B\right\rangle + b\left|\phi_2^S\right\rangle\left|\phi_2^B\right\rangle,$$

wobei $\left|\phi_1^S\right\rangle$ der Spin-$+\frac{1}{2}$- Zustand des Teilchens ist und $\left|\phi_1^B\right\rangle$ der Zustand der Apparatur, die Spin $+\frac{1}{2}$ gemessen hat. $\left|\phi_2^S\right\rangle\left|\phi_2^B\right\rangle$ kennzeichnen dann dementsprechend den Spin $-\frac{1}{2}$-Fall. $|a|^2 = \frac{2}{3}$ und $|b|^2 = \frac{1}{3}$.

[4] Hugh Everett III: "Relative State Formulation of Quantum Mechanics".

Wenn wir nun versuchen, dieses Ergebnis zu interpretieren, stoßen wir auf folgende Probleme:

1) Everett hat kein Axiom angegeben, welches eine bevorzugte Basis festlegt. Natürlich kann man eine beliebige Basis wählen, mit der man arbeiten will. Aber wenn jemand versucht eine physikalische Interpretation in nur einer bestimmten Basis zu geben und dabei Größen wie die Betragsquadrate der Koeffizienten benutzt, die ja von der speziellen Basis abhängen (er schreibt, dass für einen Beobachter in dem obigen Beispiel Prozess 1 gültig zu sein scheint), dann muss dieser Prozess (und im Besonderen die bevorzugte Basis) durch ein Axiom definiert werden. Und das tut Everett nicht.

2) Angenommen, man hat die Basis $\left(\left|\phi_1^{\mathrm{S}}\right\rangle\left|\phi_1^{\mathrm{B}}\right\rangle, \left|\phi_2^{\mathrm{S}}\right\rangle\left|\phi_2^{\mathrm{B}}\right\rangle\right)$ gewählt. Dann kann man eventuell „intuitiv" die beiden Elemente von ψ so sehen, als beschrieben sie ein Paar von unabhängigen Welten. Aber diese intuitive Interpretation liegt jenseits dessen, was die Axiome rechtfertigen. Die Axiome sagen nichts über zahlreiche physikalische Welten, die durch die Elemente eines Zustandvektors beschrieben werden.

3) Den Konstanten $|a|^2$ und $|b|^2$ wurde keine physikalische Bedeutung gegeben. Sie können nicht als die Wahrscheinlichkeiten interpretiert werden, mit denen ihre jeweiligen Zustände realisiert werden; das ist der zentrale Punkt von Everett's Annahme. Es kann nicht gesagt werden, dass ein Anteil von $|a|^2 = \frac{2}{3}$ an der Gesamtzahl aller Welten in dem Zustand $\left|\phi_1^{\mathrm{S}}\right\rangle\left|\phi_1^{\mathrm{B}}\right\rangle$ ist; da ist einfach nichts in seinem Axiom, das diese Aussage rechtfertigen würde. Wenn die Zustände tatsächlich zwei Welten kennzeichnen, dann muss erklärt werden, warum jede Messung nicht die Wahrscheinlichkeit $\frac{1}{2}$ hat (hier gilt die Aussage Everetts, jedem einzelnen Beobachter erschiene Prozess 1 gültig zu sein, nicht. Die Wahrscheinlichkeit einer der beiden Beobachter, sich selbst in der Welt mit dem Zustand $\left|\phi_1^{\mathrm{S}}\right\rangle\left|\phi_1^{\mathrm{B}}\right\rangle$ wiederzufinden, ist nicht $\frac{2}{3}$).

Aus diesem Grund hat Neill Graham zwei weitere Axiome eingeführt, welche diese Probleme lösen sollen.

Axiom 1: Für die universelle Wellenfunktion wird eine bevorzugte Basis gewählt, in der jedes Basiselement einen Zustand definiert, den *alle* makroskopischen Messapparaturen für definierte Messergebnisse einnehmen.

Axiom 2: Der Zustand $a\left|\phi_1^{\mathrm{S}}\right\rangle\left|\phi_1^{\mathrm{B}}\right\rangle + b\left|\phi_2^{\mathrm{S}}\right\rangle\left|\phi_2^{\mathrm{B}}\right\rangle$ beschreibt zwei Welten, die für $a, b \neq 0$ gleich wahrscheinlich sind.

Dieses letzte Axiom 2, welches letzten Endes die Grundlage für alle weiteren Vielewelteninterpretationen ist, löst das Problem bei Everett aber auch nicht. Insgeheim war Everett ja auch von der Aussage dieses Axioms ausgegangen, hatte aber kein eigenes angegeben. Wenn beide Welten gleich wahrscheinlich sind, dann müsste, wie bereits gesagt, ein involvierter Beobachter beide möglichen Resultate ebenfalls für gleich wahrscheinlich halten. Wie kommt es dann aber, dass wir dennoch bei einem solchen Versuch, wie dem eben

beschriebenen, ein Resultat häufiger erhalten als das andere? Graham sah das natürlich auch und hat versucht dafür eine Erklärung zu finden. Jedoch ohne richtigen Erfolg.
Nichts desto Trotz wurden auf dieser widersprüchlichen Grundlage verschiedene Interpretationen vorgeschlagen. Zwei der bekanntesten werde ich kurz vorstellen. Im Anschluss daran werde ich dann eine Interpretation erläutern, die in zumindest einer Hinsicht vielversprechender zu sein scheint, als die anderen.

Einige Leute vertreten eine sehr subjektive Sichtweise. Sie findet sich in den Überlegungen von E. J. Squires als *"Many Views Interpretation "* und in denen von D. Albert und B. Loewer als *"Many Minds Interpretation"* . In diesen Überlegungen nimmt der bewusste Geist die Rolle des Everettschen Beobachters ein und eine Aufspaltung der Welt kann demnach nur in der Gegenwart eines solchen bewussten Beobachters stattfinden. (Das bedeutet nicht, dass unbedingt ein Mensch vonnöten ist.). Diese subjektive Sichtweise wurde fälschlicherweise Everett zugesprochen, da er in seiner Arbeit direkt von einem "observer" (Beobachter) spricht. Für Everett handelt es sich jedoch bei dem „Beobachter" nicht ausschließlich um einen bewussten Geist:

"As models for observers we can, if we wish, consider automatically functioning machines, possessing sensory apparatus and coupled to recording devices capable of registering past sensory data and machine configurations."

Eine weitere Interpretation der Everettschen Theorie, die in diesem Sinne objektiver ist, ist die sog. **Vieleweltentheorie von DeWitt.** Die meisten von ihnen werden das Kapitel dazu in dem Büchlein von Alistair Rae[5] gelesen haben. DeWitt hat sie in drei Artikeln 1967, 1970 und 1971 berühmt gemacht.
Auch ihm zufolge kann die Welt eingeteilt werden in Systeme und Apparate.
Das gesamte Universum spaltet sich dann bei jedem Quantenübergang in „Myriaden von Kopien"[6] auf. Im Gegensatz zur Many Minds Interpretation muss der „Everettsche" Beobachter, d.h. der Apparat, jedoch kein bewusster Geist sein. Es genügt eine noch so kleine irreversible Veränderung, damit Universen entstehen. Steht ein quantenmechanisches System vor einer Entscheidung mit, sagen wir *n* möglichen Ausgängen, wobei jeder Ausgang eine irreversible Veränderung an der Umgebung bewirkt, dann gibt es, nachdem eine der Möglichkeiten eingetreten ist, zeitgleich *n* verschieden Universen: Ein Universum für jeden möglichen Ausgang. Immer wenn eine Veränderung an einem System eingetreten ist, zu der es in Hinblick auf die Ursache eine Alternative gegeben hätte, dann gibt es diese Alternative auch – in einem Extra-Universum.
Nehmen wir als Beispiel das **de Broglie-Paradoxon**, das Petra Haeffner in ihrem sehr guten Vortrag über das von Neumann Theorem angeführt hat: Ein Elektron wird in eine Kiste gesperrt, die anschließend halbiert wird und deren beiden gleich großen Teile von einander getrennt werden. Der Kopenhagener Deutung zufolge liegt das Elektron vor dem Öffnen einer der beiden Kisten in einem unbestimmten Zustand vor, ist also „irgendwie" in beiden Kisten gleichzeitig. Die Wellenfunktion kollabiert genau in dem Augenblick, in dem man das Elektron tatsächlich in einer der Kisten registriert, bzw. nicht darin findet. Der Beobachter verleiht dem Elektron damit wieder eine Existenz.
Die Vieleweltentheorie erklärt uns, dass nach dem Öffnen einer der beiden Kisten plötzlich zwei Universen mehr vorliegen: In dem einen Universum ist das Elektron in der ersten Kiste und in dem anderen Universum ist es in der zweiten, jeweils mit dem entsprechenden Beobachterzustand.

---

[5] Alistair I. M. Rae: "Quantum physics: illusion or reality?", Cambridge University Press, 1986
[6] B. deWitt: "Quantum mechanics and reality", 1970.

In diesem Beispiel ist es zufällig der Beobachter der die Aufspaltung bewirkt, da in seinem Gehirn ein irreversibler Prozess einer neuronalen Verknüpfung erfolgt.
(Die Kopenhagener Deutung spricht dem menschlichen Beobachter die Fähigkeit zu, einem qm Teilchen eine Existenz zu verleihen; die Vieleweltentheorie DeWitts macht ihn gar zu einem Erschaffer von Universen – ein Paradebeispiel für anthropozentrisches Denken.)

Allgemein gilt in der DeWittschen Interpretation: Man wählt sich willkürlich ein Beobachtersystem, wartet, bis dieses sich verändert, schaut, worauf diese Veränderung zurückzuführen ist, zählt die Alternativen, die es zu genau dieser Veränderung gegeben hätte und weiß damit die Anzahl der Universen, die zum Zeitpunkt der Veränderung des Beobachtersystem entstanden sind.
Die Willkür in der Wahl des Beobachtersystems macht es natürlich schwierig die Gesamtzahl der bereits existierenden Universen abzuschätzen.

Nun vermag keine der beiden Interpretationen, weder die subjektive "Many Mind Interpretation", noch die objektivere DeWittsche Vieleweltentheorie, das Wahrscheinlichkeitsproblem zu lösen. Des weiteren erklären sie nicht, woraus diese Universen bestehen könnten. Wie können unzählig viele parallele Universen existieren, die nicht miteinander wechselwirken? Kann man sich überhaupt etwas darunter vorstellen?

David Deutsch, ein führender Physiker auf dem Gebiet der Quantencomputer, hat eine andere Theorie entworfen, die diese Defizite vielleicht ausgleichen kann.[7]
Sie war ursprünglich nicht als Interpretation für die Vieleweltentheorie gedacht. Da Deutsch jedoch meint, dass seine Theorie und die von Everett sich gegenseitig ergänzen, möchte ich darauf eingehen.
Es fing damit an, dass Deutsch eine Erklärung suchte für folgendes bekanntes, seltsames Phänomen (Doppelspaltexperiment): Wenn ich einen Lichtstrahl einer einheitlichen Wellenlänge, also zum Beispiel einen Laserstrahl, nehme und damit zwei winzige Spalte beleuchte, die etwa einen fünftel Millimeter voneinander in eine Schablone geritzt sind, dann erzeuge ich damit auf einem dahinter liegenden Schirm das bekannte Schattenmuster, bestehend aus sich abwechselnden hellen und dunklen Streifen. Man kann dieses Muster leicht mit Hilfe von Interferenz erklären und die Orte der Maxima und Minima berechnen.
„Verdünnt" man jedoch den Lichtstrahl so stark, dass nur noch einzelne Photonen pro Zeiteinheit durch einen der beiden Schlitze gehen, dann entsteht dennoch – nach einer entsprechend längeren Zeit – das selbe Interferenzmuster auf dem Schirm. Wie kann das sein?
Die De Broglie-Bohm-Theorie postuliert sog. Führungswellen, die den Teilchen vorauseilen und durch Interferenz die Bahn des Teilchens festlegen.
Deutsch dagegen meint, die Photonen direkt würden mit irgend etwas interferieren.
Zu diesem Zweck postuliert er sog. schattenhafte Photonen, die für uns unsichtbar sind und nur über solche Interferenzeffekte in Erscheinung treten. Es muss derer unendlich viele geben. Ich werde auf die Einzelheiten hier nicht weiter eingehen, sondern es geht mir lediglich darum, das Prinzip zu verdeutlichen.
Interferenz tritt aber nicht nur bei Photonen auf, sondern, wie die Quantentheorie vorhersagt und das Experiment bestätigt, bei allen Teilchenarten. Das bedeutet aber, dass jede Teilchenart ihre schattenhaften Entsprechungen haben muss. Nun haben die für uns fassbaren Teilchen eine Eigenschaft, die uns das Recht gibt, sie insgesamt als Universum zu bezeichnen. Analog können wir annehmen, dass auch diese Schattenteilchen ihrerseits ein Universum bilden. Deutsch schreibt in seinem Buch "Fabric of Reality" noch weiter, dass diese schattenhaften Teilchen unter sich genauso eingeteilt sind, wie die fassbaren Teilchen unter sich. Er schließt:

[7] David Deutsch: "Fabric of Reality", 1997, Penguin Books Ltd.

„[Die schattenhaften Teilchen] *bilden also nicht ein einziges, homogenes paralleles Universum, das ungeheuer viel größer ist als das faßbare, sondern eher eine riesige Anzahl von parallelen Universen, von denen jedes ähnlich gebaut ist wie das faßbare, und die alle denselben Naturgesetzen gehorchen, die sich aber darin unterscheiden, dass die Teilchen in jedem Universum in anderen Positionen sind.“* [8]

Alle Universen zusammengenommen bilden eine neue physikalische Wirklichkeit, die Deutsch „Multiversum“ nennt. Er schreibt weiter:

„Der Physiker Hugh Everett [erkannte] *1957 als erster, dass die Quantentheorie ein Multiversum beschreibt.“*[9]

Damit hätten wir also auch gleich eine Interpretation für die Theorie von Everett: Zu Beginn sind alle Universen in dem gleichen Zustand, doch wenn Messungen erfolgen, Entscheidungen getroffen werden müssen, verändern sich die Zustände der Universen. Hier gibt es aber wieder ein Problem. Wie viele Universen beteiligen sich daran? Wenn es *alle* sind, lässt sich das Wahrscheinlichkeitsproblem dann lösen? In dem Beispiel mit dem Spin würde nach jedem Versuch in $\frac{2}{3}$ aller Universen die Spinorientierung $+\frac{1}{2}$ und in dem anderen $\frac{1}{3}$ die Spinorientierung $-\frac{1}{2}$ gemessen werden. Das setzt aber voraus, dass alle Universen vorher gleich waren. Da sie sich aber schon seit Anbeginn ihrer Existenz durch die zahlreichen Wechselwirkungen auseinander entwickelt haben müssen, werden sie sich voneinander mitunter stark unterscheiden. Und warum sollten sich alle Universen in dem Augenblick verändern, in dem ich in einem von ihnen eine Messung mache?

Die Theorie von Deutsch kann also auch nicht das Wahrscheinlichkeitsproblem lösen, welches Everett aufstellt.
Es gibt, wie bereits gesagt, noch eine Menge anderer Interpretationen zu der mathematischen Theorie Everetts, auf die ich jedoch nicht mehr zu sprechen kommen werde, da sie auch keine Lösung anbieten. Die Forderung, dass alle Elemente des Zustandes nach einer Messung *irgendwie* realisiert werden, scheint also nicht in Übereinstimmung gebracht werden zu können, mit den Erfahrungen, die wir machen.

Hinzukommt, dass viele Interpretationen Schlüsse ziehen, die nicht aus der mathematischen Theorie von Everett folgen. Max Tegmark, ein amerikanischer Physiker, weist auf einen solchen Aspekt der Vielewelteninterpretationen hin. Er schreibt dazu in seinem Artikel “The Interpretation of Quantum Mechanics: Many Worlds or Many Words?”:

*“What Everett does **NOT** postulate: At certain magic instances, the world undergoes some sort of metaphysical ‘split’ into two branches that subsequently never interact.”*

Vertreter der MWI argumentieren, dass ein System, das thermodynamisch beschrieben werden kann und irreversibles Verhalten zeigt, viel zu komplex sei, um mit einer leicht abgewandelten Kopie von sich selber interferieren zu können.
Ein weiterer Unterschied der meisten Interpretationen zu Everett liegt in der Annahme ständig entstehender Universen. Everett redet lediglich von gleichzeitig existierenden Zuständen. In diesem Punkt stimmt die Multiversum-Theorie von Deutsch am besten mit Everett überein.

[8] eben da, S.49
[9] eben da, S. 55

Auch die Interpretation von DeWitt, durch welche die Theorie Everetts erst bekannt wurde, orientiert sich nicht sehr stark an ihrer mathematischen Grundlage. Einige Autoren behaupten sogar, die Überlegungen DeWitts würden sich dermaßen von denen Everetts unterscheiden, dass man ihnen eine eigene Entwicklung zusprechen müsse.[10] So weit würde ich mit meiner Aussage zwar nicht gehen, aber auf jeden Fall passt die Interpretation DeWitts nicht so richtig auf die mathematische Theorie Everetts. Da die Sekundärliteratur sich hier ziemlich uneinig ist, habe ich vor zwei Wochen DeWitt eine e-mail geschickt, mit der Bitte, mir seine Ansichten zu diesem Punkt zu schreiben. Hier habe einen Ausschnitt aus seinem Antwortschreiben:

"I did not meet Everett personally until 1973. We had a long talk. Anyone who claims that our views differ is simply wrong."

Leider behaupten das alle anderen, die sich um eine Interpretation bemüht haben in ihren Texten ebenfalls.

Trotz dieser ganzen Probleme erfreut sich die Vieleweltentheorie einer beachtlichen Beliebtheit.
Diese Umfrage habe ich aus dem bereits genannten Artikel ich von Max Tegmark:

Interpretation	Votes
Copenhagen	13
Many Worlds	8
Bohm	4
Consistent Histories	4
Modified dynamics (GRW/DRM)	1
None of the above/undecided	18

Sie stammt von dem "quantum mechanics workshop", der im August 1997 an der UMBC (University of Maryland, Baltimore County) stattgefunden hat.

Diese relativ große Attraktivität der MWI liegt u.a. darin begründet, dass die MWI schließlich zwei der Hauptprobleme der Kopenhagener Deutung umgeht:

1.) Zustandsreduktion: Dadurch, dass alle Elemente der Superposition realisiert werden, gibt es keinen Zusammenbruch der Wellenfunktion mehr.

2.) Heisenbergschnitt: Das gesamte Universum wird quantenmechanisch behandelt (was vor allem die Astrophysiker begrüßen).

Einige, die deswegen unzufrieden sind mit der Kopenhagener Deutung, werden vielleicht, in dem Bedürfnis überhaupt eine Erklärung zu haben, „intuitiv" zur MWI wechseln. Man kommt jedoch, wenn man so will, von dem Regen in die Traufe.

[10] siehe dazu Andrew Whitaker: "Einstein, Bohr and the Quantum Dilemma", 1996, S. 276.

Schlusswort:

Everett begann seine Arbeit in der festen Überzeugung, dass die Quantentheorie eine vollständige, abgeschlossene Theorie darstellt.
Doch sein wir mal ehrlich, zu welchem Zeitpunkt in der Kulturgeschichte der Menschheit – und wenn wir nur die relativ kurze Spanne seit dem Beginn der Aufklärung bis heute betrachten – dachten die Menschen nicht, ihre Ansichten seien vollständig. Wie oft waren die Menschen davon überzeugt, der Weisheit letzten Schluss gefunden zu haben.
Wir dürfen nicht vergessen, dass sich die Quantentheorie womöglich noch in ihrer Entwicklung befindet. In einer Entwicklung, die vielleicht noch lange nicht abgeschlossen ist. Ja, vielleicht ist sogar diese charakteristische Superposition eines Zustandes, auf die sich Everett's Theorie stützt, nichts weiter als ein Ausdruck dieser Unvollständigkeit.
Die Quantentheorie kann nur Wahrscheinlichkeitsaussagen treffen (außer natürlich, ein System befindet sich in einem reinen Zustand). Dieser Umstand kann tatsächlich der Ausdruck eines fundamentalen Prinzips in der Natur sein. Er kann aber auch ein Zeichen für die Unvollständigkeit der Theorie sein. Das ist das Thema der bekannten Diskussion um die versteckten Variablen.
Nach allem was zur Zeit bekannt ist, ist es unwahrscheinlich, dass die Vieleweltentheorie richtig ist. Aber auch die Kopenhagener Deutung lässt vieles unbeantwortet. Sicherheit gibt es zur Zeit noch nicht. Es bleibt daher nur eins, was wir tun können: Uns weitere Gedanken zu machen über die Gesetzmäßigkeiten der Realität und hoffen, eines Tages mehr zu wissen.

Literatur:

- D. Albert and B. Loewer, Interpreting the many-world interpretation, *Synthese* **86,** 87-98 (1988)
- D. Deutsch, *Fabric of Reality,* Penguin Books Ltd., 1997
- B. DeWitt and Neill Graham (eds.), *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics"* (Princeton University Press, Princeton 1973)
- H. Everett, *The Theory of the Universal Wave Function* (Ph.D. Thesis, Princeton University, 1957)
- H. Everett, 'Relative state' formulation of quantum mechanics, *Reviews of Modern Physics* **29,** 454-62 (1957)
- A. I. M. Rae, *Quantum physics: illusion or reality?*, Cambridge University Press, 1986
- E.J. Squires, Many views of one world, *European Journal of Physics* **8,** 171-3 (1987)
- A. Whitaker, *Einstein, Bohr and the Quantum Dilemma,* Cambridge University Press, 274-84, 1996