# Auf der Suche nach dem Quantenmodell

## Teil 2 – Die Quantentheorie und ihre Interpretationen

*Friedrich Wagner, www.frwagner.de, Oktober 2021*

Im ersten Teil dieses Aufsatzes habe ich versucht, einen Einblick in die merkwürdigen Eigenschaften der quantenmechanischen Welt zu geben, die sich jeglicher Integration in ein „vernünftiges" Gedankengebäude zu entziehen scheint. In diesem zweiten Teil möchte ich die Versuche vorstellen, die Phänomene mathematisch zu erfassen und eine allgemein anerkannte Deutung für sie zu finden, das heißt eine physikalische Erklärung. Dabei wird sich zeigen, dass der erste Teil dieser Aufgabe als abgeschlossen und der zweite als vollkommen offen angesehen werden kann. Statt nur einer gibt es eine ganze Reihe unterschiedlicher Interpretationen der Quantenmechanik, die nur einen Punkt gemeinsam haben: Sie lesen sich mindestens so fantastisch wie die quantenmechanischen Effekte, die sie erklären wollen.

Zunächst daher etwas über die Dinge, die man schon gut weiß.

## Die Theorie der Quantenmechanik

Die Quantenmechanik, die vor fast 100 Jahren von Max Planck, Albert Einstein, Werner Heisenberg und Erwin Schrödinger begründet wurde, ist eine höchst elegante Theorie. Um diese Eleganz in vollem Umfang zu erfassen, ist allerdings das Verständnis einiger mathematischer Elemente wie Vektorraum, Eigenwert oder Operator hilfreich. Diese Konzepte sind zwar überhaupt kein Hexenwerk, ihre Erläuterung würde aber den Rahmen dieses Textes sprengen. Die wesentlichen Eigenschaften dieser Theorie lassen sich aber auch ohne einen großen mathematischen Formalismus umreißen, was ich im Folgenden versuchen werde. Vorhang auf für die vielleicht erfolgreichste Theorie, die die Physik je hervorgebracht hat!

Die Quantenmechanik hat drei Bestandteile:

Q1: Der Zustand eines Systems ist vollständig durch die sogenannte „Wellenfunktion" $\Psi$ beschrieben, die sowohl orts- als auch zeitabhängig sein kann[1].

Beispiel Wasserstoffatom:
Als ein sehr grobes Bild für die Wellenfunktion eines Elektrons, das um ein Proton kreist, kann man sich $\Psi$ als eine (in diesem Fall zeitlich konstante) „Wolke" um den Atomkern vorstellen, die potentielle Positionen dieses Elektrons repräsentiert.

Für komplexere Systeme kann der Zustand aber auch potentielle Interaktionen mit anderen Teilchen enthalten, die Wellenfunktion lässt sich dann nicht mehr durch ein Feld oder Gebilde im dreidimensionalen Raum darstellen.

---

[1] Nur für mathematisch Interessierte: Diese Funktion hat Werte aus dem Bereich der komplexen Zahlen, die eine Erweiterung der reellen Zahlen um Lösungen für die Gleichung $x^2 + 1 = 0$ sind. Dazu wird eine neue Zahl i, die „imaginäre Einheit", mit der Eigenschaft $i^2 = -1$ eingeführt. Diese Zahlen sind nicht mehr oder weniger „wirklich" als reelle oder natürliche Zahlen, sie eignen sich einfach sehr gut zur kompakten Formulierung mathematischer Strukturen. In einem System mit N Teilchen „lebt" die Wellenfunktion im 3N-Raum, das heißt sie weist jedem Punkt im 3N-dimensionalen Raum (beziehungsweise 3N+1 inklusive der Zeit) einen festen Wert zu.

Q2: Die Zeitentwicklung der Wellenfunktion folgt einem zeitlich symmetrischen, linearen und deterministischen Gesetz, der *Schrödinger-Gleichung*

$$\frac{i\,h}{2\pi}\ \frac{\partial}{\partial_t}\Psi(\mathrm{t}) = \mathrm{H}\,\Psi(\mathrm{t})$$

Darin ist i die imaginäre Einheit, $h$ das Plancksche Wirkungsquantum als fundamentale Naturkonstante und H ist der sogenannte Hamilton-Operator, der die Energie des jeweiligen Systems beschreibt. Er ergibt sich ganz analog zur klassischen Physik als Summe von kinetischer und potentieller Energie.

Erläuterungen:
- Zeitlich symmetrisch heißt, dass keine Zeitrichtung ausgezeichnet ist
- Linear: Wenn die Zustände $\Psi_1$ und $\Psi_2$ die Schrödinger-Gleichung erfüllen, dann gilt das auch für den Summenzustand $\Psi_1 + \Psi_2$
- Deterministisch: Die gesamte zeitliche Entwicklung der Wellenfunktion ist eindeutig bestimmt, wenn der Zustand und die äußeren Einflüsse auf das System zu irgendeinem Zeitpunkt bekannt sind

Beispiel Wasserstoffatom:
Die Rechnung dafür soll hier nicht ausgebreitet werden, auch wenn sie nicht übermäßig kompliziert ist. Die Schrödinger-Gleichung wird hierfür zu einer konkreten Differentialgleichung, die nur bestimmte Lösungen für die Bewegung des Elektrons zulässt. Als Resultat ergeben sich die verschiedenen möglichen Elektronenbahnen um das Proton, die nicht kontinuierlich verteilt sind, sondern diskrete Abstände voneinander haben. Auf diesen von der Quantenmechanik vorausgesagten Bahnen basiert der gesamte Wissenschaftszweig der Chemie!

Q3: Klassische Zustände mit konkret messbaren (beobachtbaren) Größen bilden nur eine Untermenge der möglichen quantenmechanischen Zustände. Bei einer Messung „springt" das System in einen dieser klassischen Zustände, und zwar mit einer Wahrscheinlichkeit, die durch den Absolutbetrag der Wellenfunktion gegeben ist[2]. Das ist die „Bornsche Regel", benannt nach dem deutschen Physiker Max Born.

Beispiel Wasserstoffatom:
Die Wahrscheinlichkeit, das Elektron nach einer Messung am Ort **r** zu finden, ist $|\Psi(\mathbf{r})|^2$.

Eine wichtige Eigenheit der Quantenmechanik besteht somit darin, dass sie nur *statistische* Aussagen über den Ausgang einer Messung macht. Sie sagt zwar eine bestimmte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Ereignisses voraus, nicht aber das konkrete Ergebnis einer einzelnen Messung, das vollkommen dem Zufall überlassen ist, sofern die vorausgesagte Wahrscheinlichkeit nicht 0% oder 100% beträgt. Sie behauptet sogar, dass es sich dabei um einen „objektiven Zufall" handelt, der sich nicht auf eine subjektive Unwissenheit zurückführen lässt. Laut Q1 wird der Zustand nämlich *vollständig* durch die Wellenfunktion beschrieben. Die aus dem Wahrscheinlichkeitswert resultierende *Verteilung* der Ergebnisse über sehr viele Messungen, das heißt gemittelt über viele Teilchen oder über zeitlich aufeinanderfolgende Messungen an einzelnen Teilchen, kann aber sehr wohl aus dem Formalismus abgeleitet werden. Das Ergebnis entspricht mit einer fantastischen Genauigkeit den experimentell ermittelten Zahlenwerten.

[2] Der Absolutbetrag einer komplexen Zahl ist immer reell, so dass man den Betrag der Wellenfunktion bei geeigneter Normierung direkt als Wahrscheinlichkeit zwischen 0 (unmöglich) und 1 (sicher) interpretieren kann.

Die folgende Abbildung zeigt den Übergang von der Wellenfunktion zu einem konkreten Messergebnis:

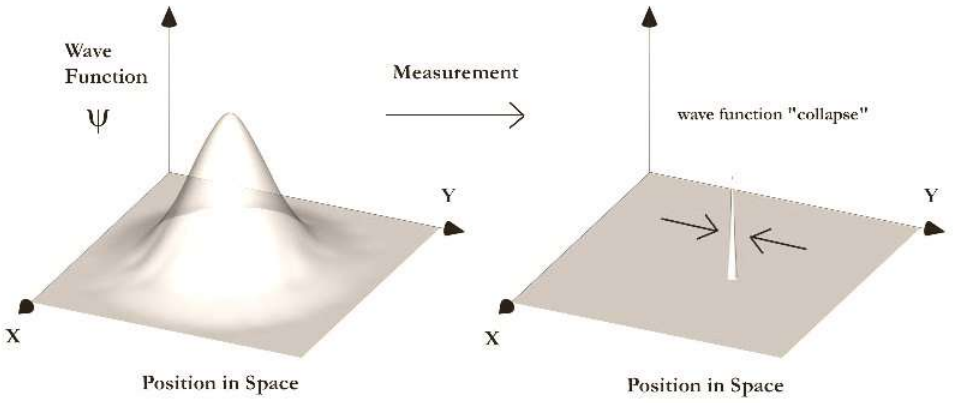


**Abb. 1:** Die Form der Wellenfunktion ergibt sich in eindeutiger Weise aus der Schrödinger-Gleichung. Eine Messung führt zufallsgesteuert zu einem eindeutigen Ergebnis, wobei die Auftrittswahrscheinlichkeit dem Amplitudenquadrat der Wellenfunktion am jeweiligen Ort und Zeitpunkt entspricht.

Empirisch gesehen lässt die Theorie der Quantenmechanik somit keine Wünsche offen. Bis heute hat sich trotz unzähliger Laborexperimente *keine* ihrer Vorhersagen als falsch erwiesen.

Die Suche nach einer mathematischen Theorie der Quantenmechanik hat somit ein erfolgreiches Ende gefunden. Dies ändert aber nichts an der Merkwürdigkeit und dem mangelnden Verständnis der Phänomene, die im ersten Teil dieses Aufsatzes vorgestellt wurden – eine allgemein anerkannte *Deutung* dieser Theorie steht nämlich noch immer aus. Anders formuliert wissen wir nicht, wie wir sie physikalisch interpretieren können, uns fehlt ein konkretes physikalisches *Modell* für diese Rechenvorschrift.

Die zentralen Probleme lassen sich an drei Punkten festmachen:

P1: Wie lässt sich die *Wellenfunktion* $\Psi$ physikalisch deuten, insbesondere die durch sie beschriebenen Superpositions-Zustände (Überlagerungen), und welche Interpretation haben die durch $|\Psi|^2$ bestimmten Wahrscheinlichkeiten?

P2: Wie lässt sich das Phänomen der nichtlokalen *Verschränkung* erklären, das heißt die augenblickliche Ausbildung von Korrelationen über beliebig lange Distanzen?

P3: Was definiert eine „*Messung*", das heißt unter welchen Umständen findet sie statt, und was passiert während einer Messung? Wie geschieht der Übergang von quantenmechanischen zu konkreten klassischen Zuständen?

Aus physikalischer Sicht ist vor allem das Messproblem unbefriedigend. Der quantenmechanische Formalismus macht keine Angaben, was während einer Messung passiert und wann man überhaupt von einer Messung sprechen kann. Sicher ist allerdings, dass sich der Messvorgang *nicht* durch die Schrödinger-Gleichung beschreiben lässt: Diese Gleichung ist deterministisch, linear und zeitlich symmetrisch. Der Messvorgang enthält dagegen ein intrinsisches Zufallselement und überführt einen Überlagerungszustand in nichtlinearer Weise in einen klassischen Messzustand, wodurch auch eine Zeitrichtung ausgezeichnet wird. Man spricht daher auch von einem „Zustandskollaps" oder vom „Kollaps der Wellenfunktion".

Genau in diese Kerbe schlägt Schrödingers Katzen-Paradoxon. Um dem Resultat der weder toten noch lebendigen Katze zu entgehen, muss die lineare Zeitentwicklung der Schrödinger-Gleichung an irgendeiner Stelle durchbrochen werden. Aber wo sollte sich diese Grenze befinden und wie muss man sich den Übergang vorstellen?

Diese Probleme waren schon bei der Formulierung der Quantenmechanik offensichtlich und zwangen ihre Gründungsväter zu einer Stellungnahme. Die Interpretation von Niels Bohr dominiert bis heute die Lehrbücher der Physik und wird daher auch als „orthodoxe Sichtweise" der Quantenmechanik bezeichnet. Ihr gebührt das erste Kapitel für den Versuch einer sinnvollen Deutung der Quantenmechanik. Es wird nicht das letzte sein…

# Die Kopenhagener Interpretation

Die Kopenhagener Interpretation plädiert auf einen *Verzicht* auf Erklärungen jenseits der messbaren Resultate. Laut Niels Bohr, nach dessen Wirkungsstätte diese Sichtweise benannt wurde[3], brauchen wir zur Untersuchung quantenmechanischer Systeme immer auch makroskopische Systeme wie zum Beispiel Messgeräte und müssen auch auf unsere „klassische" Sprache zurückgreifen, um Versuchsaufbau und Ergebnis zu beschreiben. Der Messprozess beinhaltet außerdem immer eine nicht kontrollierbare Kopplung zwischen untersuchtem System und Messgerät. Aus diesen Gründen macht es für Bohr gar keinen Sinn, eine rein quantenmechanische Welt interpretieren und verstehen zu wollen. Aussagen lassen sich nur über die tatsächlich gewonnenen Messergebnisse machen und diese werden von der Theorie der Quantenmechanik überaus erfolgreich beschrieben. Der Kollaps der Wellenfunktion wird damit zu einer rein mathematischen Operation, womit das Problem entfällt, einen physikalischen Mechanismus dafür angeben zu müssen.

Superpositionen und die Unschärferelation versucht Bohr durch den Begriff der „Komplementarität" zu erklären: Welle und Teilchen sind komplementäre Eigenschaften des Elektrons und je nach Versuchsaufbau zeigt sich entweder die eine *oder* die andere Eigenschaft. Analog kann man entweder einen genauen Messwert für die Position *oder* den Impuls eines Teilchens erhalten. Die Frage, welche Eigenschaften *vor* der Messung vorgelegen haben, ist für Bohr unsinnig und nicht beantwortbar, da die Physik nur Aussagen über konkrete Messresultate machen kann. In seinen Worten:

> *"There is no quantum world. There is only an abstract physical description.*
> *It is wrong to think that the task of physics is to find out how nature is.*
> *Physics concerns what we can say about nature."*

Erstaunlicherweise gibt sich auch heute noch ein relativ großer Teil der Physikergemeinde mit diesem sehr positivistischen Standpunkt zufrieden, der für die Suche nach physikalischen Erklärungen eine absolute Verständnisgrenze postuliert und den seit den alten Griechen vorhandenen Wunsch in Frage stellt, mit naturwissenschaftlichen Methoden etwas über das Wesen der Welt zu erfahren, in der wir leben. Diese Interpretation gibt auch keine Antwort auf die Frage nach dem genauen Zeitpunkt, an dem ein messbedingter Zustandswechsel stattfindet, und auch nicht nach den Umständen, die für ein solches Ereignis vorliegen

[3] Häufig werden auch die Deutungsversuche von Bohrs Schüler Werner Heisenberg zur Kopenhagener Interpretation gezählt, was aber problematisch ist, da sie sich teilweise deutlich von Bohrs Sichtweise unterscheiden. Heisenberg stellte sich die Elemente der quantenmechanischen Welt als „Potentialitäten" vor, denen er durchaus einen realen Status zuerkannte. Generell sind die philosophischen Ausführungen von Bohr so mehrdeutig, dass es bis heute keine einhellige Meinung über die „richtige" Fassung der Kopenhagener Interpretation gibt.

müssen. Ein grundsätzliches Problem ist zudem der postulierte Unterschied zwischen der nicht realen mikroskopischen Welt der Quantenmechanik und der realen makroskopischen Welt. Die Kopenhagener Interpretation bietet kein objektives Kriterium für diese Unterscheidung und erklärt auch nicht, wie die Gesetze der Quantenmechanik auf mikroskopische Systeme beschränkt sein können, wo doch makroskopische Systeme aus ihnen zusammengesetzt sind. Umso unverständlicher wird dies, wenn man die Quantenmechanik als universell gültige Theorie ansieht, was Bohr zweifellos tat. Seine oftmals schwer zu deutenden philosophischen Ausführungen[4] haben auch nicht zur Klärung dieser Fragen geführt.

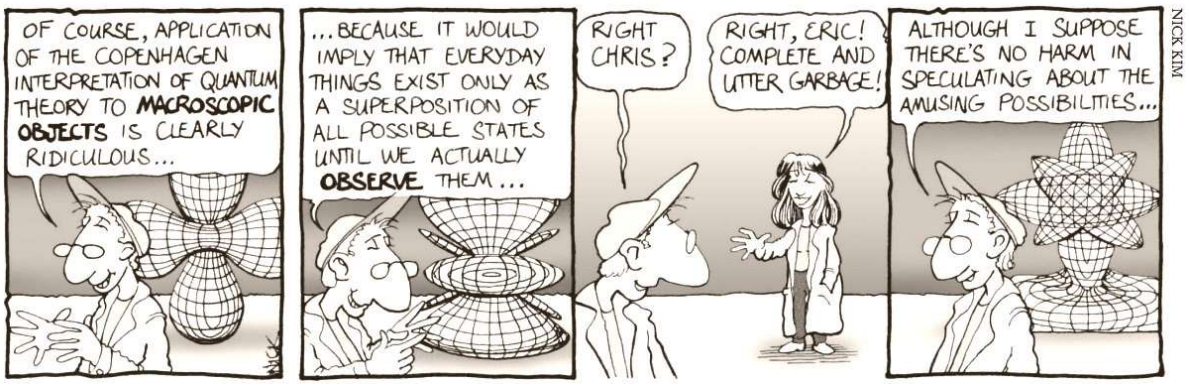


**Abb. 2:** Nach der Kopenhagener Interpretation sind nur makroskopische und tatsächlich beobachtete Systeme real, und nur diese sollten Inhalt der physikalischen Naturbeschreibung sein.

Lässt sich dieser „Offenbarungseid", an der absoluten Grenze des Verstehens angelangt zu sein, irgendwie abwenden? In den vergangenen Jahrzehnten sind eine Vielzahl unterschiedlicher Ideen entwickelt worden, die genau das versuchen. Es *gibt* Fortschritte in der quantenmechanischen Deutungsdebatte und deren Intensität ist nicht etwa rückläufig, sondern hat in den letzten Jahrzehnten (gemessen zum Beispiel an der Anzahl wissenschaftlicher Publikationen) sogar zugenommen. Diese Diskussion, und damit auch der Inhalt der folgenden Kapitel, spielt sich naturgemäß im Grenzbereich zwischen Physik und Philosophie ab und lässt sich nicht durch „harte Fakten" wie unzweideutige experimentelle Belege entscheiden. Die Geschichte der Physik hat aber gezeigt, dass gerade solche grenzüberschreitenden Fragen immer wieder zu fruchtbaren Erkenntnissen führen können, die dann zu neuartigen physikalischen Theorien innerhalb der „harten Wissenschaften" geführt haben.

Ein gutes Beispiel für eine solche Erkenntnis stellt das nächste Kapitel vor. Erst in den 1980er Jahren wurde eine wichtige Eigenheit quantenmechanischer Systeme entdeckt, die man als Bindeglied zwischen mikroskopischer und makroskopischer Welt sehen kann.

[4] John Bell merkte dazu passenderweise an: "It is curious that most physicists claim that they agree with Bohr, but do not always agree with each other about what he really meant."

# Dekohärenz – wie Quantenzustände zerfließen

Warum verhalten sich Objekte unserer Alltagswelt ganz anders als die von der Quantenmechanik beschriebenen mikroskopischen Systeme, obwohl sie doch aus ihnen aufgebaut sind? Das Prinzip der Dekohärenz liefert hierfür zumindest einen Teil der Antwort.

Ein quantenmechanischer Zustand, der aus einer Superposition einzelner Teilzustände besteht, entwickelt sich in einem abgeschlossenen System gemäß der Schrödinger-Gleichung. Aber wie verändert sich ein solches System, wenn man es Wechselwirkungen mit der Umgebung eingehen lässt? Interessanterweise hat man erst in den 1980er Jahren herausgefunden[5], dass sich das System in diesem Fall irreversibel ändert, indem die Interferenzterme der Wellenfunktion abgeschwächt werden und schließlich ganz verloren gehen – der Zustand verliert innerhalb von Sekundenbruchteilen seine Kohärenz. Die Teilzustände, die den tatsächlich messbaren Eigenschaften entsprechen, das heißt die „klassischen" Zustände des Theoriepostulats Q3, werden dagegen stabilisiert und verstärkt. In Abbildung 3 ist dies skizziert.

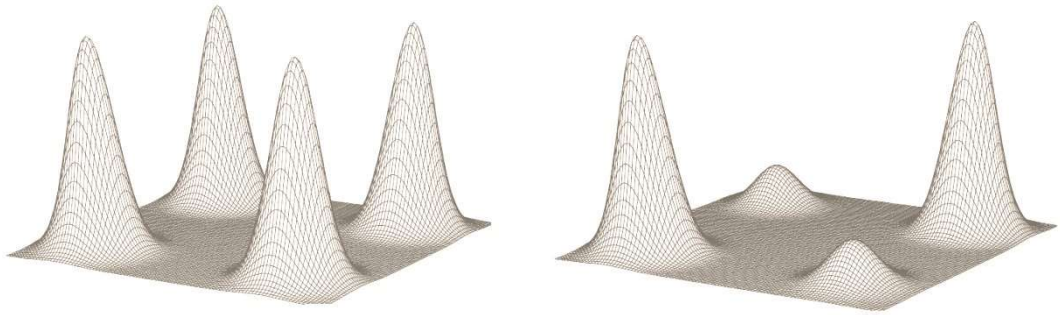

**Abb. 3:** Veränderung der Wellenfunktion durch Dekohärenz, links der Ausgangs- und rechts der Endzustand. Durch die Wechselwirkung mit der Umgebung werden die Interferenzterme stark gedämpft, es bleiben im Wesentlichen nur noch die beiden klassischen Terme bestehen, die das mögliche Ergebnis einer nachfolgenden Messung darstellen.

Auch bei einer Messung, die stets mit der Einführung von Wechselwirkungen zwischen untersuchtem System und Messgerät verbunden ist, würde sich der Effekt ergeben. Dieses Ergebnis setzt keine bestimmte Deutung der Quantenmechanik voraus, sondern lässt sich direkt aus dem Formalismus ableiten und gilt daher als unbestrittene neue Erkenntnis.

Auf den ersten Blick scheint das Phänomen der Dekohärenz perfekt zu erklären, warum sich die mysteriösen Eigenheiten der quantenmechanischen Welt nicht in unserer alltäglichen Welt zeigen. Da Wechselwirkungen mit der Umgebung praktisch unvermeidlich sind, alleine zum Beispiel durch die Wärmestrahlung, geschieht das Zerfließen der kohärenten Zustände so schnell, dass die quantenmechanischen Interferenz- und Korrelationseffekte zwar bei abgeschlossenen mikroskopischen, nicht aber bei makroskopischen Systemen auftreten können. Auch das Paradoxon von Schrödingers Katze scheint damit gelöst, da solch ein großes System in Sekundenbruchteilen seine Kohärenz verlieren würde, die Katze wäre somit schon vor dem Öffnen des Kastens entweder tot oder lebendig.

Leider liefert die Dekohärenz aber nur einen Teil der Antwort. Bei der Wechselwirkung mit der Umgebung verschwinden zwar die Bestandteile der Wellenfunktion, die für die Interferenz-

[5] Erstmals beschrieben wurde dieser Effekt vom deutschen Physiker H. Dieter Zeh, spätere Arbeiten stammen unter anderem von Wojciech Zurek und Erich Joos.

effekte verantwortlich sind, es bleiben aber *alle* klassischen Teilzustände erhalten, die für die alternativen Messresultate an diesem System stehen. Nach den Gesetzen der Quantenmechanik bleibt also immer noch eine Superposition bezüglich dieser Zustände bestehen.

Damit bleibt das quantenmechanische Rätsel bestehen. Am Ende der Messung liegt nämlich keine Überlagerung, sondern immer genau *ein* klassischer Zustand vor. Dieser rätselhafte Kollaps der Wellenfunktion bleibt daher ein unverzichtbares zusätzliches Element neben der Schrödinger-Gleichung. Das Konzept der Dekohärenz stellt daher ungeachtet seiner physikalischen Relevanz keine Lösung für das Deutungsproblem der Quantenmechanik dar. Ein Beleg für seine Neutralität in dieser Debatte ist die Tatsache, dass er mit *allen* der in diesem Aufsatz vorgestellten Interpretationen verträglich ist.

Die konzeptionellen Grenzen des Prinzips der Dekohärenz betonen noch einmal die Frage, die schon bei der Formulierung der quantenmechanischen Theorie aufgeworfen wurde: Wie lässt sich der Kollaps der Wellenfunktion als integraler Bestandteil des Messprozesses erklären? Ein naheliegender Versuch zur Beantwortung dieser Frage soll nun vorgestellt werden – die Erweiterung der Quantenmechanik um ein zweites Entwicklungsgesetz.

# Der Zustandskollaps als physikalischer Prozess

Der zum Wellenfunktions-Kollaps führende Messvorgang kann nicht durch die Schrödinger-Gleichung beschrieben werden. Für die Dauer dieses Vorgangs scheint somit ein anderes, bislang vollkommen unbekanntes Entwicklungsgesetz gültig zu sein, um das die standardmäßige Dynamik der Quantenmechanik erweitert werden muss. Die bereits zuvor angeführte Abbildung 1 zeigt den Ausgangs- und Endzustand einer Messung. Sieht man diesen Messvorgang als echten physikalischen Prozess, ist diese Schlussfolgerung eigentlich unvermeidlich. Es wundert daher nicht, dass schon früh versucht wurde, diesem zweiten Gesetz auf die Schliche zu kommen. Die wichtigste Frage ist dabei, in welchem Anwendungsgebiet es zum Tragen kommt, was gleichbedeutend mit der Frage ist, unter welchen Umständen die Schrödinger-Gleichung ihre Gültigkeit verliert. Hierfür gab es ganz unterschiedliche Vorschläge. Bezeichnet man die Schrödinger-Gleichung mit S und das zustandskollabierende Gesetz als *S**, lauten diese zum Beispiel:

- *S* gilt nur für mikroskopische Systeme, für makroskopische Systeme gilt *S**
- *S* gilt nur für Systeme, in denen keine Messungen stattfinden, bei Messungen gilt *S**
- *S* gilt nur für materielle Systeme, für Systeme mit bewussten Beobachtern gilt *S**

Eine wirkliche Lösung liefern diese Definitionen nicht. Für keine dieser drei Varianten ist es gelungen, die Grenze zwischen den beiden Anwendungsbereichen durch physikalische Kriterien auszuzeichnen, wobei der letzte Punkt im nachfolgenden Kapitel genauer beleuchtet wird. So bleiben die Begriffe wie „makroskopisch", „Messung" und „bewusster Beobachter" nur sprachliche Konstrukte ohne Erklärungswert, die sich beliebig gegeneinander austauschen lassen und sich im Grunde nicht von der Tautologie „*S** gilt für Systeme im Anwendungsbereich von *S**" unterscheiden.

Einen Schritt weiter geht der Vorschlag von G. C. Ghirardi, A. Rimini und T. Weber aus dem Jahr 1985, kurz „GRW-Theorie" genannt. Er sieht ein neues Entwicklungsgesetz *anstelle* der Schrödinger-Gleichung vor. Als einziger Unterschied kann die Wellenfunktion dabei auch spontan, das heißt ohne äußere Einwirkung kollabieren. Dies geschieht allerdings nur extrem selten (für ein einzelnes Teilchen nur alle paar Milliarden Jahre), so dass der Effekt erst bei

größeren Systemen sichtbar wäre. Bislang gibt es aber nicht den geringsten experimentellen Hinweis für diese Theorie. Sie sind zudem unverträglich mit der Relativitätstheorie[6] und haben noch ein grundsätzliches Problem: Der Kollapsprozess verringert die Auftrittswahrscheinlichkeiten alternativer Messergebnisse, aber er kann sie nicht verschwinden lassen, womit dieser Ansatz die Probleme der noch zu besprechenden Viele-Welten-Interpretation erbt, was als „Structured Tails Problem" bis heute ungelöst ist.

Noch dünner ist die Beweislage für die Vermutung von Roger Penrose, dass der Kollaps durch Gravitationseffekte im menschlichen Gehirn ausgelöst wird. Diese Effekte wären durch die (noch nicht entdeckte) vereinheitlichte Theorie aus Quantenmechanik und Relativitätstheorie beschrieben und würden sich (in noch unbekannter Weise) durch bestimmte Proteinstrukturen auf makroskopische Größenbereiche verstärken.

Tatsächlich ist die Tatsache, dass sich dieses Gesetz *S** so gut versteckt hält, das wichtigste Indiz dafür, dass uns ein entscheidendes Element zum Verständnis des Zustandskollaps fehlt. Trotz ständig verbesserter experimenteller Methoden, mit denen sich der Messvorgang zeitlich immer weiter auflösen lässt, ist bis heute keine noch so geringe Abweichung von der Schrödinger-Gleichung entdeckt worden. Das gilt auch für die im ersten Teil dieses Aufsatzes beschriebenen Experimente zur Interferenz ganzer Moleküle, also weit in den Bereich hinein, den man früher ohne zu zögern als „makroskopisch" bezeichnet hätte. Überhaupt keinen klärenden Beitrag kann dieser Ansatz außerdem für das Phänomen der Verschränkung zweier weit voneinander entfernter Teilchen (das Deutungsproblem P2) liefern.

Es sieht also nicht gut aus für die Interpretation des Messvorgangs als physikalischen Prozess. Die Suche wird zwar weitergeführt, die bisherigen experimentellen Ergebnisse legen die Existenz eines zweiten Entwicklungsgesetzes aber nicht gerade nahe.

Wenn der Kollaps kein physikalischer Prozess ist, vielleicht ist er dann ein geistiger!? Wir hätten dann in der Physik eine Verbindung zu unserem eigenen Bewusstsein entdeckt. Es gibt tatsächlich einige Physiker, die diese Deutung für möglich halten.

[6] Im Gegensatz zu anderen Interpretationen stehen sie im empirischen Widerspruch zur Speziellen Relativitätstheorie, weil der Kollapsprozess die Gleichberechtigung der Bezugssysteme aufhebt, auch wenn die Abweichungen nach aktuellem Stand zu klein für konkrete Messungen sind. Es gibt eine Untervariante der GRW-Theorie ohne diese Unvereinbarkeit („GRW Flash"), aber sie kann nur einzelne Teilchen ohne jegliche Wechselwirkung beschreiben und hätte auch noch andere Konsequenzen: die Welt würde im Wesentlichen aus dem leeren Raum bestehen, ein Wasserstoffatom würde nur ungefähr alle $10^8$ Jahre als ein kurzzeitiger „Flash" in Erscheinung treten.

# Die Macht des Bewusstseins

Wie das vorherige Kapitel gezeigt hat, scheint es keine Grenze für die physikalische Anwendbarkeit der Theorie der Quantenmechanik und damit auch der Superpositions-erhaltenen Zeitentwicklung der Schrödinger-Gleichung zu geben. Schon in den 1930er Jahren zeigte der Mathematiker John von Neumann, der wichtigste Wegbereiter für die moderne mathematische Fassung der Quantenmechanik (und neben Konrad Zuse auch der Erfinder der heutigen Computerarchitektur), dass sich die Superpositionen bei konsequenter Anwendung dieser Theorie auch auf die angewandten Messgeräte übertragen und auch nicht vor der Augen-Netzhaut oder den Nervenbahnen des Beobachters Halt machen. Da in unser eigenen Wahrnehmung aber keine überlagerten Zustände, sondern immer nur konkrete Messergebnisse auftreten, schloss er hieraus, dass es das menschliche Bewusstsein sein muss, das außerhalb der Gesetze der Physik steht und den Kollaps der Wellenfunktion verursacht. Diese Idee wurde später vom ungarischen Physiker Eugene Wigner aufgenommen.

Diese Annahme hat dramatische Konsequenzen. Ein klassischer Zustand entsteht erst durch den Kollaps der Wellenfunktion, das heißt er wird in diesem Moment im Sinne der konkreten Messbarkeit „real". Wenn das menschliche Bewusstsein die einzige Instanz ist, die diesen Kollaps bewirken kann, ist unser Universum nicht beim Urknall, sondern erst in dem Moment entstanden, als der erste Mensch seinen Blick darauf richtete! Der Physiker John Wheeler, der viele Interpretationen der Quantenmechanik maßgeblich beeinflusste, illustrierte diese reichlich absurde Vorstellung in dem nebenstehenden Bild.

**Abb. 4:** Das Universum erschafft sich selbst.

Was kann man zu diesem Ansatz sagen? Eine ganz konkrete Frage ist natürlich, ob nur das menschliche Bewusstsein diese besondere Eigenschaft hat oder ob zum Beispiel Schrödingers Katze bereits „bewusst genug" ist, um den Kollaps schon vor dem Öffnen des Kastens zu bewirken. Würde eine künstliche Intelligenz, sollte sie denn eines Tages möglich sein, diese Eigenschaft besitzen? Der größte Schwachpunkt dieses Ansatzes ist auf jeden Fall, dass er das Problem des Zustandskollapses einfach unter den „Zauberteppich" einer nichtphysikalischen Entität schiebt, die mit dem menschlichen Bewusstsein identifiziert wird. Er muss dafür einen Dualismus aus materiellen und nichtmateriellen Entitäten voraussetzen und erbt damit das Grundproblem dieser philosophisch und religiös aufgeladenen Weltsicht: Wie können sich Materie und Bewusstsein (Geist, Seele) gegenseitig beeinflussen, wenn sie nach Voraussetzung völlig unterschiedliche Wesenheiten sind? Selbst Eugene Wigner als Vertreter dieses Ansatzes musste daher zugeben: *„It may well be said that we explain a riddle by a mystery."* Dieser Ansatz teilt außerdem eine wesentliche Einschränkung mit den Kollapstheorien des vorherigen Abschnitts: Er kann keinen echten Beitrag für die Deutungsfragen der Quantenmechanik jenseits des Messprozesses liefern, insbesondere für die Erklärung der Korrelationen weit voneinander entfernter Teilsysteme.

Ganz offensichtlich ist also ein ganz anderer Schritt notwendig, um die Quantenmechanik verstehen zu können. Ein solcher Versuch soll nun vorgestellt werden.

# Eine versteckte Welt

Eine sehr klassische Vorstellung ist die Idee, die Quantenmechanik liefere mit ihren statistischen Vorhersagen nur ein unvollständiges Bild der realen Naturvorgänge. In Wirklichkeit würden ganz „normale" deterministische Gesetze gelten, die lediglich noch nicht entdeckt wären und daher „versteckte Parameter" genannt werden. Die Merkwürdigkeiten der Quantenmechanik könnten sich dann aus dem Grad der Unvollständigkeit ergeben und wären nicht länger erklärungsbedürftig. Mit Albert Einstein haben wir im ersten Teil dieses Aufsatzes bereits einen leidenschaftlichen Verfechter dieser These kennengelernt – allerdings auch die endgültige Zerschlagung dieser Hoffnung in Form der Bellschen Ungleichung! Der eindeutige experimentelle Nachweis für die Verletzung dieser Ungleichung hat gezeigt, dass sich die beobachteten Phänomene durch *keine* dieser klassischen Theorien nachbilden lassen. Ist dies also das letzte Wort zu den versteckten Parametern?

Nicht ganz. Eine wichtige Voraussetzung bei der Ableitung der Bellschen Ungleichung ist nämlich die *Lokalität* der beschriebenen Mechanismen. Bei Zweiteilchensystemen von der Art des Einstein-Podolsky-Rosen-Experiments entspricht dies der (absolut naheliegenden) Annahme, dass Korrelationen ausschließlich an der Quelle der beiden Teilchen entstehen. Allgemein bedeutet Lokalität, dass es keine Signalwirkungen schneller als die Lichtgeschwindigkeit gibt und somit die spezielle Relativitätstheorie nicht verletzt ist. Aus diesem Umstand ergibt sich nun ein interessanter Umkehrschluss: Es ist trotz der Verletzung der Bellschen Ungleichung möglich, dass die quantenmechanischen Effekte durch Theorien mit versteckten Parametern erklärt werden könnten – sofern diese *nichtlokal* sind[7].

Wie würde eine solche Theorie aussehen? Zunächst einmal – und das ist wahrscheinlich der schwierigste Punkt – müsste sie einen Mechanismus für überlichtschnelle Signale einführen und gleichzeitig verständlich machen, warum derartige Wirkungen bislang niemals direkt beobachtet wurden. Selbst die verschränkten Eigenschaften von zwei weit voneinander entfernten Teilchen lassen sich wie in Teil 1 erläutert nicht für den Austausch solcher Signale ausnutzen. Aber auch in den ungezählten anderen Experimenten von der Quantenskala bis zu Sternen und Galaxien hat Einsteins Relativitätstheorie sämtliche Überprüfungen mit Bravour bestanden. Nach allem, was wir wissen, bleibt die Lichtgeschwindigkeit daher eine unüberwindbare Barriere für den Austausch von Signalen.

Es gibt sogar noch ein anderes Argument, das die Theorie der versteckten Parameter sehr unattraktiv erscheinen lässt. Schon einige Jahre vor Bells Entdeckung wurde ein Beweis gefunden, nach seinen Autoren „Kochen-Specker-Theorem" genannt, dass diese Theorien – selbst wenn sie nichtlokal sind – nur dann die Voraussagen der Quantenmechanik reproduzieren können, wenn sie sogenannte „kontextuelle" Größen enthalten. Werden solche Größen vermessen, hängt ihr Wert nicht nur von den Eigenschaften des quantenmechanischen Systems ab, sondern auch von den genauen Umständen der Messung selbst. Eine veränderte Anordnung, zum Beispiel eine andere räumliche Orientierung der Messapparate, könnte also zu einem völlig anderen Messergebnis führen. Es scheint daher, dass sich die unerwünschte Sonderstellung des Beobachters der Kopenhagener Interpretation über die Hintertür wieder in die Theorie einschleicht.

[7] Lange Zeit nahm man sogar an, dass selbst nichtlokale Theorien mit versteckten Parametern unmöglich wären. Der angebliche Beweis dafür von John von Neumann aus dem Jahr 1932 erwies sich aber als lückenhaft (genauer gesagt enthielt er einige zu starke Annahmen), was erst 1965 durch John Bell aufgeklärt wurde. Dieser Umstand war mit dafür verantwortlich, dass die Kopenhagener Interpretation in der historischen Deutungsdebatte eine solch hohe Akzeptanz erfahren hat.

Trotz dieser Schwierigkeiten kann man die Idee der versteckten Parameter nicht als widerlegt ansehen. Es gibt eine vollständig ausformulierte Theorie, die einen solchen Weg einschlägt und sich in völliger Übereinstimmung mit den Vorhersagen der Quantenmechanik befindet.

Ihre Historie ist kurios: Sie wurde vom späteren Nobelpreisträger Louis de Broglie im Jahr 1926 aufgestellt – noch vor der Entdeckung der Quantenmechanik in ihrer heutigen Form! Aufgrund der oben genannten Probleme fand sie aber keine Anerkennung und geriet vollkommen in Vergessenheit, bis sie der amerikanische Physiker David Bohm nach einem Gedankenaustausch mit Albert Einstein (wieder er!) im Jahre 1952 wiederentdeckte und in leicht veränderter Form bekannt machte. John Bell, dessen Theorem uns schon begegnet ist[8], war davon tief beeindruckt: *„I saw the impossible done. It was in papers by David Bohm."*

**Abb. 5:** Louis de Broglie und David Bohm

Die Grundannahme dieser Theorie besteht darin, dass die Welt aus Teilchen besteht, die man sie sich als punktförmige Objekte an einem bestimmten Ort vorstellen kann. Ihre Bewegungen werden von einem allgegenwärtigen und in der Klassischen Physik unbekannten „Quantenpotential" gelenkt. Dieses Potential legt ihre Beschleunigung und damit letztendlich ihre Position in deterministischer Weise fest. Dies geschieht allerdings in explizit nichtlokaler Weise, das heißt mit einer augenblicklichen Auswirkung unabhängig vom räumlichen Abstand. In der Version von Louis de Broglie wird stattdessen die Wellenfunktion als zentrale Größe gesehen, die direkt auf die Geschwindigkeit der Teilchen wirkt, ebenfalls in nichtlokaler Weise. Rein mathematisch sind beide Varianten vollkommen äquivalent zur Quantenmechanik und führen daher auch zu den gleichen experimentellen Vorhersagen. Sie sind aber ernsthafte Kandidaten für ein konkretes physikalisches Modell hinter den Phänomenen der Quantenwelt.

Der einzige Grund für die scheinbare Zufälligkeit der Messergebnisse liegt bei diesem Ansatz in unserer Unkenntnis der anfänglichen Position der Teilchen sowie der unvermeidlichen Störung des Systems bei einer Messung. In einem Wasserstoffatom wäre das Elektron keine „Wahrscheinlichkeitswolke" um das Proton, sondern würde an einer bestimmten Position relativ zum Proton bewegungslos verharren, vom Quantenpotential vor dem Sturz in das elektrisch anziehende Zentrum des Atoms geschützt. Ein gänzlich anderes Bild als in der aktuellen Schulphysik! In dem Doppelspaltexperiment hätten die Elektronen ganz konkrete raumzeitliche Bahnen von der Quelle bis zum Auftreffpunkt auf dem Detektorschirm, entweder durch den oberen *oder* durch den unteren Spalt. Auch ihre Bahn wäre durch die genaue Form des Quantenpotentials bestimmt, das wiederum davon abhängt, ob einer oder beide der Spalten geöffnet sind.

Diese Theorie kommt ohne einen zusätzlichen Kollapsprozess und ohne eine besondere Rolle eines „Beobachters", der „Makrowelt" oder gar des menschlichen Bewusstseins aus: eine

[8] Tatsächlich war diese Theorie sogar ein Auslöser für sein Theorem. Bell fragte sich nämlich, ob nur Bohms Theorie nichtlokale Wirkungen enthält oder ob das für jede Theorie gilt, die die quantenmechanischen Effekte abbildet. Sein Theorem hat gezeigt, dass genau das der Fall ist. Bell war Zeit seines Lebens ein starker Unterstützer der de Broglie – Bohm – Theorie.

Messung beeinflusst das System nach den normalen Regeln der Quantenmechanik in Form der Schrödinger-Gleichung. Ein Erfolg, der lange unmöglich schien.

Auch wenn man die Teilchenbahnen nicht beobachten kann, ohne dadurch ihre Bahn zu ändern, folgen aus dieser Theorie ganz konkrete Trajektorien in unserem gewohnten dreidimensionalen Raum, wie in dem folgenden Beispiel für das Doppelspalt-Experiment dargestellt. Die Interferenzmuster entstehen durch den Einfluss der Wellenfunktion.

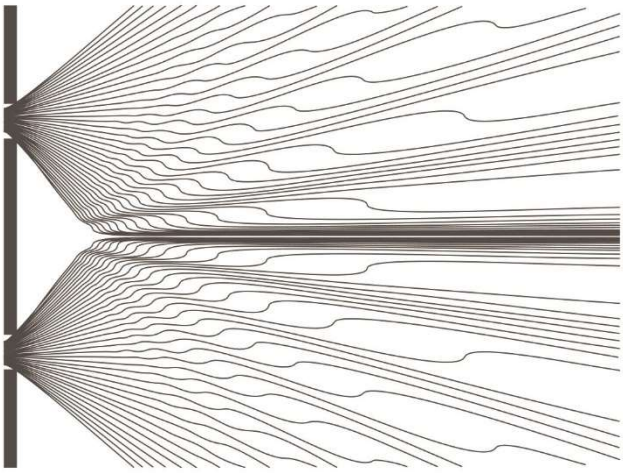

**Abb. 6:** Mögliche Bahnen der Teilchen im Doppelspalt-Experiment nach der de Broglie – Bohm – Theorie. Ihre Geschwindigkeiten (de Broglie Variante) beziehungsweise Beschleunigungen (Bohm Variante) werden direkt durch die Wellenfunktion festgelegt, deren Form von der Anzahl der offenen Spalte abhängt.

Die oben erwähnten generellen Einschränkungen finden sich aber naturgemäß auch in dieser Theorie wieder. Besonders markant sind die nichtlokalen Auswirkungen der Wellenfunktion beziehungsweise des Quantenpotentials auf die Teilchen. Dieses Potential kann man außerdem aus vielerlei Hinsicht nicht mit einem Kräftepotential vergleichen, wie es aus anderen physikalischen Theorien bekannt ist, genauso wenig wie die Wellenfunktion einem physikalischen Feld ähnelt. Beide Größen sind mathematisch nicht einmal auf dem gleichen dreidimensionalen Raum definiert, in dem wir alle leben. Aus theoretischer Sicht unbefriedigend ist zudem die Dualität der Grundelemente: Die beobachtbaren Teilchen sind nicht direkt manipulierbar; die Wellenfunktion und das Quantenpotential sind nicht direkt sichtbar, aber manipulierbar, und werden trotz ihrer Wirkung auf die Teilchenbewegungen nicht von diesen beeinflusst.

Ein grundsätzliches Problem dieser Theorie ist ihre Beschränkung auf die nichtrelativistische Schrödinger-Gleichung und dauerhaft existierende Teilchen. Eine Verallgemeinerung auf quantenmechanische Felder und dynamisch erzeugte und vernichtete Teilchen, wie es die Quantenfeldtheorie als speziellrelativistische Erweiterung der Quantenmechanik leistet, hat sich daher als extrem schwierige – vielleicht sogar unmögliche – Aufgabe herausgestellt. Jede Interaktion und damit jede Messung übt eine unkontrollierbare Wirkung auf das System aus, die sich schneller als das Licht ausbreitet. Dies kann zwar dank der konkreten Theorieeigenschaften[9] nicht für eine überlichtschnelle Signalübermittlung verwendet werden, führt

[9] Diese Aussage gilt genau dann, wenn die initialen Teilchenpositionen gemäß der Bornschen Regel angeordnet sind, was einem Gleichgewichtszustand der Theorie entspricht. Wenn man diese Regel als empirische Erkenntnis statt als Axiom der Theorie sieht, ist die übliche Quantenmechanik nur eine Untervariante einer allgemeinen Theorie. Als nicht unbedingt seriöse aber interessante

aber zu der Auszeichnung eines bestimmten Bezugsystems, in direktem Widerspruch zu einem Grundprinzip der Speziellen Relativitätstheorie.

Selbst David Bohm hielt diese Theorie daher nicht für die endgültige Lösung, ihm ging es vor allem um den Nachweis, dass es *prinzipiell* möglich ist, quantenmechanische Phänomene durch Theorien mit (wenn auch nichtlokalen) versteckten Parametern nachbilden zu können. Die Interpretation zeigt auch, dass es keinesfalls erwiesen ist, dass die Quantenmechanik ein Element des Zufalls enthält, das über die klassische Unkenntnis des Anfangszustandes hinausgeht, oder dass sie eine besondere Rolle eines „Beobachters" erfordert. Fest steht aber auch, dass auch diese Theorie weder die Eigenschaft der Nichtlokalität noch die der Kontextualität (Abhängigkeit von der Art der Messung) abstreifen kann. Sie hat diese neuartigen Aspekte der Quantenwelt vielmehr zu einem expliziten Bestandteil ihrer Grundannahmen gemacht.

Weiter unklar bleibt auch die Frage nach der physikalischen Interpretation der Wellenfunktion (oder in Bohms Variante die des Quantenpotentials), die auch in dieser Theorie eine zentrale Rolle spielt und sich nicht auf ein Feld im dreidimensionalen Raum reduzieren lässt. Wie würde sich die Welt darstellen, wenn es *nur* diese ominöse Wellenfunktion geben würde? Genau davon handelt das nächste Kapitel.

# Die Welt ist nicht genug

Wie die bisherigen Abschnitte gezeigt haben, stellt der Kollaps der Wellenfunktion, durch den Superpositionen in konkrete klassische Zustände verwandelt werden, ein zentrales Problem für die Deutung der Quantenmechanik dar. Was wäre, so fragte sich 1957 ein gewisser Hugh Everett, wenn es gar keinen Kollaps gibt und stattdessen jeder möglicher Zustand auch tatsächlich realisiert wird? Mit Hilfe einer mathematischen Umformulierung der Quantenmechanik auf der Basis von relativen Zustandsbeschreibungen wies er nach, dass dies prinzipiell möglich ist. Ein quantenmechanisches System würde demnach *immer* der Schrödinger-Gleichung folgen und die hieraus resultierenden Superpositionen wären ohne Ausnahme realisiert, womit jedes mögliche Ergebnis auch tatsächlich auftreten würde. Eine Messung hätte dann (im Gegensatz zum Beispiel zur Kopenhagener Interpretation) überhaupt nichts Rätselhaftes oder Unbestimmtes, da sie lediglich den bereits vorliegenden Zustand anzeigt. Sie würde damit auch kein Zufallselement in die Theorie hineintragen – dieser Ansatz beschreibt eine vollkommen deterministische Welt.

Vielleicht ist dem Leser schon der Pferdefuß an diesem Ansatz aufgefallen!? Wie kann jedes mögliche Messergebnis realisiert sein, wo sich die Alternativen doch widersprechen und immer nur *ein* Resultat durch die Messung angezeigt wird? Schrödingers Katze besteht zum Beispiel aus einer Superposition aus tot und lebendig, wie können beide Zustände gleichzeitig real sein? Everetts Antwort auf die Frage war, dass die verschiedenen Zustände voneinander „delokalisiert" sind, und zwar mitsamt den Beobachtern, die sie messen. Es gibt also wie in Abbildung 7 dargestellt einen „Zweig" der Realität, in dem Möglichkeit A realisiert ist (zum Beispiel tote Katze) und dies auch von einem Beobachter in diesem Zweig festgestellt wird, und einen anderen, von diesem getrennten Zweig, in dem Möglichkeit B realisiert ist

---

Spekulation wäre es dann denkbar, dass es irgendwo im Universum isolierte Materieüberreste aus der Frühphase des Universums gibt, die sich außerhalb dieses Gleichgewichts befinden und damit Phänomene zeigen könnten, die nicht an die Gesetze der Quantenmechanik und der Relativitätstheorie gebunden sind.

(lebendige Katze), ermittelt vom Beobachter in dem zweiten Zweig. Diese Zweige entstehen ständig neu und vervielfältigen sich in kürzester Zeit ins Myriadenfache. Die anfängliche Auslegung des Everettschen Ansatzes von Bryce DeWitt und später David Deutsch sah in den getrennten Zweigen reale Welten – minimal unterschiedliche Kopien des gesamten Universums, die bei jeder Verzweigung neu erzeugt werden und dann parallel voneinander existieren[10]. Die „Viele-Welten-Theorie" (Englisch „Many Worlds") war geboren, die bis heute gleichermaßen Physiker wie Science Fiction Autoren inspiriert.

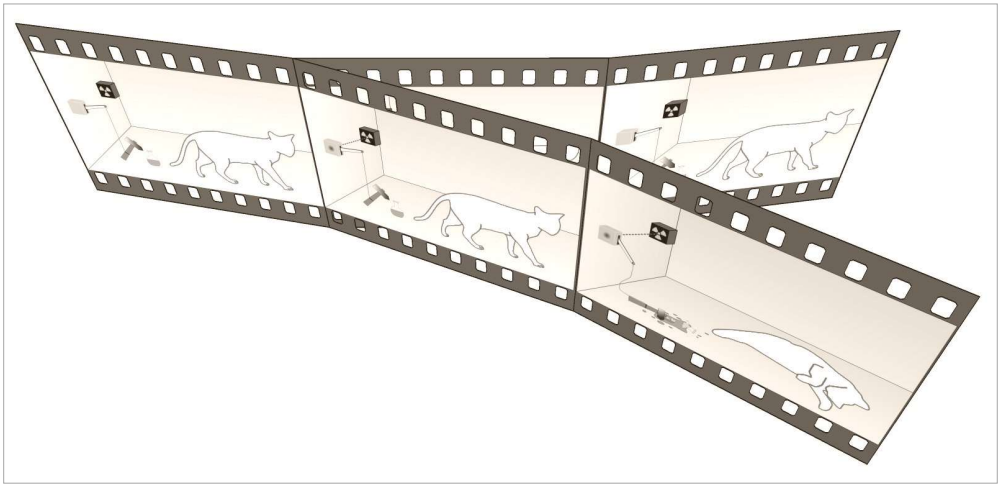

**Abb. 7:** Nach der Viele-Welten-Theorie sind alle möglichen Ergebnisse eines Experiments auch tatsächlich realisiert und damit auch die tote und die lebendige Katze von Schrödingers Gedankenexperiment. Sie befinden sich lediglich mitsamt ihrer Beobachter in voneinander getrennten Zweigen.

Eine andere frühe Interpretation der Everettschen Idee ist die von Heinz-Dieter Zeh erdachte „Many Minds" Theorie, nach der sich nicht die Welt, sondern unser Bewusstsein (Mind) in eine Vielzahl von fast identischen Kopien aufspaltet. Sie würden sich nur darin unterscheiden, welches Messergebnis sie registrieren, ohne die anderen Kopien wahrnehmen zu können. Dieser Ansatz hat sich aber nicht als fruchtbar erwiesen und wird heutzutage kaum noch vertreten.

In der modernen Fassung der Interpretation sieht man die Zweige als voneinander isolierte Teilbereiche unseres Universums, „Branches" im Englischen. Die eigentlich passendere Bezeichnung „Many Branches Theory" hat sich aber nie durchsetzen können. Die ständig ablaufende Verzweigung, das heißt die Erzeugung neuer Branches, geschieht demnach immer dann, wenn die zuvor beschriebenen quasi-irreversiblen Effekte der Dekohärenz bei einer Messung auftreten. Diese Aufspaltung beruht auf der normalen Schrödinger-Gleichung, aber sie ist – was häufig übersehen wird, sowohl von Anhängern dieser Interpretation als auch von deren Kritikern – *perspektivisch*: die Definition dieser Branches hängt von den vom Beobachter gewählten Rahmenbedingungen der Messung ab. Die entstandenen Zweige können danach nicht mehr miteinander wechselwirken. Genauer gesagt *fast* nicht mehr, da die verbindenden Interferenzterme verschwindend klein werden, aber nicht vollkommen verschwinden.

[10] David Deutsch bevorzugt eine Interpretation, nach der schon immer unendlich viele parallel existierende Welten vorlagen und diese bei einer Everettschen Aufspaltung lediglich „gefüllt" werden. Die zentralen Eigenschaften und auch die Schwachpunkte der Viele-Welten-Theorie bleiben aber auch bei dieser Variante erhalten.

Ein selbstreflektierender Beobachter würde sich in diesem Bild entweder in dem Zweig mit der toten Katze oder in dem der lebendigen Katze befinden. Da er zunächst nicht weiß, in welchem er sich befindet, da jeder dieser Zweige einen derartigen Beobachter enthält, müsste er eine Messung durchführen, was in diesem Fall der Öffnung des Kastens gleichkommt. Darin wird er entweder eine tote oder eine lebendige Katze vorfinden. Die Messung würde aber lediglich darüber Aufschluss geben, in welchem Zweig er sich befindet und keinen mysteriösen Kollaps des Zustandsvektors erfordern. Die Schrödinger-Gleichung bliebe damit das einzige Gesetz für die Zeitentwicklung der Quantensysteme, und die Wellenfunktion der einzige Grundbaustein unserer Welt, was den eigentlichen Charme dieser Interpretation ausmacht. Anders als die Teilchen-basierte de Broglie - Bohm - Interpretation lässt sie sich auch problemlos auf die speziellrelativistische Erweiterung der Quantenmechanik anwenden.

Die Viele-Welten-Theorie hat in der Physikergemeinde viele Anhänger gefunden und wird von vielen als *die* Lösung für das Deutungsproblem der Quantenmechanik gesehen. Wenn man bedenkt, dass diese Interpretation die Existenz von Myriaden minimal unterschiedlicher Kopien der eigenen Person postuliert, die trotz ihrer Unzugänglichkeit genauso real wie die Person sind, die in diesem Moment über ihre Doppelgänger nachsinnt, wird glaube ich erst richtig deutlich, wie tiefgreifend das Dilemma ist, in das uns die Quantenmechanik gestürzt hat.

Aber kann diese Theorie wirklich die in sie gesteckten Erwartungen für ein physikalisches Modell der Quantenwelt erfüllen? Bei näherem Hinsehen wird deutlich: Sie kann es nicht. Die drei größten Probleme möchte ich hier kurz beschreiben.

Der erste Punkt betrifft die bereits angesprochene Beobachter-Abhängigkeit bei der Entstehung der Branches. Im Formalismus der Quantenmechanik hängt es lediglich von der Wahl des Koordinatensystems ab, ob die Wellenfunktion aus den Einzelzuständen „schwarz"/„weiß" oder „hart"/„weich" besteht, um bei den Begriffen aus dem ersten Teil dieses Aufsatzes zu bleiben. Bei einer Erzeugung eines neuen Zweiges wird in der Viele-Welten-Theorie aber immer nur einer dieser Varianten realisiert, das heißt es entsteht entweder eine „schwarze" und eine „weiße" oder aber eine „harte" und eine „weiche" Welt. Aber welche physikalischen Faktoren gibt es für diese Auswahl des präferierten Referenzsystems? Eine wichtige Rolle spielt dafür der Prozess der Dekohärenz, aber es ist nach wie vor umstritten, wie die genaue Antwort auf diese Frage aussieht.

In der Viele-Welten-Theorie gibt es nur ein fundamentales Element in der Natur – keine Teilchen, Wellen oder andersartigen materiellen Grundbausteine, sondern nur die quantenmechanische Wellenfunktion. Sie lässt sich aber nicht als ein Feld in unserer dreidimensionalen Welt (oder vierdimensionalen, wenn man die relativistische Vereinigung von Raum und Zeit berücksichtigt) interpretieren. In einem System aus N Teilchen operiert diese Funktion im 3N-dimensionalen Zustandsraum des Systems. Was aber sind dann die fundamentalen Objekte in unserem 3D-Raum? Anders als zum Beispiel in der Stringtheorie ist der 3D-Raum nicht einmal ein Unterraum dieses höherdimensionalen Raums. Auch in der Klassischen Physik stellen sich manche Zusammenhänge einfacher dar, wenn man den Zustandsraum des Systems betrachtet, aber die abstrakten Funktionen in diesem Raum sind nur Rechengrößen, die zu Teilchen, Wellen oder Kraftfeldern in unserem 3D-Raum gehören.

Die Viele-Welten-Theorie hat für diese Frage eine radikale Antwort parat: *Es gibt keinen 3D-Raum*. Nur die Wellenfunktion und damit auch nur der 3N-Raum ist real, wir leben lediglich in der Illusion eines dreidimensionalen Raums. Ein weiterer höchst unanschaulicher Aspekt

dieser Interpretation, aber kein offensichtlich inkonsistenter. Es wäre nicht das erste Mal, das wir angesichts neuer Entdeckungen und physikalischer Umwälzungen eine als sicher geglaubte Lehrmeinung revidieren müssten. Trotzdem bleibt ein gewaltiges und oft unterschätztes Problem: Die Viele-Welten-Theorie muss plausibel machen, warum uns der Raum dreidimensional *erscheint*. Es geht hier nicht nur um visuelle Eindrücke oder den „gesunden Alltagsverstand", sondern auch um grundlegende physikalische Erkenntnisse aus unterschiedlichsten Bereichen der Physik, die einen dreidimensionalen Raum nahelegen, auch auf der mikroskopischen Ebene. Für dieses Problem wurde bislang keine allgemein anerkannte Lösung gefunden. Es lässt auch die einfache Anwendbarkeit der Viele-Welten-Theorie auf die relativistische Erweiterung der Quantenmechanik in einem anderen Licht erscheinen: Dieser Interpretation fehlt eine konkrete Aussage über die fundamentalen Bestandteile in der 3D-Welt. Kein Wunder also, dass sie dank ihrer fehlenden Konkretheit zu keinen Widersprüchen mit der relativistischen Physik führt.

Bezüglich dieses Aspektes scheint die de Broglie – Bohm – Theorie mit ihren Teilchen im 3D-Raum besser abzuschneiden. Allerdings nur auf den ersten Blick, denn die 3N-Wellenfunktion, oder das 3N-Quantenpotential, spielt auch in dieser Theorie eine wichtige Rolle, und die gleichzeitige Realität des 3D-Raums und des 3N-Raums erscheint konzeptionell unsinnig.

Das dritte und vermutlich fundamentalste Problem der Viele-Welten-Theorie betrifft die quantenmechanischen Wahrscheinlichkeiten. Wie kann es eine „Wahrscheinlichkeit" für einen konkreten Messwert geben, wenn stets *alle* Messausgänge in Form realer Zweige realisiert sind? Auch bei einer Aufspaltung für zwei Alternativen, die nach der Quantenmechanik zu sehr ungleichen Anteilen auftreten würden, zum Beispiel mit 1% Ergebnis „weiß" gegenüber 99% Ergebnis „schwarz", würden nur genau zwei Zweige erzeugt werden. Der Beobachter im ersten Zweig würde *immer* das Ergebnis „weiß" sehen und der im zweiten *immer* das Ergebnis „schwarz". Das wirft auch ein merkwürdiges Licht auf den Begriff des freien Willens. Da ausnahmslos jede Möglichkeit realisiert wird, würde jedem bewusst gefällten Entschluss ein paralleler Zeig in dieser Welt gegenüberstehen, in der sich ein ansonsten völlig identischer Beobachter befindet, der zu einer gegensätzlichen Entscheidung gelangt ist[11]. Ein solcher Kontext bietet nicht einmal begrifflich einen Raum für Wahrscheinlichkeiten. Der einzige Ausweg, der von den Vertretern dieser Interpretation auch tatsächlich vorgebracht wird, ist eine Art subjektive Wettbereitschaft auf den Ausgang einer späteren Messung. Aber selbst in dieser Sichtweise würde eine direkte Übertragung dieses Weltbildes zu empirisch falschen Ergebnissen führen: für das oben genannte Beispiel würde es genau zwei Zweige geben, was eine Wahrscheinlichkeit von 50% nahelegt, sich in dem „weißen" oder „schwarzen" Zweig wiederzufinden, im Widerspruch zu der von der Quantenmechanik vorausgesagten 1% zu 99% Verteilung für dieses Beispiel. Die korrekten Vorhersagen erreicht man nur durch die explizite Hinzunahme der Bornschen Regel, nämlich Auftrittswahrscheinlichkeit eines Messergebnisses gleich Betragsquadrat der Wellenfunktion, die in dieser Interpretation keine konzeptionelle Grundlage hat.

So inspirierend die Idee der Parallelwelten auch ist, scheint dieser Ansatz somit nach aktuellem Stand nicht in der Lage zu sein, die Interpretationsprobleme der Quantenmechanik lösen zu können.

---

[11] Es gibt noch ein Kuriosum dieser Weltsicht, das definitiv nicht zur Nachahmung empfohlen ist: Jeder Selbstmordversuch wäre zum Scheitern verurteilt, da es durch ein (un?)glückliches Zusammentreffen von Zufälligkeiten immer passieren kann, dass der Versuch misslingt. Danach würde es also mindestens einen Weltenzweig geben, in der man sich lebendig wiederfinden und über den unglaublichen Zufall der Rettung wundern würde.

# Zwischenfazit: Die Interpretationen der Quantenmechanik

In den bisherigen Kapiteln habe ich die nach gängiger Meinung wichtigsten Interpretationen der Quantenmechanik vorgestellt:

- Kopenhagener Interpretation: nur die Makrowelt ist real, der messbedingte Kollaps der Wellenfunktion und die Verschränkungseffekte sind nicht erklärungswürdig.
- Kollaps-Theorien, insbesondere GRW Theorie: der Kollaps der Wellenfunktion ist ein dynamischer von der Schrödinger-Gleichung abweichender Vorgang.
- de Broglie – Bohm – Theorie: Vervollständigung der Quantenmechanik durch Teilchen im 3D-Raum, die in kollapsfreier aber nichtlokaler Weise von der Wellenfunktion oder vom Quantenpotential gelenkt werden.
- Viele-Welten-Theorie: nur die 3N-dimensionale Wellenfunktion ist real, alle möglichen Messergebnisse sind in voneinander getrennten Weltenzweigen auch tatsächlich realisiert.

Es gibt mittlerweile neben Untervarianten dieser Hauptinterpretationen eine kaum überschaubare Vielzahl von weiteren Erklärungsversuchen, die von ihren jeweiligen Schöpfern mit großem Enthusiasmus vorgetragen werden. Was sie vereint, ist die Tatsache, dass keine von ihnen erfolgreich ist. Zumindest nicht in dem Sinne, dass eine dieser Interpretationen den Großteil der Physikergemeinde überzeugt hätte, eine einleuchtende Erklärung – ein erfolgreiches physikalisches *Modell* – für die erstaunlichen Phänomene der mikroskopischen Welt geliefert zu haben. Einigkeit besteht lediglich darin, und das haben hoffentlich die bisherigen Kapitel verdeutlicht, dass *jede* dieser Interpretationen zu einer Abkehr von unserem gewohnten klassischen Weltbild führt. Folgende Aspekte haben sich dabei als besonders erklärungsbedürftig erwiesen:

- Die physikalische Interpretation der *Wellenfunktion*, die keiner bekannten Größe in der Klassischen Physik ähnelt.
- Das *Messproblem* der Quantenmechanik: Was passiert bei einer Messung? Was bedeutet der Kollaps der Wellenfunktion und wie entstehen die uns bekannten makroskopischen Zustände? Stichworte hierfür sind Schrödingers Katze und 3D-Raum versus 3N-Raum.
- Die spezielle Rolle des *Zufalls* in Form der eingeschränkten Vorhersehbarkeit von zukünftigen Einzelergebnissen trotz deterministisch ableitbarer Mittelwerte, wie sie sich in den quantenmechanischen Wahrscheinlichkeiten und in der Heisenbergschen Unschärferelation äußert.
- Die in der Quantenwelt offenkundige *Kontextualität*, die Messungen und Beobachtern eine viel aktivere Rolle als das bloße Aufdecken von bereits vorhandenen Eigenschaften nahelegt.
- Das Phänomen der *nichtlokalen Verschränkung*, das beliebig weit voneinander entfernte Systeme auf fast magische Weise miteinander verbindet, ohne in messbarem Konflikt mit der Relativitätstheorie zu geraten.

Diese Eigenheiten sind keine Artefakte der aktuellen Theorie der Quantenmechanik. Sie spiegeln, in welcher genauen Form auch immer, die Besonderheiten der mikroskopischen Welt wider: Es gibt eine Reihe von sogenannten „No Go“ Theoremen, von denen das Bellsche Theorem das bekannteste ist, die unter sehr allgemeinen Annahmen aufzeigen, dass sie *jede* mögliche Theorie der Quantenphänomene betreffen. Zwei andere zentrale Theoreme sind das schon erwähnte Kochen-Specker-Theorem von 1966, jüngst erweitert auf allgemeine

kausale Abhängigkeiten, welches die Kontextabhängigkeit von Messergebnissen aufzeigt, sowie das Pusey-Barrett-Rudolph Theorem von 2011. Letzteres begrenzt die Möglichkeiten, die Wellenfunktion nur als statistisches Wissen über mögliche zukünftige Messergebnisse aufzufassen statt als direkter Entsprechung des physikalischen Systemzustandes.

Meiner Meinung nach, und die Gründe dafür habe ich versucht in diesem zweiten Teil aufzuzeigen, bietet *keine* der bislang besprochenen Interpretationen eine erfolgreiche Erklärung dieser Phänomene. Selbst ein klarer Trend lässt sich nicht ausmachen, die bisherigen Ansätze geben vollkommen unterschiedliche, sich gegenseitig ausschließende Antworten auf diese Fragen. Ein schockierend schlechtes Fazit nach fast hundert Jahre intensiver Debatte über die Deutung der Quantenmechanik!

Einige Physiker haben daraus sogar den pessimistischen Schluss gezogen, dass die Quantenmechanik überhaupt keinen Beitrag für die Beschreibung unserer Welt liefert. Nach dieser als „QBism" (ehemals „Quanten-Bayesianismus") benannten Sichtweise repräsentiert die Wellenfunktion lediglich die Einschätzung eines rationalen Agenten über das Ergebnis einer Messung, also seinen subjektiven Wetteinsatz. Diese Werte wären zwar auch von der realen Welt geprägt, was diese Interpretation vom belanglosen Ansatz des Instrumentalismus unterscheidet, aber sie *beschreiben* unsere Welt nicht. Das gilt nach dieser Sichtweise auch für alle anderen physikalischen Theorien – die Natur bleibt für uns vollkommen unerkennbar.

Meiner Meinung nach ist das ein unnötig pessimistischer und wenig fruchtbarer Standpunkt. Er hält den Versuch, mögliche Erklärungen hinter den Phänomenen zu finden, für grundsätzlich unmöglich. Sagen uns die vielfältigen Phänomene, mit denen uns die Quantenmechanik immer wieder ins Staunen versetzt, denn gar nichts über die Welt aus, in der wir leben?

Vielen Lesern wird vielleicht Albert Einsteins Ausspruch „*Raffiniert ist der Herrgott, aber boshaft ist Er nicht!*" bekannt sein, der seinen tiefen Glauben in die Rationalität und Verständlichkeit unserer Welt widerspiegelt. Zu der aktuellen Situation passt ein weniger bekanntes Zitat von ihm, das er wenige Jahre später angesichts des neuen Weltbildes der Quantenmechanik tätigte:

*„Ich habe noch einmal darüber nachgedacht. Vielleicht ist Er doch boshaft."*

Aber es ist noch nicht vorbei. Dieser Parforceritt durch die Interpretationslandschaft der Quantenmechanik ist noch längst nicht vollständig. Im dritten Teil dieses Aufsatzes möchte ich Ansätze vorstellen, die eine realistische Beschreibung unserer Welt liefern und gleichzeitig das Potential haben, alle Merkwürdigkeiten der Quantenmechanik erklären zu können. Ihr einziges Problem: Sie sind schwer zu glauben. Sie sind nämlich durch eine ganz spezielle Eigenschaft ausgezeichnet – kausale Abhängigkeiten von *zukünftigen* Ereignissen.

In diesem dritten Teil werde ich versuchen, Sie zu überzeugen, dass dieser Ansatz längst nicht so verrückt ist, wie er klingt. Tatsächlich hat er auch schon seit vielen Jahren einen Weg in die seriöse Wissenschaft gefunden. Im Mittelpunkt wird dabei eine klärende Diskussion der Zeit stehen, die zu einem überraschenden Ergebnis kommen wird. Bleiben Sie gespannt!

**Bildreferenzen**

Abb. 2:
https://lab-initio.com/screen_res/nz409.jpg
Autor: Nick Kim / „free for educational and personal use"

Abb. 4:
Autor: John Archibald Wheeler

Abb. 5:
- http://www.physics.umd.edu/courses/Phys420/Spring2002/Parra_Spring2002/Images/Physicists_Big/Broglie_Big.jpg
  Autor unbekannt / Public domain
- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:David_Bohm.jpg / Autor unbekannt, uploaded by Karol Langner / Free to use

Abb. 6:
Reprinted from [D. Dürr, S. Teufel: *Bohmian Mechanics*, Springer 2009], based on a figure in
[C. Philippidis, C. Dewdney, B.J. Hiley: *Quantum interference and the quantum potential.*, Il Nuovo Cimento 1979, 52B, 15–28]

Abb. 7:
http://en.wikipedia.org/wiki/File:MWI_Schrodingers_cat.png
Autor: Dc987 / Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported

Internetfundstücke ohne Quellenangaben:
Abb. 1 (Quantum Collapse), Abb. 3 (Quantum Decoherence)