Auf der Suche nach dem Quantenmodell

Teil 4 – Die beste Interpretation der Quantenmechanik

Friedrich Wagner, www.frwagner.de, April 2022

Wir sind endlich im vierten und letzten Teil dieses Aufsatzes angelangt. Nach der Odyssee durch die rätselhaften Phänomene der Quantenwelt in Teil 1, einem Abriss der Theorie der Quantenmechanik und den wenig überzeugenden Versuchen ihrer Deutung in Teil 2 sowie den retrokausalen Modellen in Teil 3 soll nun endgültig die Frage beantwortet werden, welche Interpretation dieser Theorie die richtige ist.

So formuliert kann das Unterfangen allerdings nur scheitern. Wann immer man ein solches Versprechen von einem Autor vernimmt, kann man getrost davon ausgehen, ein einseitiges und damit weitgehend wertloses Ergebnis präsentiert zu bekommen, egal ob von einem Hobbyforscher oder einem Nobelpreis-gekürten Physiker. Ähnlich verdächtig sind Phrasen wie „die Quantenmechanik hat eindeutig X gezeigt". Beliebte Beispiele für X sind Indeterminismus (objektiver Zufall), Holismus, Nichtseparabilität, Beobachterabhängigkeit oder sogar die Nichtrealität unserer Welt. Im Grunde gibt es nur *eine* Erkenntnis, die von allen Forschern auf der Suche nach dem Quantenmodell geteilt wird. Sie hat diesen Aufsatz eröffnet:

> *Unser gewohntes „klassisches" Naturverständnis wird angesichts der Phänomene der Quantenwelt grundlegend revidiert werden müssen.*

So unausweichlich diese Schlussfolgerung angesichts der noch immer andauernden Deutungsdebatte erscheint, so unspezifisch ist sie aber auch. *Wie* müssen wir unser Weltbild korrigieren und von welchen natürlich erscheinenden Konzepten müssen wir uns gegebenenfalls trennen, die einem echten Verständnis dieser Phänomene entgegenstehen? Darauf gibt es noch immer keine einfache und mehrheitsfähige Antwort. Angesichts dieser Situation ist es vielleicht verständlich, dass einige Forscher die Suche aufgegeben haben. Sie haben sich entweder dem „Shut up and calculate" Lager verschrieben oder versuchen, den Misserfolg als philosophisches Programm umzudeuten, versehen mit griffigen Namen wie „QBism" oder „Pragmatic Realism". Nach diesen Programmen sei es gar nicht das Ziel der physikalischen Naturbeschreibung, etwas über unsere Welt herauszufinden, in der wir leben. Aus meiner Sicht ein überaus pessimistisches Ergebnis, und ich bin mir sicher, dass es vielen Lesern ähnlich geht.

Zum Glück ist die Situation aber nicht so aussichtlos wie sie angesichts dieser unfertigen Debatte erscheint. Es *gibt* einige Grundprinzipien, die sich in diesen Diskussionen als sehr hilfreich für das Verständnis der Quantenmechanik herausdestilliert haben. In diesem vierten Teil sollen sie vorgestellt werden. Auch diese Ergebnisse sind nicht unumstritten, aber statt ständig auf Kritiken dieser Erkenntnisse einzugehen, werde ich mich auf die diejenigen Schlussfolgerungen konzentrieren, die mir selbst am plausibelsten erscheinen. Das Hauptziel dieses vierten Teils ist nicht, neue Probleme aufzuwerfen, sondern (endlich!) Antworten zu liefern, wohin uns die Suche nach dem Quantenmodell geführt hat.

Für keine der im Folgenden vorgestellten Grundsätze kann ich eine eigene Urheberschaft beanspruchen. Sie stammen von Physikern und Philosophen, die uns in den ersten Teilen schon begegnet sind. An erster Stelle sind hierfür die Denkansätze und der Formalismus von Werner Heisenberg zu nennen, die unberechtigterweise im Schatten des Weltbildes stehen,

das mit dem Formalismus von Erwin Schrödinger und den oft unergründlichen philosophischen Thesen von Nils Bohr verknüpft ist. Erst in jüngster Zeit mehren sich die Stimmen, dass Heisenbergs Ansatz ein viel klareres Bild der quantenmechanischen Phänomene liefert. Dafür haben vor allem Yakir Aharonov – Schöpfer des Two-State Formalismus – und der italienische Physiker Carlo Rovelli überzeugende Argumente gefunden. Rovelli ist es auch, der meiner Meinung nach mit seiner „Relationalen Interpretation" den wichtigsten Schlüssel für das Verständnis der Quantenmechanik gefunden hat. Diese Interpretation, die einen viel radikaleren Ansatz hat als ihr Name vermuten lässt, wird im Mittelpunkt dieses vierten Teils stehen. Carlo Rovelli ist auch ein fantastischer Autor populärwissenschaftlicher Bücher – im besten Sinne des Wortes – über die Quantenmechanik, die Natur der Zeit, die Relativitätstheorie und die von ihm aktiv mitgestaltete Quantum Loop Theorie als ein vielversprechender Quantengravitations-Ansatz. Die letzte Zutat in diesem Aufsatz sind Erkenntnisse aus der zeitsymmetrischen Perspektive. Einen großen Anteil hat daran der australische Philosoph Huw Price, dessen großartiges Buch „Time's Arrow and Archimedes' Point" aus dem Jahr 1996 ein Startpunkt für mich selbst war, mich für dieses Thema zu begeistern.

Jedes der folgenden Abschnitte stellt ein Grundprinzip zum Verständnis der Quantenmechanik vor. Es ist die Gesamtheit dieser Prinzipien, die meiner Meinung nach die Antwort auf die Frage darstellt, was uns die Quantenmechanik über die Strukturen unserer Welt zu sagen hat.

Heisenberg-Bild statt Schrödinger-Bild

Ein neuer Blick auf den Formalismus der Quantenmechanik

Abb. 1: Werner Heisenberg

Werner Heisenberg war der erste, der im Jahre 1925 die Grundgleichungen der Quantenmechanik entdeckte, und sie haben bis zum heutigen Tag in unveränderter Form Bestand. Der nur wenige Monate später entdeckte Formalismus von Erwin Schrödinger, mathematisch gesehen vollkommen äquivalent dazu, dominiert aber noch immer die Lehrbücher der Quantenmechanik. Im Zentrum der Schrödinger-Gleichung stehen keine unnötig abstrakt wirkenden Größen wie Operatoren oder Matrizen wie im Heisenberg-Formalismus, sondern die schon häufig erwähnte Wellenfunktion. Allein der Name spricht die physikalische Intuition an. Inspiriert von Louis de Broglies Entdeckung, dass nicht nur Lichtteilchen, sondern auch Elementarteilchen wie Elektronen wellenartige Eigenschaften wie Interferenzeffekte zeigen können, scheint das Ergebnis klar zu sein und genau so wird die Theorie in den Universitäten gelehrt: es gibt in Wirklichkeit keine Teilchen, die sich auf konkreten Trajektorien durch den Raum bewegen, sondern nur eine im Raum „verschmierte" Wellenfunktion. Historisch gesehen wird Erwin Schrödinger daher damals wie heute als Gewinner dieser Konkurrenz alternativer Ansätze gesehen.

Aber wie passt dieses Bild zu der Erkenntnis, dass sich als Messergebnis vollkommen ausnahmslos immer nur ein ganzes Elementarteilchen zeigt? Die Antwort des Schrödinger-Bildes besteht in der Arbeitshypothese, dass sich dieses Teilchen bei einer „Messung" auf eine „objektiv zufällige" Weise im „Moment" der Messung aus der Wellenfunktion „manifestiert", mit einer Auftrittswahrscheinlichkeit, die dem Amplitudenquadrat dieser Funktion entspricht.

Die vielen Anführungsstriche zeigen schon die Problematik dieser Hypothese, auf die ich im zweiten Teil dieses Aufsatzes ausführlich eingegangen bin: das ist das Messproblem der Quantenmechanik. Wie bewertet Erwin Schrödinger selbst diese Erklärung? Machen sie sich auf zwei überraschende Zitate von ihm gefasst:

> *„Had I known that we were not going to get rid of this damned quantum jumping, I never would have involved myself in this business!"*

Es stammt aus dem Jahr 1926. Noch deutlicher ist seine späte Einsicht nach jahrelangen Diskussionen mit Heisenberg:

> *"There was a moment, when the creators of wave mechanics* [das heißt er selbst] *nurtured the illusion of having eliminated the discontinuities in quantum theory. But the discontinuities eliminated from the equations of the theory reappear the moment the theory is confronted with what we observed."*

Trotz dieses Eingeständnisses wird das Bild der Quantenmechanik noch immer von seiner „Wellendynamik" dominiert. Ist der Heisenberg-Formalismus wirklich so unverständlich und abstrakt, dass man ihn ignorieren sollte? Tatsächlich ist genau das Gegenteil der Fall. Gerade für Einzelsysteme bietet er eine viel bessere physikalische Beschreibung, die auch ohne einen mysteriösen Kollaps der Wellenfunktion auskommt. Höchste Zeit, die Grundzüge dieses Ansatzes vorzustellen.

Der Zustand eines Systems, wie es auch in einem bestimmten Messaufbau im Labor präpariert wird, ist auch im Heisenberg-Bild durch die Wellenfunktion festgelegt. Im Gegensatz zum Schrödinger-Bild ist diese Funktion aber überhaupt nicht zeitveränderlich – sie beschreibt lediglich den Anfangszustand und ist keine dynamische Größe. Ein konkretes Messergebnis erhält man durch die Anwendung sogenannter „Operatoren" auf diesen Zustand, mathematisch gesehen Matrizen. Genau diese Operatoren sind im Heisenberg-Bild zeitveränderlich, während sie im Schrödinger-Bild zeitlich konstant sind. Es gibt zum Beispiel Orts- und Impuls-Operatoren, die zu einem gemessenen Ort (Position eines Teilchens) beziehungsweise Impuls (Masse mal Geschwindigkeit dieses Teilchens) führen. Es wäre allerdings eine zu starke Vereinfachung, sie mit einem Ort oder Impuls zu identifizieren. Jedem Operator entspricht vielmehr eine Matrix, die eine Vielzahl von einzelnen Werten enthält, welche man als *mögliche* Ergebnisse für den Ort beziehungsweise Impuls unter einer bestimmten Messbedingung interpretieren kann. In den späteren Abschnitten dieses Aufsatzes wird diese Deutung klarer werden.

Dabei hat sich ein entscheidender Unterschied zur Klassischen Physik gezeigt: Es macht in der quantenmechanischen Welt einen physikalisch messbaren Unterschied, ob man erst den Ort und dann den Impuls eines Teilchens misst, oder die umgekehrte Reihenfolge durchführt. Das ist auch die Grundlage der Heisenbergschen Unschärferelation: Man kann den Ort und den Impuls eines Teilchens zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht beliebig genau messen. Das Produkt der jeweiligen Unschärfe ist immer größer als eine feste Größe – und das ist die Naturkonstante des Planckschen Wirkungsquantums h, welches die Anfänge der Quantenhistorie eingeleitet hat. Dies zeigt sich auch in der Grundgleichung des Heisenberg-Formalismus: Wenn X und P zwei Operatoren darstellen, dann würde in der Klassischen Physik $X P = P X$ gelten. In der Quantenmechanik gilt aber ein anderes Gesetz, nämlich

$$X P - P X = i \hbar$$

mit der imaginären Einheit i und ħ = h/2π. Mehr benötigt man nicht. Diese eine Gleichung aus dem Jahr 1926 ist die einzige nicht-klassische Zutat im Heisenberg-Formalismus[1]. Aus ihm folgen die von Niels Bohr zuvor heuristisch gefundenen Regeln für den Aufbau der Atom-Elektronenhüllen, und damit der gesamte Bereich der Chemie, sowie sämtliche quantenmechanischen Phänomene, von einzelnen Elementarteilchen bis zu kommerziell anwendbaren Konzepten wie Quantenkryptografie oder Quantencomputern. Es gibt bis zum heutigen Tag kein Experiment, *nicht ein einziges*, das irgendeine Abweichung zu dieser Grundgleichung gezeigt hat, zumindest was die nichtrelativistische Physik (Geschwindigkeiten weit unterhalb der Lichtgeschwindigkeit) betrifft. Was für ein unglaublicher und weitreichender Erfolg dieser Theorie!

Mathematisch gesehen sind die Formalismen von Schrödinger und Heisenberg äquivalent und auch aus praktischer Sicht sind sie sich ebenbürtig[2]. Das Heisenberg-Bild bildet aber eine viel bessere Grundlage für die *Interpretation* dieser Theorie. Als eigentliche Dynamik enthält es nur die lineare, deterministische und kontinuierliche Zeitentwicklung der Operatoren, für die es keinen ominösen „Kollaps" gibt. Wählt man einen anderen Messaufbau, ändert man auch die Startbedingungen und damit die Form der Wellenfunktion. Das gleiche gilt für den Fall, dass ein bestimmtes Messergebnis detektiert wurde, wodurch man neue Informationen über das System erhalten hat. Mathematisch gesehen ähnelt die dadurch notwendige Anpassung der Wellenfunktion dem Kollaps im Schrödinger-Bild, aber dieser Vorgang lässt sich als eine reine Justierung der erwarteten Wahrscheinlichkeiten an die neue Ausgangslage interpretieren statt einem echten physikalischen Prozess. Das ist genau die Schwäche des Schrödinger-Bildes, in der die Wellenfunktion eine dubiose Doppelrolle spielt: als Zustandsbeschreibung *und* dynamische Größe.

Ein Formalismus ist natürlich noch keine Interpretation. Er kann aber eine wichtige Grundlage für die erfolgreiche Deutung einer Theorie darstellen, das heißt für die Entwicklung eines physikalischen Modells. Die nächsten Abschnitte zeigen, wie das gelingen könnte.

Die Two-State Heisenberg Interpretation

Ein erfolgreiches retrokausales Modell der Quantenmechanik

Der Heisenberg-Formalismus hat einige grundlegende Vorteile für das Verständnis der Quantenmechanik, aber es gibt auch ein ganz konkretes Beispiel für sein Potential, eine bereits bestehende Interpretation zu verbessern: die *Two-State Heisenberg Interpretation* von Yakir Aharonov.

Im dritten Teil dieses Aufsatzes hatte ich Aharonovs Two-State Formalismus vorgestellt, der auf einer Verdopplung der physikalischen Zustände beruht, von denen sich die eine Hälfte in

---

[1] Die allgemeine Entwicklungsgleichung im Heisenberg-Bild für einen Operator A(t) und dem Hamilton-Operator H als Entsprechung der Energie ist die Beziehung $\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{\hbar}\,(H\,A - A\,H)$. Im Schrödinger-Bild sind die Operatoren konstant und die Wellenfunktion $\Psi(t)$ entwickelt sich nach der Gleichung $\frac{i}{\hbar}\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \mathrm{H}\,\Psi$.

[2] Bestimmte Anwendungen lassen sich allerdings nur im Heisenberg-Bild effizient rechnen. Neben diesen beiden gibt es noch zwei weitere Formalismen. Paul Dirac entwickelte das sogenannte „Wechselwirkungsbild", in dem sowohl die Wellenfunktion als auch die Operatoren zeitveränderlich sind, und das somit gewissermaßen zwischen dem Schrödinger- und Heisenberg-Bild steht. Von Richard Feynman stammt die „Pfadintegralmethode", die darauf beruht, bei der Bewegung eines Teilchens von A nach B sämtliche möglichen Wege zu berücksichtigen und geeignet aufzusummieren. Sie entspricht vom Grundsatz eher dem Heisenberg-Bild, ist aber allgemeiner als die anderen drei Formalismen und stellt das Standardverfahren für die Quantenfeldtheorie als speziellrelativistischer Erweiterung der Quantenmechanik dar.

Zukunfts- und die andere in Vergangenheitsrichtung entwickelt. Trotz dieses alltagsfremden Grundansatzes führt diese Theorie zu den gleichen Vorhersagen wie die orthodoxe Quantenmechanik. Mehr noch: die Beschäftigung mit diesen Modellen hat zu neuartigen experimentell nachprüfbaren Entdeckungen wie dem Aharonov – Bohm – Effekt geführt. Durch die Hinzunahme von finalen Randbedingungen ist diese Interpretation außerdem vollkommen deterministisch. Sie hat allerdings auch Schwächen – die von ihr als grundlegend angenommene Wellenfunktion lässt sich genauso schwer interpretieren und mit den Grundelementen im 3D-Raum zusammenbringen wie in anderen Ansätzen. Aharonov und seine Arbeitsgruppe favorisieren daher mittlerweile eine andere Richtung, die genau diese Schwäche umgeht: Die Verbindung des Two-State Formalismus mit dem Heisenberg-Bild. Was ergibt sich aus dieser Kombination?

Die Grundelemente unserer Welt sind nach dieser Interpretation die zeitveränderlichen deterministischen Operatoren aus dem Heisenberg-Bild. Die Wellenfunktion wird dagegen nur als eine mathematische Hilfsgröße gesehen, mit der man Mittelwerte von Teilchen-Ensembles berechnen kann. Anders als diese kann man diese Untergruppe der deterministischen Operatoren jederzeit messen, ohne sie dabei zu verändern, was ein starker Hinweis für ihre Fundamentalität ist. Einige von ihnen entsprechen klassischen Eigenschaften wie dem Ort eines Teilchens, aber es gibt auch ganz besondere Arten wie den „Modularen Impuls", die nur in quantenmechanischen – das heißt in mikroskopisch kleinen und von der Außenwelt isolierten – Systemen vorkommen. Dieser Modulare Impuls ist eine *nichtlokale* Eigenschaft, das heißt zwei Teilchen können sich über ihn augenblicklich beeinflussen, selbst wenn sie weit voneinander entfernt sind (in relativistischer Sprache: selbst wenn sie raumartig voneinander getrennt sind).

Das Doppelspalt-Experiment ist ein gutes Anwendungsbeispiel. Nach der Two-State Heisenberg Interpretation fliegt das Teilchen durch genau *einen* Spalt, so wie man es klassisch erwarten würde. Seine Bewegung wird aber über den Modularen Impuls von *beiden* Spalten beeinflusst, und der Formalismus ergibt genau das beobachtete Interferenzmuster, selbst wenn immer nur ein Teilchen gleichzeitig diese Versuchsanordnung durchläuft. Die ebenfalls im ersten Teil dieses Aufsatzes besprochene „Delayed Choice" Variante ist dank ihres zeitsymmetrischen Grundansatzes auch kein Problem für diese Interpretation.

Wer bei dieser Interpretation das Gefühl hat, nicht richtig verstanden zu haben, woraus ihre fundamentalen Elemente bestehen, die „Beables" in der Sprache von John Bell oder die „realen" Grundbausteine, ist in guter Gesellschaft. Was *bedeuten* diese Operatoren im Heisenberg-Bild, das heißt für welches Element unserer Welt stehen sie? Diese Frage kann erst in einem späteren Abschnitt geklärt werden. An dieser Stelle soll aber noch einmal klar gesagt werden, woraus die Welt aus Sicht der Aharonovschen Interpretation *nicht* besteht: aus einer im wörtlichen Sinne realen, das heißt als fundamental anzusehenden Wellenfunktion.

Zum Abschluss dieses Abschnitts noch eine schöne historische Note. Yakir Aharonov hatte die Gelegenheit, den über 60 Jahre alten Werner Heisenberg in seinem Institut zu besuchen, wo er ihm zeigte, welche direkte Bedeutung das Heisenberg-Bild aus Sicht des Two-State Formalismus für das Verständnis der quantenmechanischen Phänomene hat, speziell der Interferenzeffekte. Heisenberg war davon so beeindruckt, dass er laut seines Assistenten Hans-Peter Dürr von diesem Tag an jedem Besucher als allererstes zeigte, wie man die Interferenzmuster in dem von ihm geschaffenen Bild verstehen kann. *„That made him extremely happy."*

Die De Broglie – Bohm – Theorie ohne Wellenfunktion

Neue Perspektiven für ein Teilchenmodell der Quantenmechanik

Die de Broglie – Bohm – Theorie beruht neben der Annahme von Punktteilchen im 3D-Raum auf dem Schrödinger-Bild, welches die Wellenfunktion als zentrale dynamische Größe beinhaltet. Aber jetzt kommt die Überraschung: Es gibt nicht nur eine, sondern sogar zwei unterschiedliche Reformulierungen dieser Theorie, ebenfalls basierend auf Punktteilchen im 3D-Raum, in der die Wellenfunktion nur noch die Rolle einer abgeleiteten sekundären Größe spielt. Sie führen zu genau den gleichen experimentellen Vorhersagen wie die ursprüngliche Theorie. Ein weiterer Beleg dafür, dass die Bedeutung der bislang überschätzt wurde.

Schon 1927 wurde von dem deutschen Physiker Erwin Madelung ein Formalismus entwickelt, mathematisch äquivalent zur orthodoxen Quantenmechanik, der wegen seiner formalen Ähnlichkeit mit der Klassischen Strömungsmechanik „Hydrodynamische" Repräsentation genannt wird. Seine Bedeutung für die Interpretation dieser Theorie blieb lange Zeit vollkommen unbeachtet. Das hat sich erst in den beiden letzten Jahrzehnten geändert[3], denn er lässt sich mit der Grundannahme der de Broglie – Bohm – Theorie kombinieren, nämlich Punktteilchen im 3D-Raum, und das mit einem bemerkenswerten Ergebnis: Anders als die ursprüngliche Theorie wird die Bewegung der Teilchen nicht von der Wellenfunktion beeinflusst, sondern von Interaktionen der Teilchen untereinander. Die Wellenfunktion und deren zeitlicher Verlauf kann aus den konkreten Trajektorien der Teilchen abgeleitet werden, aber sie ist nur noch eine abgeleitete und damit sekundäre Größe, fundamental sind einzig die Teilchen. Zu welchen konkreten Deutungen der Quantenmechanik dieses Bild führt, ist noch umstritten und Gegenstand aktueller Arbeiten[4], aber der Ansatz macht deutlich, dass die Wellenfunktion selbst in dieser Art von Interpretationen keine zentrale Rolle spielen muss.

Die zweite wellenfunktionslose Variante der de Broglie – Bohm – Theorie hat vermutlich eine noch größere Bedeutung und wird von vielen Physikern als ihre überzeugendste Spielart angesehen, auch wenn sie ebenso viele Kritiker hat. Sie geht auf die Physiker Detlef Dürr, Sheldon Goldstein und Nino Zanghí zurück und hat folgenden Grundgedanken: Unsere Welt besteht aus Teilchen im 3D-Raum. Welche Konfigurationen dieser Teilchen erlaubt sind, und damit welche Bewegungen für jedes einzelne Teilchen, hängt letztendlich von den Konfigurationen *aller* anderen Teilchen ab. Diese werden von der sogenannten „universellen Wellenfunktion" festgelegt, die nicht weniger als die Grundstruktur unseres gesamten Universums beschreibt. Ihre konkrete Form kennen wir genauso wenig wie Gesetze über ihre zeitliche Entwicklung. Es gibt insbesondere keinen Grund, dass diese Funktion der Schrödinger-Gleichung gehorchen müsste. Die Autoren dieses Ansatzes konnten aber zeigen, dass sich die übliche Wellenfunktion der Schrödinger-Gleichung, von ihnen „effektive" Wellenfunktion genannt, aus dieser einen universellen Wellenfunktion ableiten lässt, da sie sich immer auf Subsysteme mit bestimmten Randbedingungen bezieht, insbesondere einer als unveränderlich angesehenen Umgebung des betrachteten Systems. Damit könnte man die quantenmechanische Wellenfunktion als lediglich sekundäre Hilfsgröße sehen, funda-

[3] Ein wichtiger Baustein dafür war die Übertragung dieses Formalismus in die Lagrange- statt der ursprünglichen Euler-Form durch Peter Holland in 2005, was unter dem Namen "Lagrangian Quantum Hydrodynamics" Formalismus läuft.

[4] Ein Beispiel ist die auf Basis dieses Formalismus entwickelte „Many Classical Interacting Worlds" Interpretation. Nach ihr gibt es viele miteinander interagierende "klassische" Welten aus punktförmigen Teilchen im 3D-Raum, in denen Quantenphänomene auf Interaktionen mit Teilchen aus anderen Welten resultieren. Anders als in der Viele-Welten-Interpretation lassen sich die Wahrscheinlichkeiten der vorhergesagten Messergebnisse dabei ganz normal über die Anzahl der davon betroffenen Welten rekonstruieren, die sich auch nicht laufend in weitere Unterwelten aufspalten müssen, sondern schon immer vorhanden wären.

mental ist nur die universelle Wellenfunktion. Tatsächlich, und jetzt kommt eine entscheidende Annahme in dieser Interpretation, könnte diese universelle Wellenfunktion trotz ihres kosmologischen Kontextes eine einfache und vielleicht sogar vollkommen zeitunveränderliche Form haben, was auch von manchen Quantengravitations-Ansätzen nahegelegt wird[5]. Wenn das der Fall ist, sollte man sie nach dieser Interpretation nicht als ein physikalisches Feld deuten, *sondern als Teil eines Naturgesetzes*. Genau das ist die „Nominale" de Broglie – Bohm – Theorie.

Als Grundbausteine unserer Welt enthält diese Interpretation *nur* die Teilchen im 3D-Raum, keine anderen Felder oder Kräfte, auch nicht die 3N-dimensionale Wellenfunktion. Die Frage, welche Kräfte oder kausale Einflussfaktoren auf die Teilchen einwirken, um sie auf die von uns beobachteten Bahnen zu zwingen, findet in dieser Interpretation nur die Antwort, dass es physikalische (noch nicht gänzlich erforschte) Naturgesetze auf Basis der universellen Wellenfunktion gibt, die alle erlaubten Teilchenkonfigurationen festlegen. Das geschieht in vollkommen deterministischer Weise – nur unsere Unkenntnis der anfänglichen Teilchenkonfigurationen führt zu den zufällig erscheinenden Messergebnissen und den quantenmechanischen Wahrscheinlichkeiten.

Damit vermeidet diese Variante sämtliche Probleme der ursprünglichen de Broglie – Bohm – Interpretation, die aus der angenommenen Realität der Wellenfunktion resultieren. Sie hat aber auch ihren Preis: ein gewisser Verlust der Erklärungskraft – auf fundamentaler Ebene kann man für Änderungen von Teilchenbewegungen keine kausalen Ursachen wie Kräfte oder (Quanten)potentiale mehr anführen – und die noch vollkommen unbewiesene Annahme, dass die universelle Wellenfunktion eine solch einfache Form hat, dass es nicht unplausibel ist, sie als Teil eines Naturgesetzes aufzufassen. Auch diese Interpretation zeigt aber, dass es *prinzipiell* möglich ist, auf die Schrödinger-Wellenfunktion als grundlegendes Element zu verzichten und trotzdem zu den exakt gleichen experimentellen Vorhersagen wie die orthodoxe Quantenmechanik zu kommen.

Die Frage, ob die de Broglie – Bohm – Theorie auf die Quantenfeldtheorie erweitert werden kann, ist noch offen. Dieses Unterfangen ist deutlich schwieriger als für andere Interpretationen und erfordert zusätzliche Annahmen, weshalb es an dieser Stelle nicht ausgebreitet werden soll. Neben dem Konfliktpotential zwischen den nichtlokalen Wirkungen von Änderungen der Wellenfunktion oder des Potentials auf die Teilchen spielt hierfür auch die Erzeugung und Vernichtung von Teilchen eine wichtige Rolle. Es gibt aber durchaus vielversprechende Ansätze hierfür, zum Beispiel von den Autoren der Nominalen Interpretation, und sie sind viel *konkreter* und damit physikalisch relevanter als alternative Sichtweisen, weil sie nicht der Frage ausweichen, welche grundlegenden Elemente unser dreidimensionaler Raum enthält. Ein möglicher Weg dorthin könnte auch von der im dritten Teil dieses Aufsatzes vorgestellten retrokausalen Variante aufgezeigt werden.

[5] Hierfür wird häufig die sogenannte „Wheeler – de Witt – Gleichung" angeführt, die aus einem bestimmten Ansatz zur Vereinheitlichung von Quantenmechanik und Allgemeiner Relativitätstheorie folgt und die einen vollkommen statischen (zeitlosen) Zustand unseres Universums nahelegt.

Die Wellenfunktion ist nicht real

Die Wellenfunktion als Hilfsgröße, die unser Wissen beschreibt

Der erste Abschnitt, aber auch die beiden darauffolgenden, haben gute Gründe für die folgende Annahme geliefert:

> *Die Quantenmechanik legt uns als fundamentale Grundgröße nicht die Wellenfunktion, sondern die Operatoren im Heisenberg-Bild nahe.*

Das ist ein enorm wichtiges Zwischenfazit. Die Frage nach der physikalischen Bedeutung der Wellenfunktion, diesem abstrakten Gebilde im 3N-dimensionalen Raum, an der sich fast alle Interpretationen die Zähne ausgebissen haben, auch wegen dem ominösen messbedingten Kollaps, hat somit eine überraschend einfache Antwort gefunden: Die Wellenfunktion ist gar keine fundamentale Größe und hat für sich genommen keine physikalische Bedeutung. Man könnte auch sagen:

> *Die Wellenfunktion ist nicht real,*
> *sie beschreibt nur unser Wissen über die Messergebnisse.*

Sie stellt zweifelsfrei ein hilfreiches mathematisches Werkzeug dar, um Mittelwerte von Ensembles gleichartig präparierter Systeme berechnen zu können, aber sie ist nicht mehr als das – eine abgeleitete sekundäre Größe, die lediglich unser Wissen über die zu erwartenden Wahrscheinlichkeiten für solche Ensembles beschreibt. Für ein einzelnes System hat sie keine grundlegende Bedeutung

Eigentlich wollte ich in diesem vierten Teil nicht auf anderslautende Thesen eingehen, aber diese Aussage ist so zentral und umstritten, dass einige zusätzliche Anmerkungen angebracht sind. Sie wird von vielen Forschern geteilt, von vielen anderen aber vehement bestritten. Der bekannteste Ansatz mit einer realen Wellenfunktion ist die Viele-Welten-Interpretation, deren Grundzüge – aber auch deren Schwächen – im zweiten Teil dieses Aufsatzes besprochen wurden. Ohne zu sehr ins Detail zu gehen[6], möchte ich hier einige zusätzliche Anmerkungen zur Unterstützung der These aufführen, dass die Wellenfunktion nicht real ist:

- Ich hoffe, dass die drei vorigen Abschnitte bereits einige starke Argumente für diese These deutlich gemacht haben, insbesondere die Überlegenheit des Heisenberg- Bildes gegenüber dem Schrödinger-Bild. Die nächsten Abschnitte werden diese Schlussfolgerung sogar noch bekräftigen.

---

[6] Hier noch zwei zusätzliche Argumente für Kenner dieser Themen:

Einige Autoren sehen die sogenannten "Protective Measurements", mit denen man die Form der Wellenfunktion selbst für Einzelsysteme vermessen kann, als direkten Hinweis auf deren Existenz. Die Tatsache, dass in der Quantenmechanik die statistische Verteilung von Messergebnissen anders als in der Klassischen Mechanik schon in jedem Einzelsystem manifestiert ist, stellt aber eine Herausforderung für beide Lager dar – mit oder ohne reale Wellenfunktion. Außerdem kann man Protective Measurements nur dann als störungsfreie Messmethode interpretieren, wenn man die Realität der Wellenfunktion bereits voraussetzt, und es gibt konkrete Modelle, die die experimentellen Ergebnisse auch ohne Wellenfunktion nachbilden können.

Als ein anderes Gegenargument wird häufig das nach seinen Entdeckern benannte „Pusey-Barrett-Rudolph Theorem" von 2011 angeführt, welches eine (durchaus überraschende) Einschränkung für die Interpretation der Wellenfunktionen als epistemische und damit rein statistische Größe aufgezeigt hat. Es beweist: Unter der Annahme, dass unabhängig voneinander präparierte Zustände physikalisch unabhängige Zustände haben, können zwei Systeme mit unter-schiedlichen Wellenfunktionen nicht den gleichen physikalischen Zustand haben (was bei der epistemischen Deutung der Wellenfunktion möglich wäre), ohne der Quantenmechanik zu widersprechen. Diese Erkenntnis hat in der Tat eine sehr große Bedeutung, die der des Bellschen Theorems kaum nachsteht. Wie der nächste Abschnitt zeigt, ist aber in der Relationalen Interpretation der Quantenmechanik – und das gleiche gilt für retrokausale Modelle – einer seiner Grundannahmen nicht erfüllt, was die Schlussfolgerung hinfällig macht. Der Spieß lässt sich daher umdrehen: Aufgrund der überwältigen Hinweise, dass die Wellenfunktion nur eine epistemische Bedeutung hat, ist das Pusey-Barrett-Rudolph Theorem eine der wichtigsten Belege dafür, dass die Grundstruktur unserer Welt entweder relational oder retrokausal (oder beides) ist.

- Trotz der fast 100-jährigen Deutungsdebatte hat sich *keine* Interpretation basierend auf einer realen Wellenfunktion als erfolgreich erwiesen – zumindest nicht in dem Sinne, dass sie die Mehrheit der Physikergemeinde überzeugt hätte.
- Ein als „Qubit" bekanntes quantenmechanisches Zweizustands-System, Grundlage jedes Quantencomputers, hat nur zwei von außen unterscheidbare Zustände. Basierend auf der Wellenfunktion müsste es aus kontinuierlichen Zuständen und damit einer unendlich großen Informationsmenge bestehen, was einer wenig überzeugenden verschwenderischen Vielfalt von unbeobachtbaren Grundelementen gleichkommt.

Diese Wissens-Interpretation der Wellenfunktion ermöglicht auch eine erstaunlich einfache Rekonstruktion von vielen – wenn auch nicht allen – quantenmechanischen Phänomenen basierend auf vollkommen klassischen Modellen, die lediglich eine bestimmte Einschränkung unseres Wissens beinhalten. Das bekannteste Modell stammt von dem kanadischen Physiker Robert Spekkens aus dem Jahr 2004. Es enthält die Annahme, dass uns nur genau die Hälfte der Informationsmenge über die fundamentalen Zustände eines Systems zur Verfügung steht. Es ist erstaunlich, welche Phänomene sich hieraus ohne jegliche Theorie der Quantenmechanik ableiten lassen, also ohne Schrödinger- oder Heisenberg-Gleichung und ohne reale Wellenfunktion: Prinzipielle Messungenauigkeit und Nichtvertauschbarkeit der Reihenfolge von bestimmten Messungen (analog zu Heisenbergs Unschärferelation), Kollaps der Wellenfunktion, der „No Cloning" Effekt (elementare Zustände lassen sich übertragen, aber nicht unverändert kopieren) und sogar Verschränkungs- und Interferenzeffekte. Eine wahrlich erstaunliche und sehr weitreichende Erkenntnis, die eine Flut ähnlicher Arbeiten ausgelöst hat.

Interessant ist aber auch, was diese Modelle *nicht* rekonstruieren können, und was daher als der eigentliche nichtklassische Kern der Quantenmechanik angesehen werden kann: Nichtlokalität, Stichwort Bellsches Theorem, und die unauflösbare Verbindung von Messergebnissen mit der Art und Weise, wie sie zustande gekommen sind. Dieser zweite Aspekt läuft unter dem Begriff „Kontextualität" und wird in den folgenden Ausführungen noch genauer beleuchtet.

Natürlich hat sich die Interpretationsfrage durch diese These erst einmal nur verschoben – weg von der Wellenfunktion und hin zu den Operatoren im Heisenberg-Bild, die man wie schon erwähnt nicht direkt mit Teilchen, Wellen oder ihren Eigenschaften gleichsetzen kann. Welche *Bedeutung* haben diese Operatoren, das heißt welche physikalische Interpretation haben sie? Was sind die elementaren – die *realen* – Grundgrößen der quantenmechanischen Welt, wenn es nicht die Wellenfunktion ist? Wenn die Wellenfunktion nur unser Wissen widerspiegelt, was ist dann der *Inhalt* dieses Wissens – kurz: *Wissen worüber?*

Diese Frage können die bisher besprochenen Interpretationen nicht von sich aus beantworten, und noch weniger der reine mathematische Formalismus. Aber es gibt eine Antwort. Vorhang auf für den wohl wichtigsten Baustein für ein grundlegendes Verständnis der Quantenmechanik.

Die Relationale Interpretation der Quantenmechanik (RQM)

Ich möchte nun die sogenannte "Relationale Interpretation" der Quantenmechanik vorstellen, abgekürzt RQM. Sie geht auf den italienischen Physiker Carlo Rovelli zurück und stammt aus dem Jahr 1996. Wie schon erwähnt ist er mittlerweile auch als Buchautor einer breiten Leserschaft bekannt – nicht nur, aber auch zum Thema Quantenmechanik.

Abb. 2: Carlo Rovelli

Schon jetzt möchte ich dieser Interpretation eine Warnung vorneweg schicken: ihr Grundprinzip klingt auf den ersten Blick nicht unplausibel, aber auch irgendwie harmlos und zu zahnlos, um die vielfältigen Probleme der quantenmechanischen Deutungsdebatte lösen zu können, die noch immer erbittert geführt wird. Beides ist nicht der Fall. Wenn man sich ihre Konsequenzen vor Augen führt, wird zum einen klar, dass diese Interpretation tatsächlich ein absolutes Grundproblem dieser Debatte löst Es wird sich aber auch zeigen, dass sie uns weit von unserem klassischen Naturverständnis wegführt. Rovellis Ansatz ist in gewisser Weise noch radikaler als die bislang vorgestellten Interpretationsversuche, was angesichts ihrer unanschaulichen – teilweise geradezu bizarren – Eigenheiten kaum möglich erscheint.

Das Grundkonzept der RQM – die Quantenmechanik ist relational

Die RQM ist zunächst einmal eine realistische Interpretation[7]. Sie geht von dem Grundgedanken aus, dass unsere Welt aus einer Vielzahl von miteinander interagierenden Systemen besteht, und damit einer Vielzahl von Bezugssystemen, die aus fundamentaler Sicht vollkommen gleichberechtigt sind. Es gibt also kein ausgezeichnetes Bezugssystem, das von sich in Anspruch nehmen kann, die einzig „richtige" Perspektive auf unsere Welt zu liefern. Dieser Grundsatz ist ein expliziter Bestandteil der Relativitätstheorie, aber er wird von den meisten Physikern auch für die Physik generell und damit auch für die Quantenmechanik als sinnvoller Startpunkt angesehen.

Basierend auf dieser Grundlage kommen wir jetzt zur Kernthese der RQM. Sie lässt sich in einem einzigen Satz zusammenfassen, der zunächst einmal etwas unkonkret und kryptisch klingt:

> *Unsere Welt besteht ausschließlich aus quantenartigen diskreten Ereignissen, die bezüglich eines bestimmten Systems geschehen.*

Diese Ereignisse werden von Rovelli auch „Quantenereignisse" (quantum events) genannt, ein noch besserer Begriff wäre vielleicht „Quanteninteraktion", um ihren relativen Charakter zu betonen. Statt System verwendet er oft den Begriff „Beobachter" (observer), aber nicht ohne zu betonen, dass ausnahmslos jedes System einen „Beobachter" für solche Quantenereignisse darstellen kann, auch mikroskopische Systeme wie Elementarteilchen. Anders als in anderen Interpretationen benötigt man hierfür kein (wie auch immer definiertes) „makroskopisches"

[7] Mit „realistisch" ist gemeint, dass die Interpretation versucht, etwas über unsere Welt auszusagen statt nur über subjektive Ansichten wie im QBism oder bei der instrumentalistischen Auffassung der Physik.

System oder gar ein menschliches Bewusstsein. Beispiele für Quantenereignisse sind Messergebnisse unserer Apparaturen bezogen auf das jeweilige Messsystem, aber auch mikroskopische Eigenschaften, zum Beispiel die aus einer Interaktion resultierende Position eines Teilchens aus Sicht des damit wechselwirkenden Teilchens oder sein Spin-Zustand. Rovelli sieht hierfür zwei gleichberechtigte Betrachtungsweisen:

- Man kann diese Quantenereignisse als Eigenschaften von fundamentalen Objekten ansehen, zum Beispiel von Elementarteilchen wie Photonen oder Elektronen. Dabei muss man aber berücksichtigen, dass diese Eigenschaften nur relativ zum jeweiligen vermessenden System definiert sind, es sind also keine „klassischen" Objektmerkmale, die man einem Teilchen ohne Angabe des Kontextes zuordnen kann.
- Eine im Alltag und auch in der Physik ungewöhnliche – aber vielleicht sogar angemessenere – Sichtweise besteht darin, diese Eigenschafts-Ereignisse als fundamental anzusehen. Die Elementarteilchen wären dann abgeleitete sekundäre Größen, das heißt nur noch nützliche Begriffe für ein Bündel oder Netzwerk solcher Eigenschaften.

Das „quantenartig" enthält die Annahme, dass die fundamentale Ebene der Natur durch die Quantenmechanik beschrieben wird, die sich natürlich noch als Sonderfall einer noch allgemeineren Quantengravitations-Theorie erweisen kann. In der Relationalen Interpretation werden für diese Aufgabe keine „Versteckten Variablen" oder dynamische Korrekturen benötigt, also weder zusätzliche Elemente wie die Teilchenpositionen der de Broglie – Bohm – Theorie noch bislang unentdeckte Abweichungen ihrer Entwicklungsgleichungen, wie die Kollaps-Theorien mutmaßen. Es gibt auch keinen grundsätzlichen Unterschied zwischen Mikro- und Makrosystemen, was ein großer Schwachpunkt der Kopenhagener Interpretation war. Die Theorie der Quantenmechanik liefert in der RQM eine selbstkonsistente und vollständige Beschreibung der physikalischen Welt.

Der von der RQM behauptete *diskrete* Charakter der Quantenereignisse wird zwar nicht von allen Interpretationen geteilt, hat aber natürlich schon eine lange Tradition in der Deutungsdebatte. Dieser Aspekt hat eine zentrale Bedeutung für das Verständnis der mikroskopischen Welt, was in einem späteren Abschnitt genauer ausgeführt wird. Zunächst soll aber das eigentlich revolutionäre des RQM Ansatzes herausgestellt werden.

Erinnern Sie sich noch an meine Warnung? Bislang mag die RQM relativ unspektakulär erscheinen – dass die Welt aus miteinander agierenden Systemen besteht und die Quantenmechanik bei ihrer Beschreibung eine wichtige Rolle spielt und vermutlich eine diskrete Grundlage hat, ist keine große Neuigkeit. Die Radikalität dieses Ansatzes zeigt sich erst, wenn man die oben angeführte Kernthese wirklich ernst nimmt. Die Textphrase „bezüglich eines bestimmten Systems" bedeutet, dass die grundlegenden Elemente unserer Welt, die Quantenereignisse, rein *relative* Größen sind, was genau den Namen der „Relationalen Interpretation" begründet. Die Begriffe „relational" und „relativ" sind dabei (auch laut Carlo Rovelli) austauschbar, sie meinen das gleiche. Die RQM behauptet, und das ist ihr eigentlicher Kern, dass die Welt *ausschließlich* aus diesen relativen Ereignissen besteht. Das von einem System A bei der Interaktion mit einem System B erfahrene Ergebnis X gilt nur für dieses System A selbst und hat keine Bedeutung für andere Systeme, die nicht Teil dieser Interaktion waren. Ihre Interaktion mit System B könnte auch zu einem anderen Ergebnis Y führen, ohne zu einem logischen Widerspruch zu führen. Führt man diesen Gedanken konsequent zu Ende, ergibt sich daraus die folgende Schlussfolgerung:

Die Welt besteht nur aus relativen Ereignissen (Interaktionen),
sie hat keinen objektiven Gesamtzustand.

Diese Aussage klingt schon deutlich weniger harmlos. Wie die meisten Physiker und Nicht-Physiker bin ich davon überzeugt, dass es eine Welt „dort draußen" gibt, die unabhängig von den Gedanken und Wünschen von uns Menschen ist, und sich nicht nur in meinem eigenen Kopf abspielt. Diese Welt besteht aus wie auch immer gearteten Entitäten, also „Dingen", die für einen bestimmten Zeitpunkt bestimmte Eigenschaften haben, ob wir sie nun kennen oder nicht. Daher müssen diese Entitäten doch einen bestimmten *Zustand* haben, einen objektiven Ausdruck ihrer Beschaffenheit, und damit auch die Welt selbst? Nicht nach der RQM. Es gibt nach dieser Interpretation ausschließlich relative Beziehungen zwischen Systemen und die Welt besteht aus einem Netzwerk von unzähligen solcher relativen Quantenereignisse. Jedes Interaktionsergebnis, und damit letztendlich jede physikalische Aussage, jeder *Fakt*, gilt immer nur bezüglich eines bestimmten Systems. Auf grundlegender Ebene sind *sämtliche Fakten relativ*. Die Frage nach einem objektiven Gesamtzustand unserer Welt macht in der RQM überhaupt keinen Sinn, weil sie sich implizit auf alle Beobachter bezieht, verbunden mit der stillschweigenden Annahme, dass sich die Quantenereignisse für alle diese Beobachter in gleicher Form zeigen. Es gibt aus Sicht der RQM keinen guten Grund, an dieser Annahme festzuhalten. Tatsächlich erscheint sie auch aus genereller physikalischer Sicht unplausibel, und wie später noch deutlich werden wird, ist sie gar nicht notwendig, um im Gesamtkontext der Quantenmechanik eine objektive Naturbeschreibung zu ermöglichen[8].

Eigentlich sollte uns die Aussage, auf grundlegender Ebene auf relative statt absolute Größen zu stoßen, nicht übermäßig verwundern. Wir kennen alle die Eigenschaft der Geschwindigkeit von Objekten, die man immer relativ zu einem anderen Objekt misst. Häufig hat man einen festen Bezugspunkt wie die Erde im Hinterkopf, so dass man diese Relativität leicht übersehen kann, aber das ändert nichts daran, dass die Geschwindigkeit eines Objekts bezüglich des Erdmittelpunktes einen andere Wert hat als in Relation zur Sonne oder zum Zentrum der Milchstraße. Auch viele anderen Eigenschaften wie über/unter, größer/kleiner, älter/jünger usw. haben nur eine relative Bedeutung. Die Radikalität der RQM Ansatzes besteht „nur" in der Annahme, dass *alle* fundamentalen Grundgrößen diesen relationalen Charakter haben. Nur mit dieser konsequenten Auslegung gelingt es der RQM, die Deutungsprobleme der Quantenmechanik zu lösen.

Mit der Gleichberechtigung aller Bezugssysteme teilt sich die RQM zudem einen wichtigen Grundsatz mit Einsteins Relativitätstheorie. Die Relativität von Zeit und Raum, in Kombination mit einigen festen Größen wie der Lichtgeschwindigkeits-Konstante und der Gleichsetzung von schwerer und träger Masse, ist der Schlüssel dieser Theorie, in der sogar der Begriff der Gleichzeitigkeit seinen absoluten Charakter verloren hat. Wir werden später sehen, dass sich die Relativitätstheorie und die RQM auch in der *Art* ihrer Naturbeschreibung ähneln – sie beruhen auf bestimmten Prinzipien statt auf explizit konstruierten Bewegungsabläufen.

[8] Das ist auch der Grund für die problemlose Vereinbarkeit mit dem in einer früheren Fußnote angesprochenen Pusey-Barrett-Rudolph Theorem: Ohne Annahme eines objektiven Gesamtzustandes lässt sich sein Ergebnis, etwas vereinfacht formuliert die Identifizierung von physikalischen Zuständen mit der Form der Wellenfunktion, nicht mehr ableiten.

Von relativen zu stabilen Fakten – die Entstehung der klassischen Welt

Ist die RQM damit zu subjektiv? Wenn alle Fakten nur bezüglich des Systems gelten, in dem sie aufgenommen wurden, und die Existenz eines objektiven Gesamtzustandes bestritten wird, scheint von einer objektiven Naturbeschreibung nicht viel übrig zu bleiben. Der Erfolg der Physik besteht gerade darin, intersubjektive Erkenntnisse zu gewinnen, statt jegliche subjektive Meinung unkritisch gelten zu lassen. Muss man diese Grundhaltung für die RQM aufgeben? Ist *jede* getroffene Aussage korrekt, weil sie nur eine relative Gültigkeit hat?

Tatsächlich trifft das bei der RQM nicht zu, alles andere wäre für eine wissenschaftliche Theorie auch nicht akzeptabel. Wenn man zwei Systeme A und B betrachtet, gelten zunächst einmal alle Quantenereignisse tatsächlich nur für das jeweilige System, welches diese aufgenommen hat. Wenn man diese Ergebnisse aber nun *vergleicht*, das heißt die beiden Systeme in einem dritten System C zusammenbringt, ist das Gesamtergebnis alles andere als beliebig: es muss (wie schon die Resultate für die einzelnen Systeme) den objektiven Gesetzen der Quantenmechanik entsprechen[9]. Führt man diesen Vorgang weiter bis zu makroskopischen Systemen, die in jedem Labormessaufbau benötigt werden und eine millionenfache Vielzahl von Interaktionen und Systemen hinzufügen (zum Beispiel Atome und Lichtteilchen), entstehen in der Sprache von Rovelli „stabile Fakten" aus den fundamentalen „relativen Fakten". Die physikalische Grundlage hierfür ist der Prozess der *Dekohärenz*, der im zweiten Teil dieses Aufsatzes erläutert wurde und der einen rein quantenmechanischen kollapsfreien Vorgang darstellt[10]. Stabile Fakten sind keine grundlegenden Elemente, man könnte sie als sekundäre „emergente" Aussagen bezeichnen, aber sie haben dank der Gesetze der Quantenmechanik eine Form, die von *allen* Beobachtern eines physikalischen Experiments geteilt wird. Die Ergebnisse solcher wissenschaftlichen Untersuchungen behalten daher in der RQM ihren objektiven Charakter, genauso wie die direkt sicht- und anwendbaren Phänomene der Quantenmechanik.

Aus den grundlegenden relativen Fakten werden die für uns sichtbaren stabilen Fakten unserer Alltagswelt, das ist aus Sicht der RQM die Entstehung der „klassischen" Welt aus der Quantenmechanik. Viele Interpretationen scheitern an der Aufgabe, diesen Übergang plausibel zu machen. So spekulieren die Kollaps-Theorien über komplexe Zusatzterme in den quantenmechanischen Entwicklungsgleichungen, die einen spontanen Kollaps der Wellenfunktion bewirken sollen, aber niemals nachgewiesen wurden, und die Kopenhagener Interpretation macht die angebliche Unlösbarkeit dieses Problems zum Programm und streitet die Existenz der „mikroskopischen" Welt einfach ab, wofür sie nicht einmal ein konkretes Unterscheidungskriterium angibt. Die RQM meistert diese Aufgabe problemlos auf Grundlage des unveränderten Heisenberg-Formalismus der Quantenmechanik.

Auch in diesem Formalismus taucht die 3N-dimensionale Wellenfunktion auf. Der nächste Abschnitt zeigt, wie man diese Größe aus Sicht der RQM verstehen kann.

---

[9] Dabei darf man nicht den Fehler einiger Kritiker der RQM machen, auf einen „klassischen" Vergleich zurückzufallen, das heißt im System C jedes eingehende Einzelergebnis als klassisches Ja/Nein Ergebnis zu betrachten. Die RQM liefert nur dann ein konsistentes Gesamtbild, wenn man jeden dieser Vergleiche nach den Gesetzen der Quantenmechanik durchführt.

[10] Wie im zweiten Teil dieses Aufsatzes erläutert kann der Dekohärenz-Prozess nicht den Kollaps der Wellenfunktion begründen, aber das ist im RQM Ansatz auch gar nicht notwendig. Auch dieser Vorgang hat eine relative, das heißt perspektivische Natur, denn das Ergebnis hängt davon ab, wie das dritte System mit den beiden anderen Systemen interagiert, und damit letztendlich welches Messziel der gewählte Laboraufbau hat. *Bezüglich dieses Kontextes* ergibt sich ein Ergebnis, das von allen Beteiligten und Nachahmern gleich erlebt wird – aus fundamentaler Sicht nicht hundertprozentig deckungsgleich, aber auf makroskopischer Skala dank der fast verschwundenen Interferenzterme ununterscheidbar ähnlich.

Relatives Wissen – die Quantenmechanik ist kollapsfrei

Die quantenmechanische Wellenfunktion beschreibt trotz ihrer zentralen Rolle in der Schrödinger-Gleichung lediglich unser *Wissen* über vergangene und mögliche zukünftige Messergebnisse. Dieser nicht unumstrittene Schluss wird von einer ganzen Reihe von Hinweisen nahegelegt, die im Abschnitt über die Realität der Wellenfunktion erläutert wurden. Aus Sicht der RQM kann die typische Auffassung der Wellenfunktion als Zustandsbeschreibung eines Systems vor seiner Messung schon deshalb nicht stimmen, weil es einen solchen (nicht System-relativen) Zustand überhaupt nicht gibt. Sie ist in dieser Interpretation keine fundamentale Grundgröße, hat aber trotzdem eine konkrete Bedeutung:

> *Die Wellenfunktion beschreibt unser Wissen über die zukünftigen relationalen Quantenereignisse eines bestimmten Systems aus unserer eigenen Sicht, ausgedrückt in Wahrscheinlichkeiten.*

Nach der Beobachtung solcher Ereignisse hat sich unser Wissen natürlich verändert. Das lässt sich gut in dem Szenario des Bellschen Theorems erklären, in dem ein überlagertes Teilchenpaar mit gegensätzlichen Eigenschaften A und B erzeugt und später an weit voneinander entfernten Orten vermessen wird. Wenn wir dabei an einem Teilchen die Eigenschaft A messen, *wissen* wir in diesem Moment augenblicklich, dass eine Messung des anderen Teilchens nach den Gesetzen der Quantenmechanik Eigenschaft B ergeben würde, egal wie weit es mittlerweile vom anderen Teilchen entfernt ist, und ob die Messung in der Vergangenheit lag oder erst in der Zukunft stattfinden wird. Wir würden dann die Wellenfunktion an unser neues Wissen anpassen. Das entspricht mathematisch gesehen dem „Kollaps" der Wellenfunktion, aber daran wäre überhaupt nichts Geheimnisvolles. Wenn die Königin von England stirbt, wird Prinz Charles *augenblicklich* zum neuen Oberhaupt, selbst wenn er sich in diesem Moment in einem anderen Sternensystem befindet. Nur wenn man die Wellenfunktion als reale Entität interpretiert, wäre man zu einer Erklärung gezwungen. Für die RQM stellt sich dieses Problem überhaupt nicht, es wird als reines Scheinproblem entlarvt.

Auf fundamentaler Ebene gibt es somit keinen plötzlichen irreversiblen Kollaps. Die zeitlich symmetrische und lineare Zeitentwicklung der Operatoren im Heisenberg-Bild ist für die RQM vollkommen ausreichend.

Quantenphänomene aus RQM Sicht – die Quantenmechanik ist kontextuell

Die bisherigen Ausführungen zur Relationalen Interpretation der Quantenmechanik (RQM) waren sehr allgemein und abstrakt. Welche konkrete Hilfe kann dieser Ansatz für die Erklärung der quantenmechanischen Phänomene leisten?

Als erstes Beispiel soll ein bekanntes Gedankenexperiment dienen – Schrödingers Katze. Nach den Gesetzen der Quantenmechanik bleiben Überlagerungen (Superpositionen) erhalten, solange das System von der Umgebung isoliert bleibt, also insbesondere keine Messung mit einem makroskopischen Gerät durchgeführt wird. Aus Sicht der Katze ist das nicht erfüllt, sie würde die Freisetzung des Giftes zweifelsfrei erfahren, oder aber sich weiterhin bester Gesundheit erfreuen. Aus dieser Perspektive ist sie somit, und dem stimmt die RQM zu, entweder lebendig oder tot, so wie es uns auch unser gesunder Menschenverstand suggeriert. Aber wie ist ihr Zustand aus der Laborsicht außerhalb des verschlossenen Kastens, bevor man hineingeschaut hat? Nach der RQM sagt die Quanten-mechanik hierfür nicht einen ominösen lebendig-toten Mischzustand voraus, der auch

Schrödinger selbst unsinnig erschien, sondern entlarvt diese Frage als eine Scheinfrage – ohne Interaktion hat dieser Kasten und damit die darin eingeschlossene Katze gar keinen physikalisch definierten Zustand für den außenstehenden Beobachter! *Aus Sicht der Katze* – und wir erinnern uns, dass man für diese Überlegungen jedes System als Bezugspunkt nehmen kann, es geht also keinesfalls um ein tierisches Erkennungsvermögen – ist es ein feststehender Fakt, ob das Gift freigesetzt wurde oder nicht, aber das heißt nach der RQM nicht, dass dieser Fakt auch bezüglich anderer Bezugssysteme gilt.

Eine ähnliche Antwort folgt für den Welle-Teilchen-Dualismus, wie er sich im Doppelspalt-Experiment mit Elektronen zeigt. Der Messkontext, in dem das Elektron direkt hinter dem einen oder anderen Spalt detektiert wird, führt zu einem teilchenartigen Ergebnis, nämlich der Position des Elektrons. Im Kontext der statistischen Verteilung der Auftreffpunkte auf dem Schirm hinter dem Doppelspalt zeigt sich dagegen mit den Interferenzeffekten ein Ergebnis, das man in der Klassischen Physik von Wellen kennt. Welche Eigenschaft hat das Elektron *vor* der Auswahl der Messmethode, das heißt vor der Interaktion mit dem Messgerät? Ist es „in Wirklichkeit" ein Teilchen oder eine Welle? Nach der RQM ist das eine unsinnige Frage. Unsere Welt besteht *ausschließlich* aus relativen Quantenereignissen, es ist daher überhaupt kein Widerspruch, dass sich das Elektron je nach Interaktionsart anders zeigt. Selbst die Delayed Choice Variante passt in dieses Bild, denn ihre scheinbare Unerklärlichkeit leitet sich von der Annahme ab, dass das Elektron schon vor seiner Messung einen bestimmten Zustand gehabt haben muss, in dem Fall auf welchem Punkt auf dem Schirm es aufgetroffen ist.

Schaut man sich diese Beispiele an, zeigt sich der Kern des RQM Ansatzes: Er führt *Kontextualität* als Grundprinzip ein. Dieser etwas sperrige Begriff, ein Synonym wäre „Bezugssystemabhängigkeit", beschreibt den Umstand, dass man konkrete Messergebnisse nicht von der Art und Weise trennen kann, durch die sie zustande gekommen sind. Schon ihre *Definition* hängt von diesem Bezugsrahmen ab. Eine Analogie wäre zum Beispiel der Begriff „lebenswerte Umweltbedingungen": ohne Angabe, *welches* Leben gemeint ist – ob Menschen, Schwefelbakterien oder andere Lebewesen – lässt er sich nicht ausfüllen.

Es ist diese Kontextbezogenheit, die Abhängigkeit zwischen fundamentalen Grundgrößen und der Art ihrer Vermessung, die im Mittelpunkt der mysteriösen Eigenschaften der Mikrowelt steht. Andere Interpretationen versuchen, diesen Aspekt aus anderen Grundannahmen herzuleiten, aber keine von ihnen ist mit diesem Versuch erfolgreich. In Form der relativen Fakten und der ausschließlichen Existenz relativer Quantenereignisse ist die RQM schon vom Ansatz her kontextuell, sie kann daher auf solche Ableitungsversuche verzichten[11].

Kontextualität ist somit ein wesentlicher Bestandteil der mikroskopischen Welt. Es gibt aber noch einen weiteren zentralen und aus Sicht der klassischen Physik unverständlichen Aspekt der quantenmechanischen Phänomene: Nichtlokalität.

[11] Natürlich kann man diese Eigenschaft anzweifeln oder nach einer Begründung fragen, *warum* unsere Welt auf fundamentaler Ebene kontextuell sein sollte. Jeder Interpretationsversuch benötigt aber bestimmte Grundannahmen, die dann (mal mehr und mal weniger erfolgreich) zu einem konsistenten und zu den experimentellen Ergebnissen passenden Gesamtbild geführt werden. Bei der Beurteilung einer Interpretation sollte man daher immer dieses Gesamtbild vor Augen haben.

Bell trifft Rovelli und Heisenberg – die Quantenmechanik ist raumzeitlos

Die von Einstein so benannten „spukhaften Fernwirkungen" waren schon häufig ein Thema in diesem Aufsatz. Für ein überlagertes Teilchenpaar mit gegensätzlichen Eigenschaften A und B sagt die Quantenmechanik voraus, dass sich das Messergebnis an jedem Teilchen erst im Rahmen der Messung manifestiert und nicht schon davor vorliegen kann. Ansonsten könnte man die Interferenzeffekte nicht erklären, wenn man die Teilchen wieder für ein Interferenzexperiment zusammenbringen würde. Um zu einem konsistenten Gesamtzustand zu kommen, müsste damit eine Messung mit dem Ergebnis A *augenblicklich* den Zustand des anderen Teilchens von unbestimmt in B verwandeln, egal wie weit es sich mittlerweile entfernt hat. So spiegelt es auch die Mathematik dieser Theorie in Form der Wellenfunktion wider. Das Bellsche Theorem und seine experimentelle Überprüfung haben zudem gezeigt, dass dieses Ergebnis von *keiner* Theorie reproduziert werden kann, die auf lokalen (raumzeitlich begrenzten) Grundelementen beruht, von Bell „Beables" genannt, ohne dabei die Grundprinzipien der Relativitätstheorie zu verletzen, insbesondere die Gleichberechtigung aller Bezugssysteme. Kann die RQM diesen Konflikt auflösen?

Tatsächlich stellt sich dieses Problem für die RQM überhaupt nicht. Die Messung am ersten Teilchen bezügliches eines Systems X hat zunächst einmal gar keinen Einfluss auf das zweite Teilchen, mit dem es ja auch gar nicht interagiert hat. Laut der RQM gibt es keinen objektiven Gesamtzustand, die Frage nach dem „echten" Zustand des zweiten Teilchens macht daher auch nach der Vermessung des ersten Teilchens überhaupt keinen Sinn. Wird das zweite Teilchen von einem System Y vermessen, stellt sich ein bestimmtes Ergebnis ein, das aber nur bezüglich Y gilt, nicht bezüglich X, und somit nicht im Widerspruch zum ersten Messergebnis stehen kann. Erst wenn man die beiden Teilchen zusammenbringt, was über normale Wege ohne Verletzung der Relativitätstheorie geschieht, kann man bezüglich eines Systems Z die Ergebnisse miteinander vergleichen – und da nach Voraussetzung der RQM die experimentell bestätigten Gesetze der Quantenmechanik gelten, wird man bezüglich System Z immer gegensätzliche Eigenschaften A und B vorfinden. In Rovellis Worten:

"Entanglement is not a dance for two partners, it is a dance for three."

Aus einem anderen Blickwinkel betrachtet ist es die von der RQM ermöglichte Interpretation der Wellenfunktion als unser *Wissen* über mögliche Messergebnisse, statt als real vorhandenes kausal wirksames physikalisches Feld, welche die Auflösung des Konfliktes mit der Relativitätstheorie ermöglicht. Nach Detektion von Eigenschaft A am ersten Teilchen weiß man, dass bei dieser Ausgangskonstellation eine Messung am zweiten Teilchen die Eigenschaft B ergeben wird, vollkommen egal wo es sich befindet und ob diese Messung bereits durchgeführt wurde oder noch in der Zukunft liegt. Der „Kollaps" der Wellenfunktion ist aus dieser Sicht kein physikalischer Vorgang, insbesondere kein raumzeitlicher, der den Prinzipien der Relativitätstheorie folgen müsste. Es ist lediglich eine Anpassung an neue Erkenntnisse, die zu geänderten Erwartungen bezüglich zukünftiger Messergebnisse führen.

Es gibt noch eine andere und sehr weitreichende Betrachtungsweise für diesen Aspekt der Nichtlokalität. Er findet sich implizit auch in den Ausführungen von Carlo Rovelli, auch in seiner noch zu besprechenden informationstheoretischen Rekonstruktion der Quantenmechanik, wird von ihm aber meiner Meinung nach nicht ausreichend genug betont. Sein Versuch, der RQM den Status einer „lokalen" Interpretation zu verleihen, führt daher sehr leicht zu Missverständnissen und hat bereits zu einer Reihe von kritischen Gegenstimmen geführt. Bezüglich der raumzeitlichen Aspekte kann man der RQM nämlich nicht zu Unrecht den Vorwurf einer gewissen Tautologie machen: Wenn unsere Welt nur aus Quantenereig-

nissen bezüglich des vermessenden Systems besteht, ist unsere Welt schon nach Voraussetzung „lokal", denn es gibt aus Sicht dieses Systems zunächst einmal gar keine anderen Systeme! Man müsste also erst einmal eine Definition einführen, was „Lokalität" im Rahmen der RQM überhaupt bedeutet, was Gegenstand aktueller Diskussionen ist.

Es gibt aber einen besseren Weg, diesen Aspekt zu verstehen. Dafür soll zunächst ein mögliches Missverständnis ausgeräumt werden: Quantenmechanische Korrelationen führen nicht zu experimentellen Widersprüchen mit der Relativitätstheorie, selbst wenn die miteinander verschränkten Teilchen sehr weit voneinander entfernt sind. Der Grund dafür liegt in der (mathematisch ableitbaren) Eigenschaft der Quantentheorie, dass Messungen an einem der Teilchen *keinen Signalcharakter* bezüglich des anderen Teilchens haben. Sie tragen also keine von außen auswertbaren Informationen zu ihm. Es ist daher nicht der Fall, dass aus der Quantenmechanik eine feste obere Grenze für die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Signalen folgt, erst recht nicht, dass diese generell gilt und mit der Naturkonstante der Lichtgeschwindigkeit identifiziert werden kann. Das bleibt eine Domäne der Relativitätstheorie. Was sagt uns die Quantenmechanik stattdessen über die Natur von Raum und Zeit aus? Die Antwort ist: *gar nichts*.

Hier dürfte sich Protest regen, denn selbstverständlich sind räumliche Konstellationen und zeitliche Vorgänge ein allgegenwärtiger Bestandteil der quantenmechanischen Beschreibung. Hier werden Aussagen über Positionen, Geschwindigkeiten und andere Eigenschaften mit räumlichem Bezug gemacht, die sich im Laufe der Zeit auch verändern können, egal ob im Schrödinger- oder Heisenberg-Bild. Das ist natürlich unbestritten. Die Frage ist aber, was die Quantenmechanik über den Raum und die Zeit *selbst* aussagt. Gibt es zum Beispiel einen speziellen Quantenoperator für die Zeit oder eine direkt aus dieser Theorie folgende Dimensionalität unseres Raums oder dessen Metrik (Raumkrümmung)? Legt sie eine Verbindung von Raum und Zeit nahe, eine vierdimensionale Raumzeit? Genau das macht die Quantenmechanik nicht. Raum und Zeit stellen für sie lediglich eine passive Bühne dar, auf der sich die geheimnisvollen Eigenschaften der mikroskopischen Welt präsentieren. Daraus folgt:

> *Raum und Zeit sind in der Quantenmechanik nicht ein Teil des untersuchten Systems, sondern entsprechen der räumlichen Konstellation und der Laborzeit des Beobachters.*

Es sind lediglich die *Projektionen* der im jeweiligen Messaufbau vorgegebenen räumlichen und zeitlichen Konstellationen, die sich in der Beschreibung der mikroskopischen Phänomene wiederfinden. Die Quantenmechanik selbst macht nur Aussagen über *Materie*, genauer gesagt über relative Quantenereignisse, nicht über die Raumzeit.

Auch wenn dieser Schluss fast unvermeidlich ist, wird er nicht von allen Physikern geteilt und noch seltener so klar formuliert. Ein Grund dafür ist das noch immer vorherrschende Schrödinger-Bild, in dem der quantenmechanische Kern mit der von außen vorgegebenen Zustandspräparation vermengt wird, nämlich in Form der zeitveränderlichen Wellenfunktion. Kein Wunder, dass es bislang niemandem gelungen ist, dieser Größe eine physikalisch verständliche Bedeutung zu geben. In dem alternativen Bild ist die Aufteilung klar:

- Die Wellenfunktion spiegelt im Heisenberg-Formalismus lediglich unser Wissen über bereits aufgenommene Quantenereignisse wider. Je nach Messaufbau startet man somit mit einer anderen Form der Wellenfunktion und passt diese sinnvollerweise an, wenn neue Messergebnisse vorliegen.

- Die Heisenberg-Operatoren beschreiben das Ergebnis von möglichen, zukünftigen Messungen, wenn diese von einem Beobachter am Ort X zum Zeitpunkt t aufgenommen werden.

Wie immer ist dabei der Hinweis wichtig, dass die RQM beliebige Systeme als „Beobachter" zulässt, diese müssen also anders als in der Kopenhagener Interpretation nicht makroskopisch sein, und „Messung" lässt sich mit einer beliebigen physikalischen Interaktion gleichsetzen.

Das Heisenberg-Bild lässt uns die Operatoren somit als *Projektionen* von bestimmten quantenmechanischen Grundprinzipien auf die im jeweiligen Messaufbau gewählten – und somit von außen vorgegebenen – raumzeitlichen Konstellationen erkennen. Diese Prinzipien können zeitlich vollkommen unveränderlich sein und müssen auch keinen räumlichen Bezug haben. Je nach Kontext *führen sie* aber zu bestimmten Aussagen in der Raumzeit des äußeren Systems, das letztendlich immer aus makroskopischen Systemen besteht, die sich in unser gewohnten dreidimensionalen (relativistisch gesehen vierdimensionalen) Welt befinden.

Jedes Ergebnis bezieht sich dabei nur auf das jeweilige aufnehmende System, das heißt den potentiellen zukünftigen Beobachter, daher kann das Problem möglicher inkonsistenter Zustände in der RQM schon vom Grundansatz nicht auftreten. Hier zeigt sich die Überlegenheit gegenüber anderen Interpretationen, die für diese Vermeidung erhebliche Klimmzüge machen müssen: Die Viele-Welten-Interpretation versucht diese Zustände in getrennte real existierende Welten (Zweige) zu verbannen, und entzieht sich dabei selbst die Grundlage einer probabilistischen Beschreibung. Die de Broglie – Bohm – Theorie erhält die Konsistenz nur durch die Hinzunahme von bislang unbekannten und nicht direkt beobachtbaren überlichtschnellen Wirkungen. Die Kollaps-Modelle spekulieren – bislang sowohl aus experimenteller als auch aus konzeptioneller Sicht vergeblich – über noch unentdeckte Abweichungen von der Quantentheorie. Aus meiner Sicht ist das ein starkes Argument für den RQM-Ansatz.

Diese Betrachtung führt automatisch zu der Frage, worin diese quantenmechanischen Grundprinzipien bestehen. Ihr fehlender Bezug zur Raumzeit ist schließlich noch keine konstruktive Beschreibung. Gibt es solche Prinzipien überhaupt angesichts der Tatsache, dass fast alle physikalischen Theorien eine raumzeitliche Grundlage haben? Sind sie vielleicht noch vollkommen unbekannt oder bezüglich ihrer Anzahl und ihres Inhaltes so komplex, dass man sie aus physikalischer – oder wissenschaftstheoretisch „sparsamer" – Sicht niemals als grundlegend annehmen würde? Sollte man sich stattdessen lieber direkt auf den bekannten Formalismus der Quantenmechanik verlassen, der zwar abstrakt ist, aber auf einer halben DIN-A4 Seite zusammengefasst werden kann? Der übernächste Abschnitt gibt darauf eine Antwort, die ungewöhnlich, aber überraschend einfach ausfallen wird. Als Vorbedingung, oder als Teil dieser Antwort, muss aber ein weiterer zentraler Aspekt der quantenmechanischen Welt angesprochen werden: ihre schon fast sprichwörtliche *Diskretheit*.

Ein Quantensprung unserer Erkenntnis – die Quantenmechanik ist diskret

Der von der RQM behauptete *diskrete* Charakter der Quantenereignisse ist ein wichtiges Element dieser Interpretation. Diese Verbindung ist natürlich nicht neu, sie bildete in Form von Plancks Energiequanten und Einsteins Photonen den Startschuss der Quantenmechanik, und „Quanten" wird auch umgangssprachlich als diskreter Begriff benutzt, zum Beispiel in dem Wort „Quantensprung". Selbstverständlich ist diese Deutung dennoch nicht: die Wellenfunktion ist eine reelle (genauer gesagt komplexwertige) Funktion und auch ihre Zeitentwicklung gemäß der Schrödinger-Gleichung geschieht vollkommen kontinuierlich. Erst das Ergebnis einer Messung führt zu diskreten Ergebnissen, und das Ausmaß der Diskretheit hängt sogar von der Art der Messung ab. Dies hat einige Autoren zu dem Schluss kommen lassen, dass die Quantenmechanik im Grunde eine vollkommen kontinuierliche Theorie ist.

Carlo Rovelli und viele andere sehen das anders, und meiner Meinung nach mit sehr guten Argumenten:

- Im orthodoxen Formalismus lässt sich der Kollaps der Wellenfunktion nicht einfach als Beiwerk ausblenden, ohne zu falschen Vorhersagen zu kommen. Wie schon ausführlich erläutert wurde, sollte man der Wellenfunktion aber auch gar keine fundamentale Rolle zugestehen.
- Es erscheint sehr plausibel, wenn nicht sogar unvermeidlich, dass ein beliebig kleines System, und sei es auf einer noch nicht erforschten Größenskala unterhalb von Quarks und anderen Elementarteilchen, nur eine endliche Menge von Informationen enthalten kann. Auf welche Art sollten diese auch gespeichert sein? Wo sich diese Grenze genau befindet, ist dabei für die generelle Frage nach der Diskretheit unerheblich.
- Das Plancksche Wirkungsquantum spielt eine zentrale Rolle in der Quantenmechanik. Wie insbesondere die Heisenbergsche Unschärferelation zeigt, kann man diese Naturkonstante als eine Art Übersetzung zwischen physikalischen und diskreten Informations-Einheiten sehen: ein bestimmtes Phasenraumvolumen enthält nur eine begrenzte Menge unterscheidbarer Zustände.
- Diskretheit ist ein zentrales Element von fast allen Ansätzen für eine vereinheitlichte Quantengravitations-Theorie. Das ist kein Beweis, aber zumindest ein starker Hinweis, dass auch die Quantenmechanik ein diskretes Fundament hat.

In den Worten von Carlo Rovelli:

> *„God did not over-fill the world with moving waves on infinite dimensional configuration spaces. She didn't even draw it with heavy continuous lines. She just dotted it with sparse quantum events."*

Wohin führen uns diese eher allgemeinen Argumente? Die Schwächen der kontinuierlichen Ansätze aufzuzeigen ist eine Sache, aber gibt es auch konkrete und erfolgreiche Vorschläge *für* diskrete Ansätze? Der nächste Abschnitt gibt darauf eine Antwort.

Begrenzt, aber unerschöpflich – das Grundprinzip der Quantenmechanik

Wie wir gesehen haben, gibt es viele Hinweise auf eine diskrete Grundstruktur der Quantenmechanik. Ihre fundamentalen Elemente sind demnach abzählbar und lassen sich durch eine endliche Menge von Informationen beschreiben. Laut der RQM besteht diese fundamentale Ebene aus den relativen Quantenereignissen. Sie können somit, immer bezogen auf das jeweilige Bezugssystem, durch eine endliche Anzahl von Ja-Nein-Fragen darstellen. Damit rücken *Informationen* in das Zentrum der quantenmechanischen Grundprinzipien.

Dieser Trend ist nicht gänzlich neu und er ist auch kein exklusiver Zug der RQM. In den letzten Jahrzehnten hat die informationstheoretische Betrachtung der Quantenmechanik eine enorme Bedeutung gewonnen, nicht nur für Anwendungen wie Quantencomputer oder Quantenkryptografie, sondern auch für die Deutungsdebatte. Das hat so weit geführt, dass die fundamentalen Grundbausteine unserer Welt in manchen Interpretationsversuchen mit Informationen *gleichgesetzt* werden. Ein Vertreter dieses Ansatzes ist der österreichische Physiker Anton Zeilinger, der neben erstklassigen allgemeinverständlichen Büchern über die Quantenmechanik vor allem durch sehr medienwirksame Experimente zur Quantenteleportation bekannt geworden ist, die den aktuellen Stand der Forschung markieren. Seiner Meinung nach legt uns diese Theorie nahe, dass Informationen *als reale Entitäten* betrachtet werden müssen, weil man aufgrund der Kontextualität gar nicht mehr zwischen den eigentlichen physikalischen Zuständen und ihrer Kenntnisnahme unterscheiden kann.

Was diese Begrifflichkeiten angeht, hat Zeilinger aber nur einen kleinen Teil der Physikergemeinde überzeugt. Der Begriff „Information" ist immer eine „Information über etwas", sowohl in der allgemeinen Naturbeschreibung als auch in den physikalischen Formalismen wie dem Shannonschen Informationsbegriff und dem darauf basierenden Entropiemaß. Natürlich darf man bisherige Traditionen in Frage stellen, aber der RQM-Ansatz erleichtert die Deutung der Quantenmechanik auch ohne diese sehr umstrittene Gleichsetzung von Information und Informationsinhalt.

Daher zurück zum RQM-Ansatz. Kombiniert mit der Diskretheit besteht unsere Welt in diesem Bild aus einer endlichen Menge von diskreten relativen Quantenereignissen. Die Quantenmechanik wird dadurch zu einer Theorie, die festlegt, welche Informationen ein System über ein anderes – mit ihm interagierendes – System ermitteln kann und welchen strukturellen Regeln für diese Informationen gelten. Aber was sind diese Regeln?

Wir sind nun endlich an dem Punkt, die Grundprinzipien der Quantenmechanik vorstellen zu können. Ist es möglich, den Quantenformalismus aus einer möglichst kleinen Anzahl von Grundannahmen abzuleiten? Derartige Rekonstruktionsversuche stellen ein aktuelles Forschungsthema dar, das noch nicht zu einem allgemein anerkannten Abschluss gekommen ist. Die beiden folgenden Grundprinzipien habe ich von Carlo Rovelli übernommen, aber sie finden sich auch in Ansätzen anderer Autoren wieder, die nicht unbedingt an die Überlegenheit der RQM-Interpretation glauben. Diese Rekonstruktion scheint den Kern der Quantenmechanik widerzugeben, insbesondere ihre mathematische Grundstruktur, auch wenn sie noch nicht alle Einzelheiten dieser Theorie ableiten kann. Dazu werden zusätzliche Detailannahmen benötigt, über deren genaue Form noch gestritten wird.

Genug der Vorrede, hier sind sie nun, die beiden Grundsätze, aus denen sich die gesamte Struktur der Quantenmechanik ableiten lässt[12]:

Die Grundprinzipien der Quantenmechanik:

1. *Die Anzahl von relevanten Informationen über ein System ist begrenzt.*
2. *Es ist immer möglich, neue relevante Informationen über ein System zu erlangen.*

Das ist alles, mehr ist nicht notwendig. Wir kommen gleich zu weiteren Erklärungen und der Auflösung der scheinbaren Widersprüchlichkeit dieser beiden Aussagen. Man bekommt aber vielleicht schon eine Ahnung davon, welche fantastische Erkenntnis sich hier abzeichnet: der Großteil der so vielfältigen und mysteriös erscheinenden Phänomene der Quantenwelt, mit einigen kleinen Zusatzannahmen vielleicht sogar alle, lassen sich auf diese beiden einfachen Grundsätze zurückführen. Aus meiner Sicht ist das ein enormer Erfolg der Deutungsdebatte und der RQM-Interpretation!

Nun zu den Aussagen im Einzelnen. Mit „relevanter" Information sind Erkenntnisse gemeint, die uns eine zusätzliche Hilfe für die Vorhersage des zukünftigen Verhaltens des Systems liefern, entweder in deterministischer oder in probabilistischer (nur in Wahrscheinlichkeiten ausdrückbarer) Weise. Stellt sich als Ort eines ruhenden Teilchens zum Beispiel der Ort X heraus, können wir daraus ableiten, dass alle zukünftigen Messungen ebenfalls den Ort X ergeben werden, solange das Teilchen nicht vorher mit anderen Systemen interagiert (wozu auch die Wirkung eines Kraftfeldes gehören würde). Das gilt in der Klassischen Physik genauso wie in der Quantenmechanik. Neu ist die *Begrenztheit* dieser Informationsmenge. Prinzip 1 ist nichts anderes als die Annahme, dass die Grundstruktur der Quantenmechanik *diskret* ist – alles, was diese Theorie über ein System aussagen kann, lässt sich auf eine endliche Menge von Ja-Nein-Fragen abbilden. Auch wenn man Axiome nicht begründen muss, haben die vorherigen Abschnitte bereits einige Argumente dafür geliefert, dass diese Grundannahme auch aus allgemeinen Plausibilitätsüberlegungen folgt und sehr gut zu den quantenmechanischen Phänomenen passt.

Das zweite Prinzip entspringt nicht unseren Erfahrungswerten aus anderen physikalischen Theorien, es hat seinen Ursprung in den überraschenden und dennoch experimentell reproduzierbaren Phänomenen der Quantenwelt. Aber widerspricht es nicht genau der ersten Aussage? Wie könnte man neue Informationen gewinnen, falls die maximale Informationsmenge schon erreicht ist?

Für die Beantwortung dieser Frage ist die Feststellung wichtig, dass es um „relevante" Informationen geht, und weder Prinzip 1 noch Prinzip 2 behaupten, dass eine relevante Information bei weiteren Interaktionen mit dem System auch relevant *bleibt*. Eine Vermessung eines Systems führt in der Quantenmechanik gemäß dieser beiden Prinzipien zu neuen Erkenntnissen über sein zukünftiges Verhalten, aber dabei werden bestimmte zuvor erlangte Informationen irrelevant. Genau diese Möglichkeit löst den scheinbaren Widerspruch auf.

Ein Beispiel macht das klarer. Die Ortsmessung eines mikroskopischen Teilchens ergibt den Ort X, was eine relevante Information darstellt. Führt man nun an diesem Teilchen eine Messung seines Impulses (Masse mal Geschwindigkeit) durch, erhält man eine neue relevante

[12] Statt „System" hätte man hierfür auch den Begriff „Objekt" verwenden können, wenn man ihn nicht zu wörtlich als ein klassisches „Ding" mit absoluten Eigenschaften interpretiert. Die genaue Bezeichnung ist ein Phasenraum mit begrenztem Liouville-Volumen, was der Verallgemeinerung eines räumlich begrenzten Systems auf beliebige Zustandsvariablen entspricht.

Information, nämlich seinen Impuls Y, der in diesem Beispiel einem exakten Messergebnis entsprechen soll. In der Klassischen Physik haben wir nun zwei relevante Informationen gesammelt, den Ort X und den Impuls Y. Aber nicht in der Quantenmechanik. Wie die Experimente zeigen, ist der Ort des Teilchens nach der Impulsmessung *vollkommen unbestimmt*. Das Teilchen findet sich nicht mehr am Ort X, sondern an irgendeinem anderen Ort wieder! Das ist keine theoretische Spekulation, sondern eine jederzeit im Labor nachprüfbare Eigenheit der mikroskopischen Welt. Eine anschließende genaue Ortsmessung macht den zuvor ermittelten Impulswert zu einer hinfälligen Information, in Übereinstimmung mit dem ersten Grundprinzip, aber mit der Ermittlung des neuen Ortes ist auch wieder eine relevante Information dazugekommen, so wie es das zweite Grundprinzip garantiert.

Vermutlich haben Sie schon erkannt, dass es sich bei diesem Beispiel um nichts anderes als die Heisenbergsche Unschärferelation handelt. Diese wichtige Beziehung *folgt* aus den beiden Grundprinzipien, wenn man das Plancksche Wirkungsquantum als Übersetzung zwischen physikalischen Einheiten (räumliche Abstände und Geschwindigkeiten) und Informationseinheiten (bits) versteht. Auch die zentrale Gleichung des Heisenberg-Formalismus, der messbare Unterschied bei einer Vertauschung der Operatoren-Reihenfolge (erst Orts- und dann Impulsmessung, oder genau umgekehrt) geht auf diese beiden Grundprinzipien zurück.

Was wir hier sehen, ist eine informationstheoretische Rekonstruktion der Quantentheorie aus zwei denkbar einfachen – wenn auch aus klassischer Sicht überraschenden – Grundprinzipien. Sie enthalten keinen direkten Bezug zu Abläufen in Raum und Zeit, nicht einmal kausale Abhängigkeiten, nur diese eine Aussage: *Die über ein System erfahrbaren relevanten Informationen sind begrenzt, aber unerschöpflich.* Dieser einfache Satz bildet das Fundament der Quantenmechanik.

Kontextualität in 4D

Eine wichtige Erkenntnis des letzten Kapitels war die Raumzeitlosigkeit der quantenmechanischen Grundprinzipien aus Sicht der Relationalen Interpretation (RQM), wodurch auch der Konflikt mit den Leitsätzen der Relativitätstheorie aufgelöst werden konnte. Wie dieses Kapitel zeigen soll, sind sich diese beiden Theorien sogar ähnlicher als sie auf den ersten Blick erscheinen und ihre gemeinsame Anwendung könnte sich als Schlüssel für eine noch ungelöste Frage zum Verständnis der Quantenmechanik herausstellen. Zunächst möchte ich dafür einen Ansatz vorstellen, der sich viele Grundsätze mit der RQM teilt, sich aber auch in einigen wesentlichen Punkten von ihr unterscheidet und den Begriff der Kontextualität in einem noch allgemeineren Sinne verwendet.

Für das Grundverständnis der Quantenmechanik ist dieses Kapitel nicht unbedingt erforderlich. Eilige Leser, die sich nicht detailliert mit dem genauen Ausmaß der quantenmechanischen Nichtlokalität sowie der Rolle des Zufalls beschäftigen wollen, können es daher problemlos überspringen.

Die Relational Blockworld Interpretation (RBW)

Die sogenannte „Relational Blockworld" Interpretation (RBW) wurde von den amerikanischen Forschern Michael Silberstein (Philosoph), William Stuckey (Physiker) and Timothy McDevitt (Mathematiker) aufgestellt und in vielen Fachartikeln sowie in ihrem hervorragenden Buch „Beyond the Dynamical Universe: Umfing Block Universe Physics and Time as Experienced" aus dem Jahr 2018 ausführlich erläutert. Ich kenne kein anderes Buch, das so viele unterschiedliche Themen (Natur der Zeit, Relativitätstheorie, Dunkle Materie, Quantenmechanik, Quantengravitation, Bewusstsein, Urknall, ...) in ein Gedankengebäude zusammenbringt, ohne dabei die seriösen Wege der Wissenschaft zu verlassen. Aus meiner Sicht eine absolute Leseempfehlung!

Eine ausführliche Besprechung dieses Ansatzes ist an dieser Stelle schon aufgrund der oben angedeuteten Themenspannweite nicht möglich. Ich möchte aber zumindest seine Kernthesen zusammenfassen:

- Ausgangspunkt ist das von der Relativitätstheorie nahegelegte vierdimensionale Blockuniversum, so wie es auch in meinem Aufsatz **Auf der Suche nach der Zeit** beschrieben wird.
- Da dieses Blockuniversum den Raum und die Zeit enthält und sich nicht selbst zeitlich entwickelt, sind die fundamentalen Prinzipien zur Erklärung unserer Welt nichtkausal, zeitlos und nichtdynamisch. Sie beschreiben keine raumzeitlichen Abläufe, sondern *Muster* im vierdimensionalen Raum, also „Strukturen" oder "Relationen" im Sinne von relativen Beziehungen zwischen Teilen dieser Welt. Einsteins Relativitätstheorie, von vielen Physikern als „schönste Theorie der Welt" betitelt, ist nach Ansicht der RBW-Autoren genau solch eine auf Prinzipien beruhende Theorie.
- Unsere Welt ist real, aber sie ist *kontextuell*, und zwar in jeglicher Hinsicht. Sie besteht weder aus Dingen noch aus Raumzeit und ist selbst weder klassisch noch quantenmechanisch. „Dinge" sind nur perspektivische Manifestationen eines „dinglichen Kontextes", zum Beispiel eines Experiments, in dem der Ort eines Teilchens vermessen wird, und „Wellen" die einer wellenartigen Perspektive. Das gleiche gilt für die Raumzeit: sie ist nichts anderes als das Bild unserer Welt in einem

raumzeitlichen Kontext. Auf fundamentaler Ebene lassen sich Raumzeit und Materie überhaupt nicht voneinander trennen, die Welt ist „materiell-raumzeitlich".

- Die Autoren des RBW-Ansatzes gehen so weit, auch das *Mentale* – unsere innersten direkt erfahrbaren Sinneseindrücke, manchmal auch *Geist*, *Qualia* oder schlicht unser *Bewusstsein* genannt – als Teil dieser Kontextualität zu sehen, um damit die uralte Frage aufzulösen, ob die Welt materiell oder geistig ist. Sie scheint beides zu beinhalten, da man das eine nicht aus dem anderen ableiten kann. Die Frage, wie die nach Voraussetzung grundverschiedenen Elemente miteinander interagieren können, hat aber trotz der uralten philosophischen Diskussion über dieses Thema nie eine erfolgreiche Antwort erhalten. Laut RBW ist unsere Welt etwas ganz anderes: sie ist „materiell-raumzeitlich-geistig" – im materiellen Kontext erscheint sie uns als Materie, im raumzeitlichen als Raumzeit und im mentalen Kontext unseres Selbstbewusstseins zeigt sie sich mental. Keine dieser drei Erscheinungsformen kann dabei einen höheren Grad an Fundamentalität als die beiden anderen beanspruchen.

Wie man unschwer erkennen kann, ist *Kontextualität* das Grundthema dieses Ansatzes. Was sagt er über die Quantenmechanik aus?

- Im RBW-Ansatz beschreibt die Quantenmechanik nicht nur die Phänomene, wie sie sich in unseren Experimenten zeigen, sie ist *identisch* mit der Gesamtheit dieser Phänomene. Das Analoge gilt für die Klassische Mechanik, die eine gleichberechtigte Perspektive für klassische Kontexte wie Tische, Katzen und Flugzeuge darstellt. Es gibt somit auf fundamentaler Ebene keine quantenmechanischen Grundgrößen wie Teilchen oder Felder, nicht einmal die Quantenereignisse der RQM-Interpretation.
- Ähnlich wie die Relativitätstheorie sollte man die Quantenmechanik als Prinzipientheorie auffassen, die keine raumzeitlichen Abläufe beschreibt, sondern Muster und relative Strukturen, ohne dafür wie in einem Baukastensystem aus festen Grundelementen zu bestehen.
- Die Wellenfunktion der Quantenmechanik ist nur eine mathematische Hilfsgröße, die unser Wissen über Messergebnisse beschreibt. Im RBW-Formalismus, der auf den Feynmannschen Pfadintegralen beruht, kommt diese Funktion nicht einmal vor.
- Der RBW-spezifische Formalismus der Quantenmechanik hat eine diskrete Struktur und beruht auf dem Lagrange-Formalismus, in dem sowohl initiale als auch finale Randbedingungen berücksichtigt werden und der uns schon beim Abschnitt über das Fermatsche Theorem begegnet ist. Dadurch ergibt sich auch eine gewisse Nähe zu den retrokausalen Interpretationen, die aus RBW-Sicht aber nur einen modellhaften und abgeleiteten Charakter haben.

Die Ähnlichkeiten, aber auch die Unterschiede zur RQM-Interpretation sind offensichtlich. Beide beruhen auf der Kontextualität unserer Welt, aber den relationalen und rein quantenmechanischen Grundelementen der RQM setzt der RBW-Ansatz das vierdimensionale Blockuniversum und einen noch allgemeineren Kontextualitäts-Begriff entgegen. Es soll aber nicht unerwähnt bleiben, dass Carlo Rovelli in der Kontextualität der Quantenwelt ebenfalls eine willkommene Möglichkeit sieht, den Konflikt zwischen materieller und geistiger Beschreibung auflösen zu können.

Bevor ich den schwierigen Versuch einer vergleichenden Bewertung dieser und anderer Interpretationen wage, möchte ich noch einen Aspekt besprechen, der ein aktuelles Forschungsthema darstellt und zu dem auch der RBW-Ansatz etwas beizutragen hat.

Was begrenzt die Nichtlokalität der Quantenmechanik?

Noch einmal zurück zum Bellschen Theorem. Es beweist, dass das Verhalten von verschränkten Teilchen nur dann durch „klassische" Theorien (lokale Grundelemente und keine überlichtschnellen Kausalwirkungen) reproduziert werden kann, wenn diese Korrelationen eine Maßzahl von 2.0 oder kleiner haben[13]. Die Theorie der Quantenmechanik verletzt diese Bedingung: ihr Formalismus führt zu einer Maßzahl von 2*√2 (≈2.83), die auch *Tsirelson Grenze* genannt wird, nach dem russischen Mathematiker Boris Tsirelson, und genau diese Zahl wurde auch experimentell nachgewiesen. Das Ergebnis steht somit fest: Aus dieser Sicht betrachtet ist unsere Welt nichtlokal, unabhängig von der favorisierten Interpretation der Quantenmechanik und sogar unabhängig von zukünftigen Quantengravitations-Theorien.

Das ist natürlich für sich genommen schon eine wesentliche Aussage, aber die vielleicht noch interessantere Frage ist: warum hat die Quantenmechanik *genau dieses Maß* an Nichtlokalität? Die Korrelationen könnten ja auch noch stärker sein. Ab einer gewissen Grenze wären sie allerdings so stark, dass man mit ihnen Signale übertragen könnte. Diese könnten dann ohne jeglichen Zeitverzug beliebig lange Distanzen überbrücken – was zu einem experimentell nachweisbaren Widerspruch mit der Relativitätstheorie führen wurde, der niemals beobachtet wurde. Diese „Signalgrenze", die auch aus allgemeiner Betrachtungsweise als absolutes Limit gesehen wird, lässt sich als eine Korrelations-Maßzahl von 4.0 berechnen. Warum hat die Quantenmechanik, wenn sie schon eine nichtlokale Welt beschreibt, dann nicht diesen Wert statt dem 2*√2 Limit? Der Hinweis auf die Raumzeitlosigkeit der quantenmechanischen Grundprinzipien, wie es der RQM-Ansatz nahelegt, kann diese Antwort nicht von sich aus liefern. Er kann zwar die Konflikte mit den relativistischen Prinzipien auflösen, aber er führt nur auf die 4.0 Grenze, nicht auf das 2*√2 Tsirelson-Limit.

Was begrenzt also die Nichtlokalität der Quantenmechanik? Diese Frage hat sich zu einem aktuellen Forschungsgebiet entwickelt. Sie ist nicht nur für die Deutungsdebatte relevant, sondern auch für Aspekte der Quantenkommunikation, und könnte nach Meinung einiger Forscher sogar ein Wegweiser für zukünftige Theorien sein, die über die Quantenmechanik hinausgehen.

Als vielversprechendster Weg zu einer Antwort werden einige allgemeine Prinzipien gesehen, die diese Tsirelson Grenze ableiten können. Wie plausibel und „allgemein" diese Prinzipien wirklich sind, ist allerdings umstritten. Wie erst im Jahr 2015 nachgewiesen wurde, können sie außerdem bei Systemen, die aus mehr als zwei Unterkomponenten bestehen, zu einer Korrelations-Maßzahl führen, die über dem Wert der Quantenmechanik liegt.

Eines dieser Prinzipien ist „Information Causality": Wenn Alice N Bits an Bob sendet, hat Bob nur N Bits an Informationen über Alice, und das bezüglich *aller* möglichen Messungen. Das klingt sehr plausibel, aber in der Quantenmechanik schließen sich manche Messmöglichkeiten gegenseitig aus, warum beschränkt sich das Prinzip daher nicht auf tatsächlich durchführbare Messungen? Eine mögliche Erklärung dafür wurde von der englischen Physikerin Emily Adlam in Form des „Global Determinism"-Prinzips vorgeschlagen: Die Naturgesetze legen, basierend auf lokalen kontrollierbaren Eingangsgrößen sowie nichtmanipulierbaren globalen Variablen, einen eindeutigen Lauf der Geschichte fest. Sie konnte zeigen, dass Information Causality, und damit die Tsirelson Grenze, eine Folge dieses

[13] Das ist die nach ihren Urhebern benannte Clauser – Horne – Shimony – Holt Ungleichung.

Prinzips ist. Die Einschränkung auf Zweiteilchensysteme gilt aber auch für das Information Causality Prinzip.

Ein alternativer und in meinen Augen sehr überzeugender Erklärungsansatz stammt von den Autoren der RBW-Interpretation. Sie haben gezeigt, dass man das Tsirelson-Limit aus einer einfachen physikalischen Annahme ableiten kann: *Das quantenmechanische Drehmoment bleibt in jedem Bezugssystem erhalten*. Eine nur geringfügig höhere Korrelations-Maßzahl würde dieses Prinzip verletzen. Das ist eine überraschend einfache Antwort auf die Frage, warum die Quantenmechanik nicht noch stärkere Nichtlokalitäten aufweist, und es passt perfekt zu dem prinzipiengestützten und nach dem Vorbild der Relativitätstheorie entworfenen RBW-Ansatz.

Die Auseinandersetzung mit diesen Prinzipien hat noch eine andere Erkenntnis hervorgebracht, die Physiker und Mathematiker gleichermaßen überrascht hat. Die konkrete mathematische Ableitung der quantenmechanischen Korrelationen aus diesen Prinzipien hat sich als algorithmisch äquivalent zu einem zentralen algebraischen Problem aus dem Jahr 1970 erwiesen, dem sogenannten „Connes Embedding Problem", und erst kürzlich (Anfang 2020) wurde bewiesen, dass es zur Klasse algorithmisch unentscheidbarer Probleme gehört. Die Hintergründe und die Bedeutung dieser innigen Beziehung zwischen quantenmechanischen Korrelationen und algorithmischer Komplexitätstheorie sind bis heute ungeklärt.

RQM versus RBW und die Rolle des Zufalls

Zum Abschluss dieses Kapitels möchte ich einige Anmerkungen zum Vergleich zwischen der Relationalen Interpretation (RQM) und dem Relational Blockworld Ansatz (RBW) beisteuern. Beide Interpretationen gehen davon aus, dass wir unsere Welt nur kontextuell beschreiben können, aber in einigen Punkten widersprechen sie sich. Eine abschließende Bewertung fällt mir allerdings schwer und vielleicht sind diese Differenzen auch nicht von grundsätzlicher Natur, daher sollte man diese Gedanken nur als einen Zwischenstand aus meiner eigenen Sicht verstehen. Als Teil dieser Diskussion werde ich die Frage behandeln, ob die Quantenmechanik eine deterministische Weltsicht nahelegt, was ebenfalls noch keine endgültige Antwort erhalten hat.

Die RQM stellt für mich ein vollständiges und konsistentes Gedankengebäude dar, das der Quantenmechanik eine fundamentale Rolle bei der Naturbeschreibung zugesteht und über den Grundsatz der endlichen, aber unerschöpflichen Informationen das besondere „quantenhafte" in unserer Welt verdeutlicht. Im RBW-Ansatz stehen Quantenmechanik und Klassische Mechanik dagegen gleichberechtigt nebeneinander, genauso wie die Beschreibung der Raumzeit und des Mentalen. Was macht dann aber die überraschenden Eigenschaften der mikroskopischen Welt aus? Warum hat sich der Versuch ihrer klassischen Beschreibung als ein solch spektakulärer Fehlschlag erwiesen? Der Verweis auf einen „quantenmechanischen Kontext" (die Laborexperimente zum Nachweis dieser Phänomene) ist nur eine tautologische Verlagerung auf die Frage, warum sich dieser Kontext als so ungewöhnlich erwiesen hat. Der RBW-Ansatz würde zudem auch andere Theorien wie die Klassische Mechanik und die Thermodynamik als vollkommen gleichberechtigt nebeneinanderstellen, obwohl man letztere aus der anderen *ableiten* kann[14], weshalb man die

[14] Das ist der Zweig der Statistischen Mechanik, der thermodynamische Phänomene wie dem zukunftsgerichteten Entropiewachstum aus der Klassischen Mechanik plus zum jeweiligen Kontext passenden Randbedingungen ableiten kann.

Klassische Mechanik in der Physik aus guten Gründen als die fundamentalere Theorie ansieht. Das erscheint mir als ein klarer Pluspunkt für den RQM-Ansatz.

Den Vorteil der Relational Blockworld Interpretation sehe ich in der engen Verbindung mit der relativistischen Raumzeit, speziell des Modells des vierdimensionalen Blockuniversums, zu dem uns auch **Auf der Suche nach der Zeit** geführt hat. Auf dieser Grundlage hätte ich sogar erwartet, dass auf fundamentaler Ebene eine *deterministische* Beschreibung unserer Welt möglich ist, nach der wir in der Quantenmechanik nur deshalb mit Wahrscheinlichkeiten arbeiten müssen, weil uns aus thermodynamischen Gründen ein Blick in die Zukunft verwehrt bleibt. Wie der Two-State Formalismus zeigt, der auf initialen und finalen Randbedingungen basiert, wäre das durchaus möglich, und auch andere Interpretationen wie die de Broglie – Bohm – Theorie sind vollkommen deterministisch. Eine solche Beschreibung hätte nämlich eine höhere Erklärungskraft – sowohl aus prinzipiellen Gründen, weil er buchstäblich weniger dem Zufall überlässt, als auch aus konkreten, wie das oben erwähnte Beispiel des „Global Determinism" Ansatzes zeigt, aus dem man die maximale Stärke der quantenmechanischen Korrelationen ableiten kann. Aus für mich nicht gänzlich ersichtlichen Gründen gehen die Autoren des RBW-Ansatzes aber genauso wie Carlo Rovelli von einer fundamental probabilistischen Natur unserer Welt aus.

Die Frage, ob die Quantenmechanik auf fundamentaler Ebene eine deterministische Theorie ist, scheint mir daher noch offen. Vielleicht wird diese Frage erst von einer zukünftigen Quantengravitationstheorie beantwortet. Die bisherigen Hinweise aus unseren Forschungsergebnissen, insbesondere der Erfolg der zeitlosen und retrokausalen Betrachtungsweisen, scheint mir aber eindeutig das Bild zu stärken, das in dem Satz „*God may play dice, but only once.*" von Ken Wharton und in noch schönerer Form in dem folgenden Ausspruch von Emily Adlam zum Ausdruck kommt:

„God does not play dice - he plays Sudoku."

Die beste Interpretation der Quantenmechanik

Nach dieser Überschrift kann ich mich nicht mehr davor drücken, meine eigene bescheidene Meinung zum Besten zu geben, welche der zahllosen Deutungsversuche der Quantenmechanik am plausibelsten erscheint. Herzlich willkommen auch an alle Leser, die große Teile oder vielleicht sogar den gesamten vorherigen Text übersprungen haben, um in diesem Kapitel eine Antwort auf diese große Frage zu finden – oder um einschätzen zu können, ob der Autor dieses Aufsatzes wie so viele andere den Wald vor lauter Bäumen nicht sieht, nämlich ihre unzweifelhaft überlegene und zu Unrecht kritisierte Lieblingsinterpretation. Tatsächlich ist das überhaupt nicht ausgeschlossen. Die sich in unseren Experimenten offenbarende quantenmechanische Welt ist so komplex und geheimnisvoll, dass viele Fragen noch immer auf eine Antwort warten und die einzig sichere Aussage darin besteht, dass die Suche nach dem perfekten Quantenmodell zum Verständnis dieser Phänomene noch immer andauert. Eine gewisse Grundskepsis ist bei solchen Schlussfolgerungen daher immer angebracht, egal aus welcher Feder sie stammen.

Um die Frage nach der besten Deutung der Quantenmechanik beantworten zu können, muss man meiner Meinung nach zwei Beschreibungsebenen unterscheiden. Es ist leider nicht selten, dass diese Ebenen unglücklich miteinander vermischt werden, selbst von namhaften Forschern, was zu großen Missverständnissen führen kann. Für diesen Aufsatz werde ich sie die „Fundamentale Ebene“ und die „Modellebene“ nennen, wobei man die Namen nicht allzu wörtlich nehmen sollte – auch die erste Ebene hat einen Modellcharakter und die zweite würden viele als Fundament der physikalisch anwendbaren Theorie der Quantenmechanik ansehen.

Die Fundamentale Ebene – Relationale Interpretation

Die über hundertjährige Debatte über die Interpretation der Quantenmechanik, die Suche nach einem echten physikalischen *Modell* hinter dem mathematischen Formalismus, hat eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze mit kausalen Erklärungsversuchen hervorgebracht, die entweder eine direkte raumzeitliche Beschreibung anstreben oder auf die fundamentale Existenz der 3N-dimensionalen Wellenfunktion setzen. Keine von ihnen war erfolgreich. Die Auswertung ihrer Vorzüge und Schwächen hat uns aber einige Grundzüge der Quantenmechanik auf fundamentaler Ebene erkennen lassen. Wie schon ganz am Anfang dieses Aufsatzes angekündigt, unterscheiden sie sich teilweise ganz erheblich von der gewohnten „klassischen“ Naturauffassung der Physik, und sie nehmen auch keine Rücksicht auf anschauliche Vorstellungen, die wir als menschliche zeitorientierte Lebewesen in unser makroskopischen Alltagswelt gewonnen haben. Ein besonders prominentes Beispiel für ein selbstverständlich erscheinendes, aber für diese Aufgabe hinderliches Prinzip ist das der *Kausalität*. Hierzu sind einige Erklärungen angebracht.

Es mag überraschend klingen, aber unabhängig von der Quantenmechanik sollte man nicht erwarten, auf fundamentaler Ebene (zu der Modellebene kommen wir später) Begriffe wie „Ursache“ oder „Wirkung“ wiederzufinden. Ich möchte die sehr alte und trotzdem noch immer kontrovers diskutierte philosophische Frage, was ein „kausaler Einfluss“ genau bedeutet, an dieser Stelle nicht vertiefen. Einige Aspekte dazu finden sich in meinem Aufsatz **Auf der Suche nach der Zeit** im Kapitel „Wie können wir Einfluss auf die Zukunft nehmen?“, ohne einer vollständigen Wiedergabe dieser Debatte nahe zu kommen. Nach einem Ansatz, der auch von dem Zeitforscher Huw Price vertreten wird, sind kausale Abhängigkeiten untrennbar mit *Interaktionen* von zukunftsorientierten „Agenten“ wie uns Menschen

verbunden, basierend auf dem typischerweise angetroffenen thermodynamischen Zeitpfeil. Auf fundamentaler physikalischer Ebene sucht man kausale Abhängigkeiten daher vergebens. Sie zeigen sich erst auf der zweiten Ebene, nämlich als zweifelsfrei wichtiger Bestandteil von konkreten wissenschaftlichen Modellen. Diese Sichtweise hat sich mittlerweile als eine Hauptströmung durchgesetzt und erscheint mir sehr plausibel, weshalb ich sie im Folgenden voraussetzen werde.

Genug der Vorrede. Hier sind sie nun, die meiner Meinung nach zentralen Grundsätze der fundamentalen Ebene der Quantenmechanik. Ihr wichtigster Pate sind die Arbeiten des italienischen Physikers Carlo Rovelli.

- Unsere Welt besteht aus einer Vielzahl von miteinander interagierenden Systemen.
- Das Einzige, was man über diese Welt konkret aussagen kann, sind relationale (bezugssystemabhängige) diskrete Ereignisse, also relative Informationen über andere Systeme. Diese werden vollständig von der unveränderten Theorie der Quantenmechanik beschrieben. Eine bevorzugte Perspektive gibt es dabei nicht und damit auch keinen objektiven Gesamtzustand unserer Welt.

  Hier erkennt man unschwer den Ansatz der „Relationalen Interpretation" (RQM) von Carlo Rovelli. Er sieht *Kontextualität* als Wesenszug unserer Welt – Aussagen gelten immer nur für den jeweiligen Kontext wie der Auswahl des konkreten Messaufbaus, also bezüglich einer bestimmten *Perspektive*. Ein spezieller „Beobachter" ist dafür aber nicht notwendig. Die Rolle des Bezugssystems können alle Systeme spielen, auch mikroskopische. In einem makroskopischen Kontext werden über den Dekohärenz-Prozess „relative" Fakten zu „stabilen" Fakten, wie wir sie als Grundlage der objektiven Naturbeschreibung kennen.
- Das Grundprinzip der Quantenmechanik lautet: *Die Anzahl von relevanten Informationen über ein System ist begrenzt, aber unerschöpflich*. Mit „relevant" sind Erkenntnisse gemeint, welche die (deterministische oder probabilistische) Vorhersage des zukünftigen Systemverhaltens verbessern können. Ihre Begrenztheit entspricht der fundamentalen Diskretheit unserer Welt. Es ist nach diesem Grundprinzip aber immer möglich, neue relevante Informationen über ein System zu erlangen. Dieser scheinbare Widerspruch wird durch das quantenmechanische Phänomen aufgelöst, dass relevante Informationen bei einer Messung verloren gehen können, was eine überraschende und aus der klassischen Physik unbekannte Erkenntnis darstellt. Ein zuvor bestimmter Ort eines Teilchens wird zum Beispiel bei seiner Impulsmessung unbestimmt. Das entspricht der Heisenbergschen Unschärferelation, mit dem Planckschen Wirkungsquantum als Übersetzung zwischen physikalischen Einheiten (Impuls, Energie usw.) und Informationseinheiten (bits).

  Dieses Grundprinzip erklärt viele quantenmechanischen Phänomene und bemerkenswerterweise konnte man aus dieser einfachen Aussage die gesamte mathematische Struktur der Quantenmechanik ableiten[15].
- Die Quantenmechanik macht keine Aussagen über die Natur des Raums oder der Zeit. Mehr noch, sie ist auf fundamentaler Ebene vollkommen raumzeitlos. Ihr Formalismus sagt zwar Messergebnisse mit Raum- und Zeitbezug voraus, aber dies sind nur *Projektionen* der unveränderlichen quantenmechanischen Grundprinzipien auf die

[15] Die Frage, welche zusätzlichen Detailannahmen für die Reproduktion der gesamten Theorie notwendig sind, ist allerdings noch nicht geklärt und stellt ein aktuelles Forschungsthema dar.

von außen vorgegebene Konstellation von möglichen zukünftigen Beobachtern mit ihrem von der Relativitätstheorie beschriebenen Raum- und Zeitbezug.

- Auf Grund dieser Raumzeitlosigkeit und der relationalen Grundstruktur führen die nichtklassischen Korrelationen verschränkter Teilchen, Stichwort Bellsches Theorem, im Gegensatz zu vielen anderen Interpretationen zu keinerlei Konflikten mit den Prinzipien der Relativitätstheorie wie der Gleichberechtigung aller Bezugssysteme.
- Die quantenmechanische Wellenfunktion ist nicht real, sie beschreibt lediglich unser *Wissen* über vergangene und zukünftige Messergebnisse relativ zum gewählten Kontext[16].
- Der quantenmechanische Formalismus, der diesem Bild am besten gerecht wird, ist nicht die üblicherweise verwendete Schrödinger-Gleichung mit ihrer unglücklichen Vermischung von Messpräparation und Systemdynamik, sondern der Heisenberg-Formalismus oder die damit verwandte (noch allgemeinere) Methode der Feynmanschen Pfadintegrale. Einen dynamischen Kollaps-Prozess, der so vielen anderen Interpretationen Rätsel aufgegeben hat, gibt es in diesem Bild überhaupt nicht.
- Die Quantenmechanik entspricht auf fundamentaler Ebene somit einer Prinzipientheorie, ähnlich wie die Relativitätstheorie. Auch inhaltlich gibt es zwischen diesen beiden Theorien Verbindungen, wie der sogenannte „Relational Blockworld" Ansatz zeigt. Mit dem vierdimensionalen Blockuniversum als Ausgangspunkt kann er Antworten auf konkrete Fragen wie der maximalen Stärke von quantenmechanischen Korrelationen liefern und er gibt dem Grundprinzip der Kontextualität eine noch allgemeinere Bedeutung: Es schließt neben der Materie auch die Raumzeit und sogar das Mentale (unsere Bewusstseinsinhalte) mit ein.
- Die Frage, ob die Quantenmechanik dem Zufall eine objektive Rolle zugestehen sollte oder eine vollkommen deterministische Theorie darstellt – aber auch ob dieser Aspekt überhaupt eine fundamentale Bedeutung hat – scheint mir aus den im vorigen Abschnitt genannten Gründen noch offen.

Wie ist der hier beschriebene Deutungsversuch der Quantenmechanik basierend auf Carlo Rovellis Relationalen Interpretation zu bewerten? Seine Radikalität ist unbestritten. Er verzichtet sowohl auf die Annahme eines objektiven Gesamtzustandes als auch auf eine kausale und raumzeitliche Beschreibung. Trotzdem – oder genau deswegen – hat er meiner Meinung nach das Potential, sämtliche quantenmechanischen Phänomene aus einer realistischen Sichtweise erklären zu können, und dabei gleichzeitig die eklatanten Schwächen der anderen Interpretationsversuche zu vermeiden. Begriffen wie „Makrowelt", „Messung" und „Beobachter" wird zum Beispiel anders als in der Kopenhagener Interpretation kein grundsätzlich ausgezeichneter Status eingeräumt. Potentielle zukünftige Zustände müssen nicht wie in der Viele-Welten-Interpretation in getrennte als real angenommene Weltenzweige verbannt werden, was nicht zu der probabilistischen Beschreibung der Quantenmechanik passt und wesentliche Fragen offen lässt[17]. Anders als die de Broglie – Bohm – Theorie kann man auf die eigens eingeführte Annahme von prinzipiell unbeobachtbaren überlichtschnellen

[16] Dank der RQM Interpretation befindet sich diese Aussage in völliger Übereinstimmung mit dem Pusey-Barrett-Rudolph Theorem, das in einer früheren Fußnote erwähnt wurde.

[17] Wie im zweiten Teil dieses Aufsatzes erläutert wurde, führt dieses Modell sogar zu falschen Vorhersagen, wenn man die quantenmechanischen Wahrscheinlichkeiten aus der Anzahl der Weltenzweige abzuleiten versucht, und deren subjektive Deutung hat kein allgemein anerkanntes Ergebnis hervorgebracht. Das bei dieser Interpretation akute Problem der Rekonstruktion des 3D-Raums aus dem 3N-Raum ist ebenfalls ungelöst.

Kausalwirkungen verzichten. Die Kollaps-Modelle, die über mögliche Korrekturen der quantenmechanischen Entwicklungsgesetze spekulieren, schneiden aus meiner Sicht sogar noch schlechter ab (Stichworte „Structured Tails Problem" und Unvereinbarkeit mit der Relativitätstheorie[18]), und der QBism-Ansatz ist nichts anderes als die Aufgabe unseres jahrtausendealten Bestrebens, etwas über die Welt zu erfahren, in der wir leben.

Für mich sind das überzeugende Argumente, zumindest den *Versuch* zu unternehmen, diesem radikalen, aber in sich konsistenten RQM-Ansatz zu folgen, um auf seiner Grundlage konkrete quantenmechanische Modelle zu entwickeln, die uns einer echten physikalischen Deutung der quantenmechanischen Phänomene näherbringen. Der nächste Abschnitt zeigt, wie dieses Unterfangen gelingen könnte.

Die Modellebene – Zeitsymmetrische kollapsfreie Teilchenmodelle

Das oben skizzierte Bild stellt einen Versuch dar, die fundamentalen Strukturen unserer Welt mit Hilfe von relationalen, nichtkausalen und raumzeitlosen Grundprinzipien zu beschreiben. Wie lassen sich auf dieser Grundlage echte physikalische *Modelle* entwerfen, die auch eine kausale Erklärungskraft besitzen, wie man es von einem guten Modell erwarten kann? Was steht am Ende der Suche nach dem Quantenmodell?

Zu dieser Frage gibt es eine gute Nachricht: wir kennen diese Modelle schon! Es sind die im zweiten und dritten Teil dieses Aufsatzes vorgestellten Interpretationen der Quantenmechanik. Genauer gesagt *einige* von ihnen, denn viele konnten ihr Grundversprechen nicht einlösen, ihre Grundannahmen plausibel zu machen und ein konsistentes und physikalisch konkretes Gesamtbild zu entwerfen. Statt diese meiner Meinung nach nicht erfolgreichen Versuche aufzuzählen, zu denen auch prominente Vertreter wie die Viele-Welten-Interpretation und die Kollaps-Theorien gehören, und die Argumente zur Aufdeckung ihrer Schwächen zu wiederholen, werde ich hier die positiven Beispiele herausstellen.

Auf fundamentaler Ebene ergibt es keinen Sinn, von Teilchen oder Wellen zu sprechen, sie enthält nur relative Quantenereignisse. Für die Modellebene ist es aber kaum möglich, eine physikalisch erfassbare Beschreibung der Mikrowelt ohne Teilchen oder Wellen zu entwickeln, denn sie bilden die Grundlage der Elektrodynamik und Atomphysik. Sind diese Konstrukte gleichwertig oder eignet sich eine von ihnen besser als Grundlage für konkrete physikalische Modelle?

Meiner Meinung nach hat diese Frage eine eindeutige Antwort. Sie wird von vielen namhaften Physikern unterstützt, ist aber nicht unumstritten, und entspricht auch nicht unbedingt dem üblichen Bild der Quantenmechanik und ihrer relativistischen Erweiterung, der Quantenfeldtheorie:

> *Auf der Modellebene der Quantenmechanik und der Quantenfeldtheorie besteht unsere Welt aus Teilchen.*

Wie gesagt, diese Behauptung wird längst nicht von allen Physikern geteilt, zumal es auch teilchenartige Ausprägungen von Wellenmodellen gibt. Die zentrale Bedeutung der Wellenfunktion in der Schrödinger-Gleichung sowie das „Feld" im Namen *Quantenfeldtheorie*

[18] Im zweiten Teil dieses Aufsatzes findet man mehr Details zu diesen Ansätzen. Es gibt mit der „GRW Flash" Theorie zwar eine Untervariante ohne direkten (prinzipiell messbaren) Konflikt mit der Relativitätstheorie, aber sie hat einige höchst unanschauliche Konsequenzen und kann vor allem nur einzelne Teilchen ohne jegliche Wechselwirkungen beschreiben.

scheint ebenfalls auf das Gegenteil hinzudeuten. Es gibt aber einige gewichtige Argumente zur Untermauerung dieser These:

- Wie in diesem Aufsatz bereits ausführlich erläutert wurde, gibt es viele Gründe für die Bevorzugung des Heisenberg- anstelle des Schrödinger-Bildes als beste Beschreibung der Mikrowelt. Die Wellenfunktion ist darin nur eine abgeleitete Hilfsgröße, die unser Wissen über die Messergebnisse wiedergibt. Selbst wenn man unbedingt am Schrödinger-Bild festhalten möchte, hat die Wellenfunktion trotz ihres Namens nur wenig Ähnlichkeit mit einem physikalischen „Feld", wie wir es aus anderen physikalischen Theorien kennen, was man schon an ihrer Dimensionalität sieht – sie hat keine direkte Entsprechung in unserem dreidimensionalen Raum.
- Es gibt viele Hinweise, siehe vorheriger Abschnitt, dass die quantenmechanischen Grundstrukturen *diskret* sind, was sehr gut zu den Teilchenmodellen passt.
- Die einzigen Objekte, die in der Speziellen Relativitätstheorie in konsistenter Weise mit lokalen Kausalwirkungen beschrieben werden können, sind punktartig.
- Selbst in der Elektrodynamik sind Felder weniger fundamental als üblicherweise angenommen. Die im dritten Teil dieses Aufsatzes beschriebene „Feynman-Wheeler Direct-Action Theorie" kann als unser bestes Modell für elektromagnetische Phänomene angesehen werden, und sie kommt auf fundamentaler Ebene ohne Felder aus, es ist eine reine Teilchentheorie.
- Wellen beschreiben auch in anderen physikalischen Theorien lediglich eine *statistische* Eigenschaft eines Teilchen-Ensembles. Wie Yakir Aharonov betont, lassen sich zum Beispiel elektromagnetische Felder nur dann definieren, wenn die Anzahl der mit ihnen verbundenen Photonen variabel ist. Man sollte daher ein einzelnes Photon nicht mit einer Welle identifizieren, und das gleiche gilt für Elektronen (Stichwort Doppelspaltversuch) und andere Einzelsysteme.
- Zur Quantenfeldtheorie: Es stimmt zwar, dass die Erweiterung auf dynamisch veränderliche Teilchenzahlen und speziellrelativistische Phänomene für viele Teilchenmodelle schwierig ist[19], aber auch für die feldbasierte Beschreibung konnte noch kein mathematisch konsistenter Formalismus entwickelt werden[20]. Die zweite Anmerkung besteht in der einfachen Feststellung, dass diese Theorie auch unter einem anderen Namen bekannt ist: „Elementarteilchen-Theorie". Sie handelt von Elektronen, Quarks, Neutronen, Higgs-Teilchen und zahlreichen anderen Teilchenarten. Sogar die Wechselwirkungen zwischen ihnen werden als Austausch bestimmter Arten von Teilchen verstanden. Man hofft, auf diese Weise irgendwann auch Gravitationsfelder über den Austausch von Teilchen beschreiben zu können, die „Gravitonen" getauft wurden.

Das beste Argument für die oben aufgestellte These besteht meiner Meinung nach in der Erkenntnis, dass die besten Modelle für eine konkrete Deutung der quantenmechanischen Phänomene *Teilchenmodelle* sind. Genau das soll der Inhalt dieses Kapitels sein. Diese

[19] Zwei exemplarische Herausforderungen sind das „Hegerfeldt Theorem" – jedes Teilchen hat eine nichtverschwindende Wahrscheinlichkeit, im nächsten Moment an einem beliebig weit entfernten Ort aufgefunden zu werden – und der „Unruh Effekt", nach dem die Anzahl von Teilchen vom Bewegungszustand des Beobachters abhängen kann.

[20] Diese Aussage mag überraschend klingen, aber schon 1955 wurde in Form des „Haagschen Theorems" bewiesen, dass freie und wechselwirkende Felder nicht von einem einheitlichen Formalismus beschrieben werden können. Bis zum heutigen Tag wurde keine mathematisch präzise Formulierung der Quantenfeldtheorie gefunden, auch wenn sich ihre heuristischen Methoden zur Ableitung konkreter Vorhersagen als erstaunlich erfolgreich erwiesen haben.

Interpretationen schließen sich nahtlos an die oben skizzierte fundamentale Ebene an. Sie haben einen realistischen Grundansatz, sind zeitsymmetrisch (erst ihre konkrete Anwendung in unserem zukunftsgerichteten Kontext führt zu einer ausgezeichneten Zeitrichtung), deterministisch, kollapsfrei und empirisch äquivalent zum orthodoxen Quantenformalismus. Sie benötigen auch keinen speziellen „Beobachter". Für Leser dieses Aufsatzes sind sie alte Bekannte:

Die überzeugendsten Ansätze auf der Modellebene der Quantenmechanik
sind die de Broglie – Bohm – Theorie und die Two-State Heisenberg Interpretation.

Wie man sich leicht vorstellen kann, ist diese Aussage noch umstrittener als das allgemeine Argument für teilchenbasierte Modelle. Diese Bilanz stellt meine persönliche Schlussfolgerung aus der jahrelangen Beschäftigung mit der Quantenmechanik und ihren unzähligen Deutungsversuchen dar. Sie ist aber nicht in Stein gemeißelt, zumal laufend an der Verbesserung dieser Modelle und an alternativen Ansätzen gearbeitet wird. Für die de Broglie – Bohm – Theorie kommt noch hinzu, dass sie sich in mehrere sehr unterschiedliche Spielarten aufspaltet, die ganz spezifische Vorzüge und Schwächen haben. Es bleibt daher äußerst spannend, wie sich diese Modellebene in den nächsten Jahren entwickeln wird!

Natürlich ist die Frage berechtigt, wie diese These zu den eindeutig vorhandenen Schwächen und offenen Fragen dieser Interpretationen passt, die ich bereits in diesem Aufsatz thematisiert hatte. Sie verdient eine differenzierte Antwort, die gleichzeitig noch einmal die Grundzüge dieser Ansätze zusammenfasst. Darin wird hoffentlich deutlich, dass viele scheinbare Schwachpunkte aus dem aussichtlosen Versuch resultieren, diese Modelle mit der fundamentalen Beschreibungsebene der Quantenmechanik gleichzusetzen.

Die de Broglie – Bohm – Theorie

Diese bereits im Jahr 1926 von Louis de Broglie vorgeschlagene und 1952 von David Bohm in leicht veränderter Form zu neuem Leben erweckte Theorie[21] hat ein einfaches Grundprinzip:
Unsere Welt besteht aus punktförmigen Teilchen, die sich auf konkreten Trajektorien durch unseren dreidimensionalen Raum bewegen.

Abb. 3: Louis de Broglie, David Bohm und John Stuart Bell

Der einzige und entscheidende Unterschied zur Klassischen Physik besteht darin, dass ihre Bewegungen von der Wellenfunktion (de Broglie Version, wirkt direkt auf ihre Geschwindigkeiten) beziehungsweise vom Quantenpotential (Bohm Version, wirkt auf ihre Beschleunigungen) gelenkt werden, nämlich in Form der Schrödinger-Gleichung. Diese Kausalwirkung ist nichtlokal, das heißt Änderungen dieses Potentials oder Feldes können sich

[21] Wie in einer früheren Fußnote erwähnt, kann man diesen Ansatz entweder als reine Interpretation der Quantenmechanik ansehen oder als eine allgemeinere Theorie, welche die Quantenmechanik nur als Grenzfall in dem (aktuell vorliegenden) Gleichgewichtszustand enthält, der der Bornschen Regel entspricht.

augenblicklich auf beliebig weit entferne Teilchen auswirken. Überlichtschnelle Signale werden dadurch nicht ermöglicht, das ist keine Zusatzannahme, sondern eine Folge der konkreten Modelleigenschaften.

Die Vorzüge dieses Modells können sich sehen lassen. Neben der konkreten Antwort auf die Frage, welches die Grundelemente in unserem dreidimensionalen Raum sind, benötigt es weder einen zusätzlichen Kollapsprozess noch eine besondere Rolle des „Beobachters", und diese Theorie ist vollkommen deterministisch. Jede Messung führt zu einer genau festgelegten Änderung der Teilchenpositionen, was zusammen mit unser Unkenntnis ihrer Anfangspositionen (nur dieser Umstand ist der Ursprung der „zufälligen" Messergebnisse) zu den exakt gleichen quantenmechanischen Vorhersagen und Wahrscheinlichkeiten wie die orthodoxe Quantenmechanik führt.

Auch die Elektronen im Doppelspaltexperiment haben in diesem Bild ganz konkrete Bahnen, entweder durch den oberen *oder* den unteren Spalt. Sie werden von der genauen Form des Quantenpotentials bestimmt, welches wiederum davon abhängt, ob nur einer oder beide Spalte geöffnet sind.

Ein anderes Beispiel: in einem Wasserstoffatom wird das Elektron nicht als „Wahrscheinlichkeitswolke" um das Proton gesehen, sondern würde an einer bestimmten Position relativ zum Proton bewegungslos verharren, vom Quantenpotential vor dem Sturz in das elektrisch anziehende Atomzentrum geschützt. Ein gänzlich anderes Bild als es uns die Schulphysik vermittelt! Es ist nicht unbedingt „richtiger" als das übliche Bild, aber bietet eine mindestens ebenso erfolgreiche *alternative* Darstellung der quantenmechanischen Phänomene, und genau das zeichnet ein gutes Modell aus.

In diesem Aufsatz wurden aber auch schon einige Schwachpunkte dieser Interpretation thematisiert. So geben die nichtlokalen Kausalwirkungen den Zeitpunkten „vor" und „nach" einer Messung eine absolute Bedeutung, was nicht zu dem relativistischen Prinzip der Gleichberechtigung aller Bezugssysteme passt und eine Erweiterung auf die speziellrelativistische Quantenfeldtheorie erschwert. Offen bleibt auch die Frage nach der physikalischen Interpretation der 3N-dimensionalen Wellenfunktion, beziehungsweise des Quantenpotentials, die zu einer unbefriedigenden Dualität der Grundelemente führt. Eine direkte Beschreibung der fundamentalen Ebene der Quantenmechanik kann diese Theorie daher nicht liefern. Für eine *modellhafte* Beschreibung ist sie aber überaus nützlich, zumal in diesem Aufsatz bereits einige Theorievarianten vorgestellt wurden, die viele dieser Schwächen beseitigen können:

- Die „Hydrodynamische" Reformulierung, in der die Wellenfunktion nur noch die Rolle einer sekundären abgeleiteten Größe spielt.
- Die „Nominale" Interpretation, in der die universelle Wellenfunktion als Teil eines Naturgesetzes statt als real vorhandenes physikalisches Feld gedeutet wird.
- Konkrete Ansätze für eine speziellrelativistische Erweiterung dieser Theorie, auch wenn sie noch nicht die gesamte Quantenfeldtheorie abdecken können.
- Ebenfalls noch nicht vollständig, aber konzeptionell vielleicht sogar noch aussichtsreicher, ist die im dritten Teil dieses Aufsatzes vorgestellte retrokausale Theorievariante. Sie stellt die Gleichberechtigung aller Bezugssysteme wieder her, benötigt keine Elemente außerhalb unser vierdimensionalen Raumzeit und kann die von Einstein so betitelten „spukhaften" Fernwirkungen, wie sie sich im Kontext des Bellschen Theorems zeigen, in einer sehr konkreten Weise erklären.

Der große John Bell ist es auch, dessen Zitat den Abschluss dieses Kapitels bilden soll:

> *„In 1952 I saw the impossible done. It was in papers by David Bohm.*
> *Why is the pilot wave picture ignored in textbooks? Should it not be taught,*
> *not as the only way, but as an antidote to the prevailing complacency?*
> *To show us that vagueness, subjectivity, and indeterminism are not forced on us*
> *by experimental facts, but by deliberate theoretical choice?"*

Die Two-State Heisenberg Interpretation

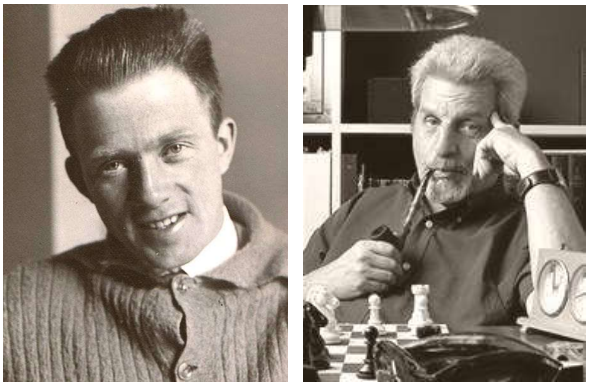


Abb. 4: Werner Heisenberg und Yakir Aharonov

Der Two-State Formalismus von Yakir Aharonov beruht auf einer Verdopplung der physikalischen Zustände, von denen sich die eine Hälfte in Zukunfts- und die andere in Vergangenheitsrichtung entwickelt. Das widerspricht natürlich vollkommen unser Alltagssicht. Wie schon ausführlich angemerkt wurde – sowohl in diesem Aufsatz als auch in **Auf der Suche nach der Zeit** – erscheint uns diese Sichtweise aber nur aus unserer menschlichen zukunftsorientierten Sicht ungewöhnlich, da wir die zukünftigen Randbedingungen aufgrund des thermodynamischen Zeitpfeils nicht kennen. Aus physikalischer Sicht, und das gilt nicht nur für die Quantenmechanik, sondern für *alle* grundlegenden physikalischen Theorien, haben solche Endbedingungen den gleichen Status wie Anfangsbedingungen.

Auch die retrokausale „Transactional Interpretation" von John Cramer und Ruth Kastner stellt meiner Meinung nach ein nützliches Modell dar, das viele quantenmechanische Phänomene erklären kann. Mit seiner zeitlichen Irreversibilität und der engen Kopplung mit der Wellenfunktion erschwert dieses Modell aber die Anknüpfung an die fundamentale Ebene der Quantenmechanik.

Die Grundelemente der Two-State Heisenberg Interpretation sind die zeitveränderlichen Operatoren aus dem Heisenberg-Bild. Diese Neuninterpretation stellt eine deutliche Verbesserung von Aharonovs früherem Ansatz auf Basis des Schrödinger-Formalismus dar. Diese Operatoren, mathematisch gesehen Matrizen, lassen sich im Rahmen von Carlo Rovellis Relationalen Interpretation als Projektionen der relativen Quantenereignisse auf den raumzeitlichen Kontext des jeweiligen Messaufbaus deuten. Sie beschreiben demnach das Ergebnis von möglichen zukünftigen Messungen, die an einem bestimmten Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt stattfinden. Die zugrundeliegenden Quantenereignisse kann man entweder als relative Eigenschaften von Elementarteilchen ansehen oder die Eigenschaften selbst als fundamental ansehen, wonach sämtliche „Dinge" nur abgeleitete Konzepte wären, die aus einem Bündel oder Netzwerk von Eigenschaften bestehen. Die Wellenfunktion spielt in dieser Interpretation (anders als in der Transactional Interpretation) nur eine untergeordnete Rolle als Beschreibung unseres Wissens über bereits aufgenommene Quantenereignisse.

Dieser Ansatz kommt genauso wie die de Broglie – Bohm – Theorie ohne einen physikalischen Kollapsprozess aus und benötigt auch keine besondere „Beobachter"-Rolle.

Auch in der Sichtweise dieses Modells ist die Quantenmechanik eine vollkommen deterministische Theorie. Die scheinbare Zufälligkeit der Messergebnisse entsteht hier aus unserer Unkenntnis der zukünftigen Randbedingungen, die nicht identisch mit den Messergebnissen sind, sondern gemeinsam mit den Anfangsbedingungen zu diesen Ergebnissen führen, in völliger Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Daten.

Die fundamentale Ebene kann dieses Modell nicht abdecken, auch wenn es sich wie oben beschrieben in natürlicher Weise mit den Grundkonzepten der Relationalen Interpretation verbinden lässt. Der Übergang von der quantenmechanischen in die klassische Welt wird zum Beispiel in Rovellis Ansatz deutlicher – bei der Two-State Interpretation ist man auf die Annahme von vergangenen und zukünftigen Makrozuständen angewiesen, zum Beispiel im Rahmen kosmologischer Randbedingungen. Aus fundamentaler Sicht scheint außerdem die Verdopplung der Zustände sehr verschwenderisch, gerade *weil* diese Interpretation retrokausale Effekte und finale Randbedingungen ernst nimmt, die eigentlich zu einer Reduzierung statt einer Erweiterung der physikalischen Entwicklungsmöglichkeiten führen.

Es gibt somit gute Gründe, die Two-State Heisenberg Interpretation auf der Modellebene angesiedelt zu sehen, auch wenn die Übergänge zur fundamentalen Ebene fließend sind. Dieser Ansatz ermöglicht trotz seiner unanschaulichen Grundprämisse neue Perspektiven für noch unentdeckte Eigenschaften und Anwendungen der Quantenmechanik, und genau das muss ein gutes Modell liefern. Mit dem Aharonov-Bohm-Effekt hat die Arbeitsgruppe um Yakir Aharonov bereits eine erstaunliche neue Entdeckung gemacht und ihre aktuellen Forschungen könnten sich gerade für anwendungsbezogene Themen wie Quantenkommunikation und Quantenkryptografie als sehr wertvoll erweisen – und zu neuen Überraschungen führen.

Das Fazit lautet somit: Die Welt der kleinsten Teilchen bleibt für uns unanschaulich, aber in den letzten Jahrzehnten wurden sowohl grundlegende Erklärungsmuster wie die Relationale Interpretation als auch konkrete Modelle wie die Two-State Heisenberg Interpretation und verbesserte Versionen der de Broglie – Bohm – Theorie entwickelt, die uns einer Deutung der rätselhaften Phänomene näherbringen. Die quantenmechanische Welt enthält noch viele unerforschte Gebiete und hat nichts von ihrer Faszination eingebüßt!

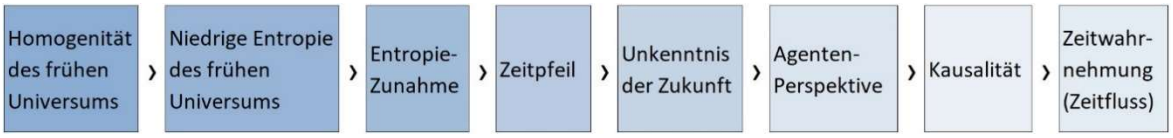
Ein Grundriss zur Interpretation der Quantenmechanik

Als Abschluss dieses Aufsatzes möchte ich meine Versuche vorstellen, die Erkenntnisse über die Interpretation der Quantenmechanik schematisch zusammenzufassen. Auch die Ursprünge des Zeitpfeils und unserer Wahrnehmung der Zeit tauchen darin auf. Sowohl die Inhalte als auch die gewählte Art der Kategorisierung spiegeln meine eigenen Einschätzungen wider und sind dementsprechend in höchstem Maße diskutabel.

Das erste Diagramm zeigt meinen Versuch, die physikalischen Beschreibungsebenen zu benennen und in Relation zu setzen. Unsere Alltagswelt basiert auf zukunftsgerichteten mit dem Entropiewachstum verbundenen Phänomenen, die man (zusammen mit geeigneten Randbedingungen, die für die Ausbildung des Zeitpfeils einen kosmologischen Ursprung haben) auf die Klassische Mechanik zurückführen kann. Diese basiert wiederum auf unserer besten mikroskopischen Theorie, der Quantenfeldtheorie als speziellrelativistische Erweiterung der Quantenmechanik. In der darunter liegenden Ebene spiegelt sich die Erkenntnis der Relationalen Interpretation wider, dass der Kern der Quantenmechanik raumzeitlos ist und somit *neben* der Relativitätstheorie steht. Ihre gemeinsame Grundlage ist die noch unbekannte Theorie der Quantengravitation.

<table>
<tr><th colspan="4">Physikalische Ebenen</th><th>Materie</th><th>Raumzeit</th><th>Zeitpfeil</th><th>Kausalität</th><th>Zeitfluss</th></tr>
<tr><td colspan="4">Alltagswelt
(Agentensicht)</td><td rowspan="2">Dinge</td><td>3D + Zeit
(Bewusstsein)</td><td>→
(typisch entrop.)</td><td>→
(typisch entrop.)</td><td>→
(Bewusstsein)</td></tr>
<tr><td colspan="4">Phänomenologische Welt
(Thermodynamik)</td><td rowspan="4">4D
(emergent)</td><td>→ / (←)
(kosmologisch)</td><td>→ / (←)
(entropisch)</td><td rowspan="4">X</td></tr>
<tr><td colspan="3">Makrowelt
(Klassische Mechanik, Elektrodynamik)</td><td>(Newton-Gravitation)</td><td>Teilchen
und Wellen</td><td rowspan="3">↔
(emergent)</td><td rowspan="2">↔
(modellhaft)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Mikrowelt
(Quantenfeldtheorie)</td><td>[semiklassische
Quantengravitation]</td><td>Teilchen</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Materie
(Quantenmechanik)</td><td>Flache Raumzeit
(Spez. Relativitätstheorie)</td><td rowspan="2">Gekrümmte Raumzeit</td><td rowspan="2">Relative
Quanten-
ereignisse</td><td rowspan="2">X</td></tr>
<tr><td colspan="2">(Allgemeine Relativitätstheorie)</td></tr>
<tr><td colspan="4">Raumzeit-Materie
(Quantengravitations-Theorie)</td><td>unbekannt</td><td>X</td><td>X</td></tr>
</table>

Die rechte Seite zeigt dabei, auf welcher Ebene sich Aspekte wie der zukunftsgerichtete Zeitpfeil oder der von uns erlebte Fluss der Zeit ausbilden. Etwas genauer gibt es die im folgenden Bild dargestellten Ableitungsstufen. Der kosmologische Ursprung des Zeitpfeils gilt mittlerweile als allgemein anerkannte Erklärung; das auf unserer Agentensicht beruhende Kausalitätsmodell habe ich von Huw Price übernommen.



Das folgende Diagramm zeigt eine mögliche Klassifikation der wichtigsten Interpretationen der Quantenmechanik. Sie orientiert sich an der Frage, was die Grundelemente unserer Welt (John Bells „Beables“) ausmacht, die in Klammern unter den Namen stehen. Ist die Wellenfunktion Psi real („Psi-Ontic“) oder nur ein Ausdruck unseres Wissens („Psi-Epistemic“)? Benötigt man nur die Wellenfunktion („Psi-Complete“) oder gibt es noch andere im quantenmechanischen Formalismus nicht offenkundige „versteckte“ Elemente? Oder sollte man auf fundamentaler Ebene gänzlich auf solche festen Grundelemente verzichten, wie es

die kontextuellen Interpretationen fordern? Die Einfärbung entspricht meiner eigenen Einschätzung dieser Ansätze, von problematisch in hellblau bis überzeugend in dunkelblau.

Psi-Ontic			
Psi-Complete (Psi)		**Psi-Incomplete (Psi + other Beables)**	
Standard (3N)		**Standard (3N+3D)**	**Retrocausal (3N)**
Physical Collaps	GRW-0 (3N psi)	GRW-M (3N guide field & mass density) GRW-F (3N guide field & flashes) Other Collapse Theories	Transactional (3N ret. & av. waves) Probabilistic Transactional (3N modal ret. & av. waves)
No Collaps	Many Worlds (3N psi)	dB-B-Theory (3N guide field & particles)	Two-State Two Times (3N ret. & av. waves)
	Many Minds	Modal	

Psi-Epistemic (Psi-Statistical)			
Specific Beables		**Contextual**	
Standard (3D)	**Retro- or Non-causal (4D)**	**System-related**	**Observer-related**
<not possible due to No Go Theorems like Bell and PBR>	Two-State Heisenberg (operators/particles) Nomologic dB-B Theory (particles) Retrocausal dB-B Theory (particles)	Relational (relational quantum events) Relational Block World (spacetimesource elements)	Qbism (agnostic) Copenhagen (macro world)

Die wichtigsten Interpretationen sind im folgenden Diagramm noch einmal genauer dargestellt. Auf fundamentaler Ebene ist es Carlo Rovellis Relationale Interpretation und auf Modellebene sind es die Teilchenmodelle: Die de Broglie – Bohm – Theorie, inklusive der nichtkausalen „Nominalen" Deutung und der noch nicht vollständig modellierten retrokausalen Variante, sowie Aharonovs retrokausale Two-State Interpretation im Heisenberg-Bild. Diese Interpretationen und Modelle sehe ich als Antwort auf die Frage, wie man die Quantenmechanik am besten deuten kann.

Ebene	**Interpretation**		**Grundelemente**
Modell	Standard dB-B-Theory (3D+3N, kausal, dual, nichtrelativ.)	Two-State Heisenberg (4D, kausal, doppelte Zustände)	Teilchen
	Retrocausal dB-B-Theory (4D, kausal, komplex, nur Teilmodell)		
	Nominal dB-B-Theory (4D, nichtkausal, QG-spekulativ)		
Fundament	Relational (Contextual) Interpretation (raumzeitlos, nichtkausal)		Relative Quantenereignisse

Damit ist alles gesagt, was ich zu dieser noch immer aktiven Suche nach dem besten Quantenmodell beitragen kann. Zeit für ein wirklich allerletztes Kapitel.

Auf der Suche nach dem Quantengravitationsmodell

Zu der Suche nach einer vereinheitlichten Theorie aus Quantenmechanik und Allgemeiner Relativitätstheorie, die in gewisser Weise den Abschluss der Theoretischen Physik markieren würde, möchte ich ein Zitat von Carlo Rovelli anführen:

> *„After the discovery of general relativity we are no longer sure of what is space-time*
> *and after the discovery of quantum mechanics we are no longer sure of what matter is.*
> *The very distinction between space-time and matter is likely to be ill-founded.*
> *I think it is fair to say that today we do not have a consistent picture of the physical world."*

Wir haben über hundert Jahre gebraucht, um eine konsistente und zumindest ansatzweise verständliche Deutung der Quantenmechanik zu finden. Wie viel schwerer wird uns wohl das Verständnis einer Theorie fallen, in der die Begriffe *Materie*, *Zeit* und *Raum* miteinander verschmelzen und ihre Bedeutung verlieren? Ist die gesamte Raumzeit ein „emergentes" Phänomen, nicht mehr als ein Muster von diskreten Grundzuständen, das lediglich in unserer menschlichen Sicht als Fundament der Welt erscheint, in der wir leben?

Niemand kann garantieren, dass wir die Antworten auf diese Fragen finden werden, aber die Reise dorthin verspricht überaus spannend zu werden!

Bildreferenzen

Abb. 1 & 4l:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Heisenberg,Werner_1926.jpeg / Autor: Friedrich Hund / Creative Commons Attribution 3.0 Unported

Abb. 2:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CarloRovelli.JPG / Autor: Temugin / Creative Commons Attribution-Share Alike 2.5 Generic license

Abb. 3:
- 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
- https://cds.cern.ch/record/1823937 / Autor: CERN / Creative Commons „Namensnennung 4.0 international"

Abb. 4r:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Yakir_aharonov.jpg / Autor: Kobi Kalmanovich / Free to use