Auf der Suche nach dem Quantenmodell

Teil 3 – Zeitlose Perspektiven

Friedrich Wagner, www.frwagner.de, April 2022

Wie wir im zweiten Teil dieses Aufsatzes gesehen haben, hat es in den letzten Jahrzehnten trotz intensiver Bemühungen nicht eine einzige Interpretation der Quantenmechanik geschafft, eine überzeugende Erklärung für die rätselhaften Phänomene zu finden, die im ersten Teil vorgestellt wurden. Tragen die subjektivistischen Ansätze, die für zentrale Fragen gar keine Erklärungen liefern, ja den Verzicht auf Erklärungen zum Programm erhoben haben, in dieser Debatte tatsächlich den Sieg davon? Das klägliche Scheitern der realistischen Alternativen scheint diesen Schluss nahe zu legen.

Besonderes Kopfzerbrechen bereitet den Physikern das Phänomen der Verschränkung, die von Albert Einstein so betitelten „spukhaften Fernwirkungen". Seit der experimentellen Überprüfung des Bellschen Theorems wissen wir, dass sie – sofern man den Versuch einer realistischen Naturbeschreibung nicht von vorneherein aufgibt – ein Teil der Welt sind, in der wir leben. Mit der de Broglie – Bohm – Theorie wurde bereits ein physikalisches Modell vorgestellt, das nichtlokale Kausalwirkungen, in diesem Fall augenblickliche Änderungen der Teilchenpositionen bei Änderung der Wellenfunktion oder des Quantenpotentials, zum Prinzip erklärt hat und zu den gleichen empirischen Vorhersagen wie die Quantenmechanik kommt. Dieses Modell lässt sich aber nur schwer auf die relativistische Physik erweitern, es verstößt sogar gegen ein Grundprinzip der Relativitätstheorie in Form der Gleichberechtigung aller Bezugssysteme. Es benötigt außerdem weiterhin die 3N-dimensionale Wellenfunktion (oder das Quantenpotential), deren Entsprechung in unserer dreidimensionalen Welt ungeklärt bleibt.

Es gibt aber ein alternatives Erklärungsmodell. Das Bellsche Theorem lässt sich nur unter einer bestimmten Grundannahme ableiten, die so selbstverständlich klingt, dass sie lange nicht in Frage gestellt wurde: Ein Ereignis kann von Ereignissen in seiner Vergangenheit beeinflusst werden, aber nicht von Ereignissen in seiner Zukunft. Diese Aussage trifft in unserer Alltagswelt selbstverständlich zu, niemand kann die Vergangenheit verändern. Aber gilt sie auch ausnahmslos in der Welt der kleinsten Teilchen? Es gibt eine wachsende Schar von Physikern, die genau das bezweifelt. In diesem dritten Teil meines Aufsatzes werde ich versuchen zu erklären, warum es für diesen Zweifel sehr gute Gründe gibt und welche zusätzlichen Interpretationsmöglichkeiten der Quantenmechanik dieser Aspekt eröffnen könnte – bis hin zu einer realistischen und vollkommen mit der Relativitätstheorie vereinbaren Erklärung des „spukhaften" Phänomens der Verschränkung.

Bereit für den nächsten Teil der Reise?

Die Zeit ist kein Fluss, sondern eine Landschaft

Um die in diesem Teil vorgestellten Interpretationen der Quantenmechanik verstehen zu können, möchte ich zunächst beschreiben, wie die Rolle der Zeit in der aktuellen Physik gesehen wird. Das daraus resultierende Bild dürfte für viele Leser überraschend sein. Mehr noch, es stellt unser Alltagsverständnis der Zeit als unaufhaltsam dahinfließender Fluss vollkommen auf den Kopf. Es ist daher auch sehr schwer vorstellbar und auf den ersten Blick unglaubwürdig, und doch haben uns unsere wissenschaftlichen Erkenntnisse zu genau diesem Bild geführt, in stärkstem Maße Einsteins Relativitätstheorie. Vorhang auf für einen Absatz, der es in sich hat:

> *Die Raumzeit liegt als vierdimensionales Blockuniversum vor,*
> *in dem Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft gleichermaßen real sind.*
> *Die Auszeichnung der Gegenwart und der scheinbare Fluss der Zeit*
> *finden sich nicht in der physikalischen Naturbeschreibung, sondern sind ein*
> *integraler Teil unserer Perspektive, wie wir als Menschen die Welt wahrnehmen.*

Oder wie es der amerikanische Schriftsteller Thornton Wilder formuliert:

> *„Nur dem Anschein nach ist die Zeit ein Fluss. Sie ist eher eine grenzenlose Landschaft, und was sich bewegt, ist das Auge des Betrachters."*

Die folgende Abbildung illustriert diesen Grundansatz:

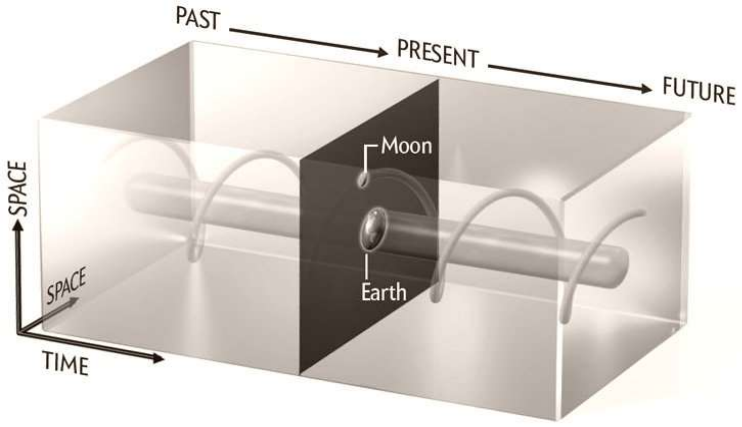

Abb. 1: Die Erde und ihr umkreisender Mond im vierdimensionalen Blockuniversum (mit nur zwei dargestellten Raumdimensionen). Jeder Punkt, das heißt jedes Ereignis, ist darin gleichermaßen real. Die dunkel dargestellte Hyperfläche ist nur eine von unendlich vielen gleichberechtigten Möglichkeiten, dreidimensionale „Gegenwarts-Scheiben" zu definieren.

Dieses Bild entspricht dem aktuellen Stand der Wissenschaft und wird zwar nicht von allen, aber doch von der großen Mehrheit der Physiker und „Zeitforscher" geteilt. Trotzdem ist es schwer zu glauben. Wie können solch fundamental erscheinende Konzepte wie die Auszeichnung des gegenwärtigen Moments und das Dahinfließen der Zeit nicht Teil unserer besten physikalischen Theorien sein, deren Anspruch doch ist, die Welt zu beschreiben, in der wir leben?

Die Antwort darauf ist zweiteilig. Zum einen haben sich Konzepte wie der Fluss der Zeit für den empirischen Erfolg der physikalischen Theorien als *überflüssig* – ja sogar als *hinderlich* – erwiesen. In *keiner* unserer fundamentalen Theorien, die im Mikro- wie im Makrobereich mit fantastischer Messgenauigkeit bestätigt wurden, findet sich eine grundsätzliche Unterschei-

dung von Vergangenheit und Zukunft. Der gegenwärtige Moment oder ein Zeitfluss tauchen darin schlichtweg nicht auf. Sie sind sogar vollkommen symmetrisch bezüglich zeitlicher Veränderungen in Zukunfts- und Vergangenheitsrichtung! Jede Vorhersage für ein zukünftiges Ereignis basierend auf dem aktuellen Kenntnisstand funktioniert in exakt gleicher Weise auch für die Vorhersage, welche Voraussetzungen es in der Vergangenheit gegeben haben müsste, um den aktuellen Zustand zu erzielen. Nur wenn man asymmetrische Randbedingungen von außen voraussetzt, also händisch einführt, erhält man eine zeitliche Richtung.

Ein Beispiel dafür wäre es, eine aus statistischer Sicht extrem unwahrscheinliche Anfangskonfiguration als Ausgangspunkt zu nehmen, zum Beispiel ein zusammenhängender Klecks Milch in einer Kaffeetasse, ohne sie als Randbedingung für den zukünftigen Zustand des Systems festzusetzen. In diesem Fall gibt es einen zukunftsgerichteten Prozess, die Milch löst sich auf, aber die zugrundeliegende Physik für die Bewegungen der Milch- und Kaffeeteilchen ist vollkommen zeitsymmetrisch. Der Gesamtprozess entspricht einer Erhöhung der *Entropie*, wie sie von den phänomenologischen Regeln der Thermodynamik beschrieben wird. Die Anwendungen der fundamentalen physikalischen Theorien – sei es Klassische Mechanik, Elektrodynamik, Relativitätstheorie oder Quantenmechanik – kommen somit zu den richtigen Schlussfolgerungen über zukünftige Abläufe, ohne selbst einen Zeitpfeil besitzen zu müssen. Lediglich durch den Umstand, dass sich das frühe Universum in einem Zustand extrem niedriger Entropie befand, in Form seiner Gravitations-trotzenden räumlichen Homogenität, gibt es so viele Systeme mit niedriger Entropie, die zu dem alltäglich beobachtbaren Zeitpfeil führen. Dieser Zusammenhang ist auf der linken Seite von Abbildung 3 dargestellt. Eine entscheidende Rolle spielt dabei die Strahlung unserer Sonne, die sich als stärkste Entropiequelle für die Geschehnisse auf unserer Erde erweist. Eine gute Beschreibung dieses Themas findet man zum Beispiel in dem Buch „Time's Arrow and Archimedes' Point" von Huw Price (1997), das sich bezüglich vieler Aspekte der Zeit als wegweisend erwiesen hat.

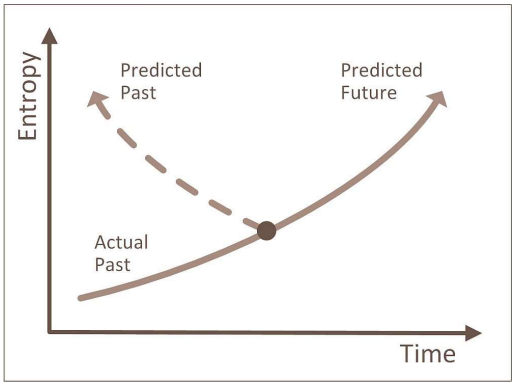

Abb. 2: Der Zeitpfeil beruht auf der Zunahme der Entropie als Maß der Unordnung. Die Statistische Mechanik sagt allerdings einen Anstieg in beide Zeitrichtungen voraus, daher ist man auf spezielle Anfangsbedingungen angewiesen.

Der zweite Teil der Antwort besteht darin, dass man selbst für das Verständnis unseres Alltagsbildes der Zeit gar keinen objektiven, d.h. in irgendeiner Form physikalisch fundamentalen Zeitfluss benötigt. Dies zeigt der rechte Teil von Abbildung 3. Wenn es überhaupt einen Zusammenhang gibt, dann ist es sogar das Blockuniversum, welches sich als die natürlichste Grundlage für die Rekonstruktion unseres Zeitempfindens mit seinem mehrere Sekunden dauernden Gegenwarts-„Moment" herausgestellt hat. Ein Fluss der Zeit zeigt sich ausschließlich in unserer menschlichen Perspektive – es ist nicht die Zeit selbst, die fließt, sondern einzig *unsere Projektion der Gegenwart*. Das macht das Verstreichen der Zeit nicht etwa zu einer Illusion, und führt auch nicht zu einem fatalistischen Weltbild, denn *für uns* ist der Zeitfluss, die Offenheit der Zukunft und damit die Möglichkeit eines freien Willens keine Täuschung, sondern absolut real. Das ist aber kein Widerspruch zu der Aussage, dass es physikalisch betrachtet keinen grundsätzlichen Unterschied zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft gibt. Die zukünftigen Ereignisse sind demnach – wie gesagt aus physikalischer Sicht – genauso real und unveränderlich wie die Ereignisse der Vergangenheit.

Abb. 3: Links: Der in unser Welt allgegenwärtige Zeitpfeil entsteht aus dem Anstieg der Entropie, der seinen Ursprung letztendlich in den besonderen Eigenschaften des frühen Universums hat. Rechts: Unsere Zeitwahrnehmung basiert auf unserer zukunftsgerichteten Agentensicht und benötigt dafür keinen objektiven Fluss der Zeit.

Wie gesagt, trotz aller Erklärungen bleibt diese Sicht höchst ungewohnt für uns. Zu naheliegend sind die Fehlschlüsse, dass daraus eine für uns unveränderliche und nicht beeinflussbare Zukunft folgen würde, was auch keinen freien Willen ermöglichen würde, oder dass sich andersrum der Fluss der Zeit auch in den physikalischen Theorien widerspiegeln müsste. Beides ist nicht der Fall. Zu dieser Suche nach einem stimmigen Bild der Zeit habe ich letztes Jahr einen eigenen Aufsatz geschrieben, der das Thema ausführlich beleuchtet:

Auf der Suche nach der Zeit

In diesem Aufsatz geht es aber um die Quantenmechanik, daher werde ich von nun an einfach davon ausgehen, dass diese Auffassung von Zeit und Raum korrekt ist. Selbst wer von diesem Bild nicht vollkommen überzeugt ist, und das werden angesichts unserer tief verwurzelten Ansichten über die Zeit sicherlich einige Leser sein, kann die nachfolgenden Betrachtungen immer noch als interessantes Gedankenspiel betrachten, was aus diesem Ansatz bezüglich der Interpretation der Quantenmechanik folgen *würde*. Ich selbst bin davon überzeugt, dass die dadurch eröffneten Möglichkeiten einen Schlüsselaspekt zum Verständnis der quantenmechanischen Welt – unserer Welt – darstellen.

Schließen möchte ich diesen Abschnitt mit einem Zitat von Hermann Weyl, einer der letzten Universalgelehrten auf dem Gebiet der Mathematik, Physik und Philosophie. Er fasst unsere Erkenntnisse über die Natur der Zeit wunderschön zusammen.

“The objective world simply is,
it does not happen.
Only to the gaze of my consciousness,
crawling upward along the life line of my body,
does a section of this world come to life
as a fleeting image in space
which continuously changes in time.”

(H. Weyl)

Abb. 4: Der „Fluss“ der Zeit ist keine Illusion, aber er ist nicht Teil der physikalischen Naturbeschreibung, sondern ein integraler Bestandteil unserer menschlichen Perspektive.

Die Zukunft ist jetzt

Ein entscheidender Baustein fehlt noch, bevor ich die versprochenen zusätzlichen Interpretationsmöglichkeiten der Quantenmechanik vorstellen kann. Er basiert auf den Erkenntnissen aus dem vorigen Abschnitt. Im Grund folgt er sogar aus ihnen, wenn man nicht auf die alltägliche Sichtweise der Zeit zurückverfällt, aber das macht ihn nicht weniger ungewöhnlich – und auf den ersten Blick auch unglaubwürdig. Nicht alle Physiker sind der Meinung, dass man ihn für wortwörtlich wahr oder fundamental halten sollte, aber er hat ein neues Fenster für das Verständnis der Quantenwelt geöffnet und die Schar der Physiker, die ihn unterstützen, hat in den letzten Jahrzehnten stetig zugenommen. Hier kommt er:

> *Ein Ereignis kann von anderen Ereignissen in seiner Vergangenheit,*
> *aber auch von Ereignissen in seiner Zukunft beeinflusst werden.*

Klingt das schwer vorstellbar? Für mich selbst und sicherlich auch die meisten Leser ist das sicherlich der Fall. Wir sind schließlich temporal denkende und handelnde Wesen, für die sich Vergangenheit und Zukunft grundlegend voneinander unterscheiden. Es wäre aber voreilig, aus der fehlenden Anschaulichkeit abzuleiten, dass die Aussage offenkundig falsch ist. Warum sollten unsere Erfahrungswerte, die wir uns im Lauf der menschlichen Evolution in unserer alltäglichen Welt angeeignet haben, auch in der Welt der Elektronen und Atome ein verlässlicher Führer sein? Für diesen historischen Trugschluss gäbe es auch außerhalb der Quantenmechanik genügend Gegenbeispiele.

Ich hoffe außerdem, dass der letzte Abschnitt und mein Aufsatz über die Suche nach der Zeit dieser Aussage zumindest ein wenig seinen Schrecken genommen hat. Der Zusatz „seiner" Vergangenheit beziehungsweise Zukunft berücksichtigt die Erkenntnisse der Relativitätstheorie, nach der es keine Bezugssystem-unabhängige absolute Grenze zwischen Vergangenheit und Zukunft gibt. Jedes Ereignis hat seinen eigenen Lichtkegel in Vergangenheitsrichtung und in Zukunftsrichtung, wie in dem folgenden Bild dargestellt:

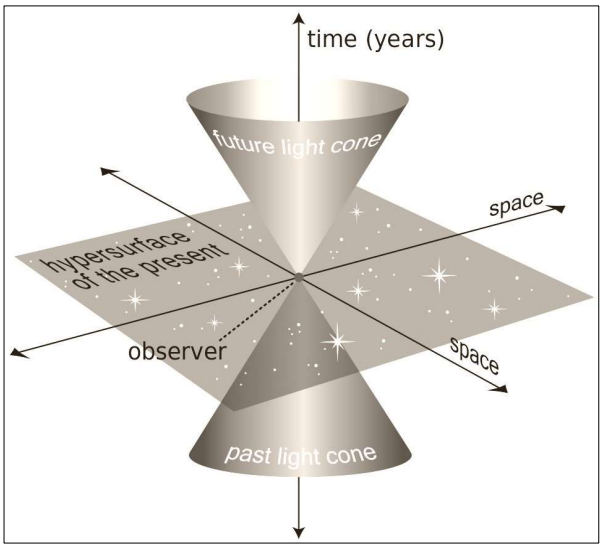

Abb. 5: Vergangenheits- und Zukunfts-Lichtkegel in der Relativitätstheorie.
Da sich kein Signal schneller als das Licht ausbreiten kann, sind Kausalbeziehungen mit Ereignissen außerhalb dieses Doppel-Lichtkegels ausgeschlossen.

Und tatsächlich – wenn zukünftige Ereignisse genauso real wie vergangene sind, genau das ist das Bild des vierdimensionales Blockuniversums, welchen Grund hätten wir dann, kausale Ursachen einseitig auf die Vergangenheit zurückzuführen?

Zugegebenermaßen scheint es neben unserem Alltagsverständnis auch einige ganz konkrete Argumente dafür zu geben, dass kausale Wirkungen nur in Zukunftsrichtung stattfinden können. Hier sind die prominentesten:

1. Zukünftige Ereignisse liegen noch gar nicht fest und sind daher anders als vergangene noch gar nicht real, wie sollen sie dann gegenwärtige Ereignisse beeinflussen können?
2. Spiegeln neben unserer alltäglichen Erfahrung nicht auch sämtliche physikalische Theorien den Umstand wieder, dass Ursache-Wirkungs-Ketten ausnahmslos in Zukunftsrichtung stattfinden?
3. Wären derartige Kausalwirkungen nicht im Widerspruch zur Entropieerhöhung, die ausschließlich in Zukunftsrichtung stattfindet?
4. Wenn es wirklich Kausalwirkungen in Vergangenheitsrichtung geben würde, hätten wir dann nicht schon längst von diesem bizarren Phänomen gehört?
5. Ist meine Oma in Gefahr?

Der letzte Punkt spielt natürlich auf das oft zitierte Zeitreise-Paradoxon an: Wenn Auswirkungen auf die Vergangenheit möglich wären, könnte man in die Vergangenheit reisen (oder diese entsprechend beeinflussen) und seine eigene Großmutter töten, bevor sie die eigene Mutter geboren hat[1]. Damit wäre man selbst nie geboren worden, hätte also die Zeitreise gar nicht antreten können, ein offensichtlicher logischer Widerspruch. Eine etwas besser zu Physiklaboren passende Variante wäre ein Versuchsaufbau, in dem die Einflüsse von zukünftigen Ereignissen dazu führen würden, dass diese Ereignisse gar nicht stattfinden können.

Tatsächlich stellen sich *alle* diese Einwände als nicht tragfähig heraus. Nicht nur in dem Sinne, dass der letzte Beweis für die Unmöglichkeit von Kausalwirkungen zukünftiger Ereignisse fehlt, sondern dass wir nach allem was wir wissen *erwarten* können, dass es solche Wirkungsarten in der mikroskopischen Welt tatsächlich gibt. Mit ihnen die Vergangenheit zu ändern oder zu bereisen, oder einen Blick in die Zukunft zu erhaschen, ist aber nicht möglich, ob leider oder zum Glück, das bleibt eine Domäne der Science Fiction.

Hier die Antworten im Einzelnen:

1. Die Realität zukünftiger Ereignisse passt nicht zu unseren Anschauungen und Alltagserfahrungen, aber wie der vorige Abschnitt versucht hat deutlich zu machen, haben uns die wissenschaftlichen Erkenntnisse der letzten Jahrzehnte, insbesondere die Relativitätstheorie, zu genau diesem Bild geführt.
2. Auch hierauf gab der vorige Abschnitt eine Antwort: *Keine* der uns bekannten fundamentalen physikalischen Theorien enthält eine grundsätzliche Unterscheidung zwischen Vergangenheit und Zukunft. Nicht einmal eine bevorzugte Zeitrichtung, in die sich Abläufe entwickeln. Man kann mit ihrer Hilfe den gesamten Bewegungsablauf ableiten, wenn der Zustand und die von außen einwirkenden Kräfte zu *einem* Zeitpunkt bekannt sind (bei der Quantenmechanik gibt es hierfür einen speziellen Aspekt, auf den ich noch zu sprechen komme), vollkommen egal ob dieser Zeitpunkt in der Vergangenheit oder in der Zukunft liegt.
3. Die kurze Antwort für diesen zentralen Aspekt ist „ja", denn die Entropieerhöhung hängt sehr eng mit kausalen Wirkungsketten zusammen. Das ist aber ein makros-

[1] Warum sich dieses Paradoxon um die Großmutter oder den Großvater des Zeitreisenden dreht und nicht um dessen Mutter oder ihn selbst, wird wohl ein ewiges Rätsel der Wissenschaftsgeschichte bleiben.

kopisches Phänomen, das sich erst für eine Vielzahl von Einzelsystemen ergibt, für die man einen speziellen Anfangszustand gewählt hat und die sich noch nicht im thermodynamischen Gleichgewicht befinden. Die Asymmetrie der händisch gesetzten Ausgangsbedingungen reicht vollkommen aus, die resultierende Zeitrichtung zu begründen, und ist daher nicht das geringste Argument für eine kausale Asymmetrie der mikroskopischen Wirkungszusammenhänge. Trotzdem ist die Entropieerhöhung natürlich für uns makroskopische Wesen genauso allgegenwärtig wie unumstößlich, so dass es *auf dieser Ebene* keinen Sinn macht, von Einflüssen aus der Zukunft zu sprechen. Genau das ist auch der Grund für die Unmöglichkeit von Zeitreisen.

4. Es mag überraschend klingen, aber die Antwort auf diese naheliegende Frage liegt in der *Bedeutungslosigkeit* der Abhängigkeit von zukünftigen Ereignissen in der Klassischen Physik, auch auf der Ebene der Elementarteilchen. Wie oben bereits erläutert können deterministische Theorien wie die Klassische Mechanik, aber auch die Elektrodynamik und Relativitätstheorie, genauso gut in Zukunfts- wie in Vergangenheitsrichtung angewandt werden. Da wir aber natürlich nur vergangene und keine zukünftigen Ereignisse kennen, ist es viel *nützlicher*, von Anfangsbedingungen auszugehen und daraus das zukünftige Geschehen abzuleiten. Es ist allein unser menschliches Anschauungsvermögen und unsere Unkenntnis der Zukunft, welche dieser Anwendung in Zukunftsrichtung einen höheren Grad an „Realität" als der entgegengesetzten Anwendung zugesteht.
5. Unsere Großmütter und Großväter sind nicht in Gefahr. Diese Art von Zeitreise-Paradoxa zeigen lediglich auf, dass *bestimmte* Kombinationen aus zukunfts- und vergangenheitsgerichteten Wirkungen unmöglich sind – nicht nur physikalisch oder in unserer Welt unmöglich, sondern schlichtweg logisch inkonsistent. Es gibt niemanden, der diese Tatsache bezweifelt. Aus dem Argument folgt aber nicht, dass *alle* möglichen Kombinationen inkonsistent sind und damit auch nicht, dass Abhängigkeiten von zukünftigen Ereignissen grundsätzlich unmöglich sind. Auch die Aussage, dass ein bestimmtes vergangenes Ereignis sowohl stattgefunden hat als auch nicht stattgefunden hat, stellt eine logische Unmöglichkeit dar, ohne dass wir daraus folgern, dass es überhaupt keine vergangenen Ereignisse gibt.
   Sobald man versucht, diese Paradoxien mit konkreten Inhalten zu füllen, überschneidet sich dieser Aspekt mit Punkt 3. Zeitreisen und generell die Möglichkeit, die Vergangenheit zu verändern oder in die Zukunft blicken zu könnten, würde in Konflikt mit dem allgegenwärtigen und unumgänglichen zukunftsgerichteten Entropieanstieg geraten. Sie bleiben daher nach allem was wir wissen ein Ding der Unmöglichkeit.

Das bislang Gesagte zeigt, gestützt auf dem zuvor vorgestellten Bild des vierdimensionalen Blockuniversums, dass es auf mikroskopischer (nicht dem Entropiegesetz unterworfener) Ebene genauso legitim ist, von zukunftsgerichteten wie von vergangenheitsgerichteten – kurz „retrokausalen" – Kausalwirkungen zu sprechen. Es zeigt aber auch, dass die Frage nach der Realität retrokausaler Wirkungen aufgrund unserer Unkenntnis zukünftiger Ereignisse nicht direkt experimentell prüfbar ist. Die Belege für ihre Existenz können daher nur indirekter Natur sein, nämlich in Form größerer konzeptueller Einfachheit und Eleganz unserer physikalischen Theorien.

Die Frage nach der Sinnhaftigkeit retrokausaler Theorien wird damit zu einer ernst zu nehmenden physikalischen Fragestellung mit zunächst einmal offenem Ausgang. Können uns diese Theorien tatsächlich helfen, unsere Welt besser zu verstehen und in konkreten Model-

len nachzubilden? Die sehr verkürzte Antwort zu Punkt 4 scheint das Gegenteil zu behaupten, aber dieser Eindruck täuscht. Von der Bedeutung für die Quantenmechanik wird noch die Rede sein, aber wie die beiden nächsten Abschnitte zeigen, sollte man sich selbst in der Klassischen Physik nicht vorschnell auf ausschließlich zukunftsgerichtete Wirkungen verlassen.

Das Fermatsche Prinzip – ein universelles Grundmuster der Physik?

Wie man zum Beispiel an einem Stift in einem Wasserglas sieht, ändert ein Lichtstrahl seine Richtung, wenn er von einem optischen Medium in ein anderes übergeht. Dies ist unten schematisch dargestellt. Wie groß genau ist nun dieser Ablenkungswinkel?

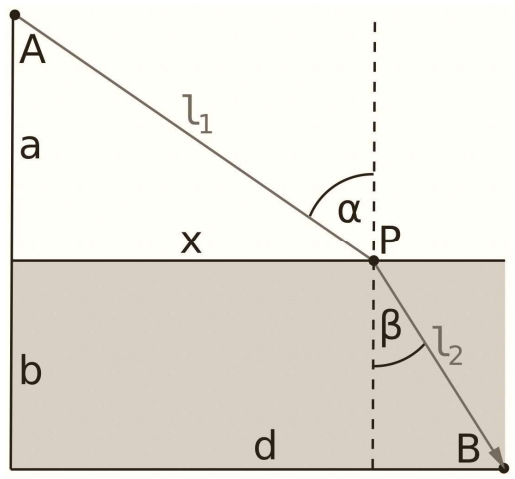

Abb. 6: Ein Lichtstrahl, der durch zwei unterschiedliche Medien läuft.

Um ihn bestimmen zu können, benötigt man erstens die Annahme, dass sich das Licht in einem homogenen Medium geradlinig ausbreitet, plus zweitens das sogenannte Snelliussche Brechungsgesetz $\sin(\alpha) * n_a = \sin(\beta) * n_b$ mit dem Brechungsindex n des jeweiligen Mediums. Bei Reflexionen wird noch als dritte Zutat das Reflexionsgesetz benötigt, nach dem der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist.

Das ist aber nicht die einzige Möglichkeit für die Bestimmung dieses Winkels. Man kann alternativ ein einziges Prinzip voraussetzen, aus dem sich neben dem gesuchten Ablenkungswinkel alle drei der oben genannten Annahmen und Gesetze ableiten lassen:

Das Licht nimmt immer den Weg, der integral betrachtet die geringste Laufzeit hat.

Das ist das Fermatsche Prinzip. Es hat auch eine direkte praktische Anwendung: Wenn sich bei B ein im Wasser Ertrinkender befindet und eine Person A ihm erst über den Strand und dann, deutlich langsamer, durch das Wasser zur Hilfe kommen will, welchen Weg muss er dann nehmen? Es ist nicht der direkte, sondern der Weg mit der insgesamt kürzesten Laufzeit, aus dem genau diese Winkel folgen[2].

Es ist glaube ich keine Frage, welche Beschreibung die elegantere ist. Aber etwas ist merkwürdig. Stellen Sie sich vor, sie sind ein Lichtteilchen am Ort A, welchen Anfangswinkel müssen sie wählen, um Ort B zu erreichen? Richtig, der aus dem Fermatschen Prinzip aus der Lage von A und B ableitbare Winkel α, und das macht das Lichtteilchen auch. Haben sie etwas gemerkt? Den Winkel, den dieses Teilchen bei Punkt A einschlagen muss, hängt von der Lage und Umgebungseigenschaft eines Punktes B ab, *den es erst in seiner Zukunft erreichen wird.* Ein Rettungsschwimmer kann die Situation vorausberechnen, aber woher soll das Lichtteilchen schon bei A wissen, dass es später genau bei B landen wird? Nach diesem Prinzip gibt es eine kausale Abhängigkeit von einem in der Zukunft liegenden Ereignis.

[2] Falls es merkwürdig klingt, dass das Licht unterschiedliche Laufzeiten haben kann: Lediglich die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit ist eine universelle Naturkonstante, nicht die Phasengeschwindigkeit des Lichts in einem bestimmten Medium. Im Extremfall kann die Lichtfront sogar von schnellen Teilchen überholt werden, was der Ursprung der sogenannten Tscherenkow-Strahlung ist, in Analogie zu einem akustischen Überschallkegel. Diese Strahlung lässt sich tatsächlich messen und verrät den kontinuierlich eintreffenden Strom von kosmischen Teilchen in unserer Atmosphäre.

Das ist natürlich nur eine mögliche Betrachtungsweise und soll keinen Beweis für die Existenz vergangenheitsgerichteter Wirkungen in der klassischen Optik sein. Man kann ja auch A und den Anfangswinkel α vorgeben, Punkt B würde sich dann später daraus ergeben. Dieses Prinzip gibt aber hoffentlich eine gewisse Vorahnung dafür, wie elegant eine Naturbeschreibung sein kann, wenn man mögliche Abhängigkeiten von zukünftigen Ereignissen nicht vorzeitig aus dem wissenschaftlichen Vokabular streicht. Solche „globale" Prinzipien können eine absolut fundamentale Rolle in der Physik spielen, mehr sogar noch als ihnen momentan von vielen Physikern zugesprochen wird, wovon dieser Aufsatz noch berichten wird.

In einer anderen Theorie wird das besonders deutlich. Für konkrete Lösungen der Allgemeinen Relativitätstheorie hat sich herausgestellt, dass man die Anfangsbedingungen gar nicht beliebig auswählen kann! Gerade in stark gekrümmten Räumen folgen aus den Feldgleichungen bestimmte *globale* Einschränkungen, die mit vielen Startbedingungen gar nicht verträglich sind. Übersetzt auf das oben erläuterte Beispiel der Lichtausbreitung bedeutet dies, dass in dieser Theorie die globale Betrachtungsweise durch Vorgabe von Punkt A und B nicht nur *gleichberechtigt* zur üblichen Methode der Vorgabe von Punkt A und Anfangswinkel α ist, sondern ihr sogar *überlegen* ist, da es von Punkt B abhängen kann, welche Kombinationen aus Anfangs-Ort und -Winkel überhaupt physikalisch möglich sind.

Es gibt noch ein anderes Beispiel für diese Überlegenheit globaler Betrachtungsweisen ohne Bevorzugung von zukunftsgerichteten Wirkungen, nämlich eine durchaus spektakuläre Neuinterpretation der Theorie der Elektrodynamik. Sie fristet aus schwer nachvollziehbaren Gründen selbst in der Gemeinde der Physiker ein absolutes Schattendasein, obwohl sie von dem wohl bedeutendsten Physiker der zweiten Jahrhunderthälfte entworfen wurde.

Richard Feynmans Spiel mit der Zeit

In dem üblichen Bild der Elektrodynamik, wie sie auch in den Universitäten gelehrt wird, gibt es eine merkwürdige Eigenheit. Der Formalismus dieser Theorie ist vollkommen zeitsymmetrisch – jeder zukunftsgerichteten Lösung steht eine vollkommen gleichberechtigte Lösung in Vergangenheitsrichtung gegenüber. Trotzdem kennen wir alle das Phänomen, dass elektromagnetische Wellen, oder auch Wasserwellen, von einer punktförmigen Quelle in alle Richtungen *auslaufen* können, aber nicht vollkommen gleichmäßig von allen Richtungen gleichzeitig bis zu einem punktförmigen Auftreffpunkt *einlaufen*. Wie bringt man diese beiden Aspekte zusammen? Die gängige Methode besteht in dem Beschluss, die mathematischen Lösungen, die einlaufenden Wellen entsprechen, einfach zu *ignorieren*, das heißt sie als nicht-physikalisch einzustufen und nicht weiter zu betrachten. Eine echte Begründung gibt es dafür nicht, aber das Ergebnis ist eine Theorie, die sich hervorragend anwenden lässt. Neben elektrisch geladenen Teilchen gibt es in dieser Theorie auch sogenannte „freie" elektromagnetische Felder, die unabhängig von den Teilchen existieren. Lediglich der experimentell nachweisbare Effekt, dass geladene Teilchen ihrer Beschleunigung einen Widerstand entgegensetzen, passt nicht ins Bild, weil das Teilchen dafür mit sich selbst wechselwirken müsste, was zu mathematisch entarteten Lösungen mit unendlich großen Termen führt. Die praktische Anwendbarkeit der Theorie wird durch diese Erklärungslücke aber nicht einschränkt.

Die meisten Physiker gaben sich, und geben sich noch immer, mit diesem Status der Theorie zufrieden. Nicht so Richard Feynman. Zusammen mit dem kaum weniger prominenten Doktorvater John Wheeler entwickelte er Ende der 1940er Jahre eine alternative Fassung. Sie fragten sich, was daraus folgen würde, wenn man basierend auf der Zeitsymmetrie des

mathematischen Formalismus die Lösungen für einlaufende Wellen genauso ernst nimmt wie die für auslaufende. Bewegte elektrische Teilchen würden dann gewissermaßen sowohl in Zukunfts- als auch in Vergangenheitsrichtung Wellen abstrahlen. Als eine zusätzliche Voraussetzung nahmen sie an, dass Wellen *nur* auf diese Art entstehen, das heißt dass es keine „freien" Felder ohne Quelle gibt. Eine Wellenausbreitung in Vergangenheitsrichtung klingt natürlich ziemlich verrückt, aber physikalische Theorien sollte man an ihren Vorhersagen messen, also was folgt aus dieser Theorie?

Abb. 7: Richard Feynman

Feynman und Wheeler haben gezeigt, dass sie in thermodynamisch geprägten Systemen, in denen wir uns unweigerlich befinden, zu *exakt den gleichen* empirischen Vorhersagen wie die ursprüngliche Theorieauslegung kommt! Die in Vergangenheits- und Zukunftsrichtung auslaufenden Wellen kompensieren sich in einer Art, dass sie genau zu den von uns beobachteten Ergebnissen führen. Auch diese Variante der Elektrodynamik sagt somit trotz des zeitsymmetrischen Fundaments voraus, dass wir ausschließlich Wellenausbreitungen in Zukunftsrichtung beobachten und nicht umgekehrt, und dass wir keine Signale in die Vergangenheit senden oder diese beeinflussen können. Es gibt sogar noch eine zweite Besonderheit dieses Modells. Elektromagnetische Felder sind in dieser Theorie nur hilfreiche mathematische Konstrukte, die man genauso gut rein „relativ" als Beschreibung der Teilchen-Wechselwirkungen interpretieren kann, da es keine quellenlosen freien Felder gibt. Bezüglich der fundamentalen Grundbausteine der Natur ist diese Theorie daher sparsamer, statt Teilchen und Feldern kommt sie allein mit Teilchen aus.

Als wäre das nicht schon genug, ist der Widerstand elektrischer Teilchen gegen ihre Beschleunigung eine direkte Vorhersage dieser Theorie, basierend auf der Wechselwirkung solcher Teilchen mit der Gesamtheit der anderen Teilchen. Die Annahme einer konzeptionell wie mathematisch fragwürdigen Selbst-Interaktion der Teilchen ist dafür überhaupt nicht notwendig[3]. Diese Wechselwirkung mit den anderen Teilchen findet instantan statt, d.h. ohne Zeitverzögerung, was aufgrund der besonderen Eigenschaften dieser Theorie nicht zu überlichtschnellen Signalen oder einem Konflikt mit der Relativitätstheorie führt. Bis zum heutigen Tag gibt es keine überzeugende alternative Erklärung für diesen Widerstandswert.

Diese „Feynman-Wheeler Direct-Action Theorie", auch bekannt als „Feynman-Wheeler Absorber Theorie", stellt bis zum heutigen Tag unsere beste klassische Beschreibung der elektromagnetischen Phänomene dar[4]. Aber muss man sich diese Wellen wirklich als reale „Wesenheiten" unserer Welt vorstellen, die im buchstäblichen Sinne in der Zeit vor und

[3] Genau genommen konnte diese Theorie diese Selbst-Interaktions-Effekte nicht vollständig eliminieren, das gelang aber in ihrer quantenmechanischen Verfeinerung in Form der Quantenelektrodynamik.

[4] Trotz dieser Erfolge haftet dieser Theorie bis heute ein dubioser Ruf an. Neben ihrem unanschaulichen Charakter – Physiker sind auch nur Menschen! – ist das auch einem historischen Missverständnis geschuldet. Feynman und Wheeler spekulierten, was als „Absorber Bedingung" bekannt wurde, ob *sämtliche* von den Teilchen ausgesandten Wellen irgendwann von anderen Teilchen absorbiert werden. Das ist durchaus denkbar, aber auch davon abhängig, wie unser Universum entstanden ist und wohin es sich entwickelt. Diese Annahme ist entgegen häufig zu lesender Beschreibungen aber keine Voraussetzung der Direct-Action Theorie. Dafür reichen viel schwächere Grundannahmen, die in normalen thermodynamischen Systemen vollkommen unabhängig von kosmologischen Randbedingungen erfüllt sind. Feynman distanzierte sich später von dieser Vermutung, was zu der historischen Fehldeutung führte, er hätte sich auch von seiner eigenen Theorie der Elektrodynamik abgewandt, was tatsächlich nie der Fall war.

zurück reisen? Das ist kaum die richtige Deutung. Mit ihrem Verzicht auf quellenlosen Feldern, was eine rein teilchenbasierte Interpretation erlaubt, gibt uns diese Theorie einen deutlichen Hinweis: die mathematischen Lösungen, die in der klassischen Interpretation ein- und auslaufenden Wellen entsprechen, sollte man nicht buchstäblich als physikalische Wellen interpretieren. Wie der „Direct-Action" Begriff in ihrem Namen andeutet, kann diese Theorie stattdessen sämtliche elektrodynamischen Phänomene als direkte Wechselwirkung von elektrischen Teilchen beschreiben.

Was ist das Fazit aus diesem Erfolg? Es besteht nicht darin, dass es buchstäblich reale Wellen gibt, die sich in Zukunfts- wie in Vergangenheitsrichtung ausbreiten. Die Theorie von Feynman und Wheeler zeigt aber, wie erfolgreich eine naturwissenschaftliche Beschreibung unserer Welt sein kann, wenn man die Möglichkeit von zeitlich globalen Abhängigkeiten nicht von vornherein ausschließt. Besonders deutlich wird das in dem korrekt vorhergesagten Widerstand von elektrischen Teilchen gegen ihre Beschleunigung, der sich augenblicklich einstellt und direkt messbar ist: Der Effekt hängt nach dieser Theorie kausal gesehen von anderen Teilchen ab, mit denen das Teilchen erst in seiner Zukunft Kontakt aufnehmen kann! Um den Satz eingangs dieses Kapitel zu wiederholen: Ein Ereignis kann von anderen Ereignissen in seiner Vergangenheit, aber auch von Ereignissen in seiner Zukunft beeinflusst werden – zumindest auf grundlegender physikalischer Ebene.

Motiviert vom Erfolg dieser Theorie entwickelte Richard Feynman noch ein anderes zeitsymmetrisches Modell, das ich hier kurz erwähnen möchte. Es bildet die Grundlage der Quantenelektrodynamik, die 1965 mit dem Physik-Nobelpreis gewürdigt wurde. Ihr Anwendungsbereich umfasst dank der vollständigen Beschreibung der Atomhüllen den kompletten Bereich der Chemie und sie darf sich rühmen, die zahlenmäßig am genauesten überprüfte Theorie der Physik zu sein[5].

Ein besonderer Aspekt dieser Theorie wird aber gerne außer Acht gelassen. Er klingt einfach zu unsinnig, um ernst genommen zu werden. Es geht dabei – Sie ahnen es schon – um die Rolle der Zeit. Eine besondere Rolle spielt dabei ein Elementarteilchen, nämlich das Positron.

Ein Positron ist das sogenannte „Antiteilchen" zum Elektron: Es hat die gleichen physikalischen Eigenschaften, aber genau die umgekehrte Ladung, es ist positiv geladen. Diese Teilchen können in Teilchenbeschleunigern künstlich erzeugt werden und lassen sich auch in der kosmischen Strahlung nachweisen, die tagtäglich auf die Erde trifft. Begegnet ein solches Teilchen seinem Antiteilchen, zerstören sich beide gegenseitig und erzeugen zwei hochenergetische Photonen. Richard Feynman erkannte nun, dass sich dieser Vorgang viel einfacher beschreiben lässt, wenn man das Positron als ein Elektron betrachtet, dass sich *rückwärts in der Zeit bewegt*. In dieser Perspektive wird das Elektron an einem Photon zeitlich gespiegelt, so dass es sich – als „Positron" – zeitlich rückwärts bewegt, bis es wieder auf ein Photon trifft, das es erneut in die

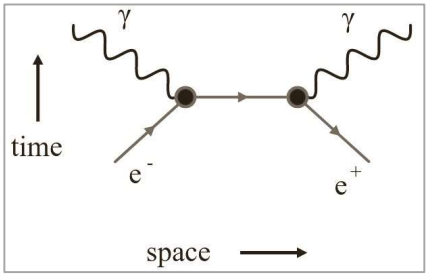

Abb. 8: Feynmandiagramm der Annihilation eines Elektrons e^- mit einem Positron e^+.

[5] Aus dieser von Richard Feynman, Julian Schwinger und Shinichiro Tomonaga aufgestellten Theorie folgt zum Beispiel für eine bestimmte Eigenschaft von Elektronen, den „gyromagnetischen Faktor", ein Zahlenwert von 2,0023193043632±5. Der gemessene Wert beträgt 2,0023193043625±4.

Zukunft schickt. Diese Betrachtungsweise kommt mit nur zwei statt drei Elementarteilchen aus und passt perfekt zu den experimentellen Resultaten.

Dieses Ergebnis lohnt sich festgehalten zu werden: Die zeitlose Perspektive, in der vergangenheitsgerichtete Vorgänge genauso erlaubt sind wie zukunftsgerichtete, ist nicht nur konsistent mit den experimentellen Ergebnissen, sondern vereinfacht sogar ihre physikalische Beschreibung.

Die Welt aus Sicht eines Photons

Ein letzter Gedanke zu diesem Thema soll noch erlaubt sein. Nach der Relativitätstheorie vergeht die Eigenzeit eines Beobachters umso langsamer, je schneller er sich bewegt. Bei einer Geschwindigkeit knapp unter der Lichtgeschwindigkeit vergehen für einen solchen Beobachter daher nur Bruchteile von Sekunden, während in der Welt um ihn herum Jahre vergehen. Wie könnte demnach die Welt aus Sicht eines Photons aussehen, dass sich mit Lichtgeschwindigkeit durch das Universum bewegt? Es würde seine gesamte Geschichte vom Moment der Erzeugung vom Punkt A bis zu seiner Vernichtung am Punkt B als einen einzigen Augenblick erleben, in dem es keine Vergangenheit oder Zukunft gibt. Für das Photon gibt es daher nicht den geringsten Unterschied, ob es von A nach B oder von B nach A läuft, und damit ob B Ursache von A ist oder umgekehrt, selbst wenn A das Licht einer fernen Galaxis und B das Auge eines menschlichen Beobachters sein sollte. Es lohnt sich, diesen Gedanken einmal auf sich wirken zu lassen.

Ein neuer Blick auf die Quantenmechanik

Die bisherigen Überlegungen lassen sich wie folgt zusammenfassen: Auf grundlegender physikalischer Ebene ist eine zeitsymmetrische Naturbeschreibung, in der Abhängigkeiten von vergangenen Ereignissen gleichberechtigt neben Abhängigkeiten von zukünftigen Ereignissen stehen, nicht nur möglich, sondern häufig sogar einfacher und eleganter als in der zeitgerichteten Sichtweise. Eröffnet diese Erkenntnis neue Möglichkeiten für die Suche nach einem guten Quantenmodell?

Die Antwort auf diese Frage ist aus meiner Sicht eindeutig, auch wenn sie nicht von allen Physikern geteilt wird: Die Aufgabe der gewohnten Sichtweise rein zukunftsgerichteter Kausalwirkungen, so naheliegend sie uns auch erscheint, scheint mir eine *notwendige Voraussetzung* für das Verständnis der quantenmechanischen Welt zu sein. Diese zeitsymmetrische Perspektive ist nicht der einzige Schlüssel für eine bessere Deutung der Geschehnisse in der Mikrowelt, einen zweiten zentralen Aspekt werde ich in Teil 4 dieses Aufsatzes vorstellen, aber ein ganz entscheidender. Er ermöglicht eine realistische und vollkommen mit der Relativitätstheorie verträgliche Interpretation der Quantenmechanik ohne „spukhafte" Fernwirkungen, sowie neue Antworten auf das Messproblem und die Rolle des Zufalls in dieser Theorie. Wie dieses kleine Wunder gelingt – wir erinnern uns an die zahlreichen erfolglosen Interpretationsversuche im zweiten Teil dieses Aufsatzes – soll jetzt vorgestellt werden. Den Anfang macht eine Interpretation, die trotz ihres sperrigen Namens ein relativ anschauliches Bilder der quantenmechanischen Vorgänge liefert.

Der quantenmechanische Handschlag – Cramers Transaktionsinterpretation

Die sogenannte Transaktionsinterpretation (Transactional Interpretation) wurde bereits im Jahr 1986 von dem amerikanischen Physiker John G. Cramer ersonnen. Ihre zentrale Idee lässt sich wie folgt zusammenfassen: Die quantenmechanische Wellenfunktion beschreibt reale physikalische Wellen, die sich nicht nur in Zukunfts- sondern auch in Vergangenheitsrichtung ausbreiten. Der Kollaps der Wellenfunktion entsteht aus der gegenseitigen Interaktion dieser Wellen als ein echter physikalischer Prozess. Anders als die im zweiten Teil vorgestellten Kollaps-Ansätze wie die GRW Theorie muss hierfür keine neue Entwicklungsgleichung mit künstlich eingeführten Zusatztermen postuliert werden[6] und sie führt zu den exakt gleichen Vorhersagen wie die orthodoxe Quantenmechanik.

Wellen, die sich rückwärts in der Zeit bewegen!? Die vorherigen Abschnitte haben solchen Ansätzen hoffentlich ein wenig ihren Schrecken genommen, aber es bleibt für uns natürlich ein höchst unanschauliches Konzept. Diese Interpretation hat aber das Potential, viele quantenmechanische Phänomene besser verständlich, insbesondere das ansonsten so schwer zu fassende Problem der Verschränkung.

Zunächst einmal passt diese Interpretation in gewisser Weise sogar *besser* zur Mathematik der Quantenmechanik als die herkömmliche Sichtweise. Die Wellenfunktion Ψ gehorcht zwar der Zeitentwicklung der Schrödinger-Gleichung, ist aber für sich genommen gar nicht experimentell beobachtbar. Erst nach ihrer Multiplikation mit der sogenannten „konjugierten" Wellenfunktion $\overline{\Psi}$ erhält man eine experimentell überprüfbare Zahl, nämlich die

[6] Grundlage dieser Theorie bildet die sogenannte Klein–Gordon Gleichung als speziellrelativistischer Erweiterung der Schrödinger-Gleichung, die anders als diese auch Wellen in Vergangenheitsrichtung als Lösungen hat.

Wahrscheinlichkeit, dass sich ein System in einem bestimmten Zustand befindet[7]. Die konjugierte Wellenfunktion $\overline{\Psi}$ erfüllt dabei genauso wie Ψ die quantenmechanischen Gleichungen und stellt daher eine gleichberechtigte Lösung dar. Aber was ist ihre physikalische Interpretation?

Schon 1926 wies Max Born, auf den die Wahrscheinlichkeitsabbildung der Quantenmechanik zurückgeht, auf eine mögliche Interpretation dieser Größe $\overline{\Psi}$ hin: sie könnte eine *zeitumgekehrte* Variante der Wellenfunktion Ψ darstellen. Weil dieser Gedanke zu verrückt erschien, wurde in den darauffolgenden Jahrzehnten aber nur die Wellenfunktion Ψ als physikalische Größe ernst genommen. An dieser Sicht hat sich bis heute nichts geändert, obwohl jede Anwendung der Quantenmechanik auf der Multiplikation der Wellenfunktion mit ihrer konjugierten Wellenfunktion beruht. Die Transaktionsinterpretation sieht $\overline{\Psi}$ dagegen als genauso real wie Ψ an.

Auf dieser Basis kann John Cramers Interpretation ein relativ anschauliches Bild vermitteln, was bei einer quantenmechanischen Interaktion passiert. Dies wird im folgenden Abschnitt und in Abbildung 9 dargestellt. Wie bei allen Veranschaulichungen von physikalischen Theorien sollte man sich dabei aber bewusst sein, dass diese bildlichen Beschreibungen keinen Anspruch auf eine buchstäbliche Beschreibung der realen Vorgänge erheben. Sie können lediglich eine Idee der Grundprinzipien einer im Grunde abstrakten Theorie liefern, die in der Sprache der Mathematik formuliert wurde.

Der Kern der Transaktionsinterpretation lässt sich an der Wechselwirkung zweier geladener Teilchen wie zum Beispiel Elektronen illustrieren. Gerät ein Elektron in Schwingung, kann es in der herkömmlichen Sichtweise ein Photon emittieren, das sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegt und irgendwann von einem anderen Elektron absorbiert wird. In Cramers Interpretation emittiert das Elektron dagegen zunächst zwei Arten von „Angebotswellen" (der Grund für diesen Namen wird gleich klar werden): sogenannte „retardierte" Wellen in Zukunftsrichtung mit positiver Energie und „avancierte" Wellen in Vergangenheitsrichtung mit negativer Energie, und das vollkommen symmetrisch. Die retardierten Wellen werden irgendwann das andere Elektron erreichen. Anstatt dort einfach absorbiert zu werden, regen sie dieses Elektron zum Aussenden von retardierten „Bestätigungswellen" an, die sich in Überlagerung mit den retardierten Angebotswellen des ersten Elektron gegenseitig auslöschen, das heißt in Summe bleiben von den beiden Elektronen keine Wellen in Zukunftsrichtung über. Aufgrund der symmetrischen Wellenerzeugung läuft zwischen den beiden Elektronen aber zusätzlich ein Bestätigungssignal in Vergangenheitsrichtung zurück, das auf das erste Elektron trifft und dort den gleichen oder genauer gesagt spiegelbildlichen Prozess auslöst: Das erste Elektron wird zur Aussendung avancierter Wellen angeregt, die sich mit dem ursprünglichen Feld der avancierten Wellen des ersten Elektrons überlagen und sich gegenseitig auslöschen. In der Summe bleiben somit ein retardiertes Signal vom ersten zum zweiten Elektron und ein avanciertes in Gegenrichtung übrig, und zwar auf dem direkten Weg zwischen den beiden Elektronen. Da die avancierte Welle eine negative Ladung trägt, löschen sich diese beiden Wellen nicht aus, sondern verstärken sich gegenseitig: Je nach Sichtweise, von der keine gegenüber der anderen ausgezeichnet ist, transportieren beide Wellen positive Energie in Zukunftsrichtung oder negative Energie in Vergangenheitsrichtung.

[7] Mathematisch erhält man die Konjugierte einer komplexen Zahl, die sich aus Real- und Imaginärteil zusammensetzt, durch Vorzeichenumkehr des Imaginärteils. In der zweidimensionalen komplexen Ebene entspricht das einer spiegelbildlichen Umkehr bezüglich der realen Achse.

Dieser „quantenmechanische Handschlag“, wie John Cramer ihn nennt, bildet die Grundlage jeder quantenmechanischen Wechselwirkung. Er stellt eine echte physikalische Interpretation des Kollapses der Wellenfunktion dar, und das ohne Sonderrolle eines „Beobachters“. Ein Erfolg, der keiner anderen Interpretation der Quantenmechanik in vollständig anerkannter Weise gelungen war.

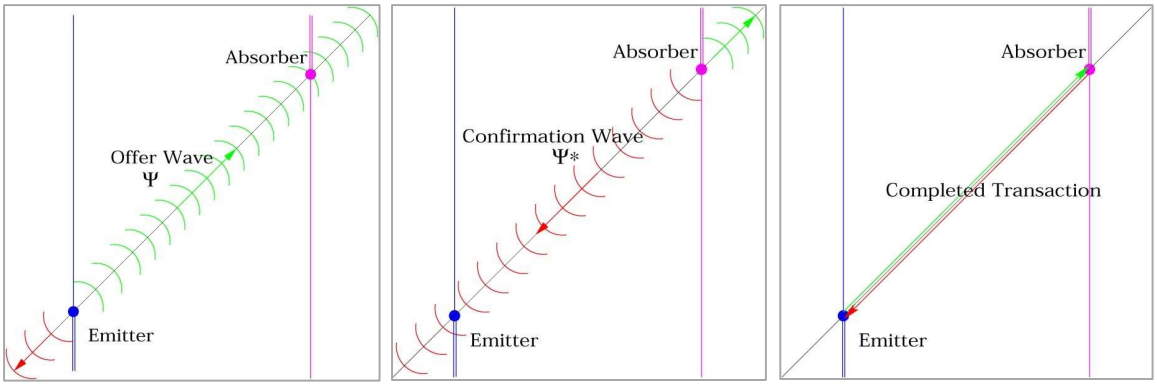

Abb. 9: Der quantenmechanische Handschlag der Transaktionsinterpretation: Die vom Emitter ausgesandten Angebotswellen (links) werden vom Absorber durch vergangenheitsgerichtete Bestätigungswellen beantwortet (Mitte), woraus sich in Kombination ein zufällig ausgewähltes konkretes Ergebnis dieser Interaktionen ergibt (rechts).

Wie stellen sich die anderen merkwürdigen Phänomene in dieser Interpretation dar, die ich im ersten Teil dieses Aufsatzes vorgestellt hatte? Beginnen wir mit dem „Delayed Choice“ Experiment. Ein Elektron wird durch eine Zwischenwand mit zwei Spalten geschickt und findet dahinter einen Schirm vor, der hoch- und runtergeklappt werden kann. Im hochgeklappten Zustand zeigt der Schirm das typische Interferenzmuster, während er in dem anderen Zustand den Weg für zwei Richtungsdetektoren frei macht, die das Elektron beim Durchflug durch den oberen oder unteren Spalt „ertappen“ können. Die Interferenzeffekte verschwinden dabei in diesem zweiten Fall. Die Besonderheit an dieser Versuchsanordnung besteht darin, dass der Schirm erst *nach* dem Durchflug des Elektrons durch die Zwischenwand umgeklappt wird, das heißt das Elektron „weiß“ bei der Zwischenwand noch gar nicht, ob es wie eine Welle durch beide Spalte gehen soll oder sich wie ein Teilchen für eines der beiden Spalte entscheiden muss. Es kann sich daher in diesem Moment auch nicht auf eine der beiden sich gegenseitig ausschließenden Eigenschaften festlegen, das tatsächliche Ergebnis *manifestiert sich* erst beim Akt der Messung.

Merken Sie etwas? Das grundlegende Rätsel dieser Versuchsanordnung verschwindet von ganz alleine, wenn man sich nicht an die zeitliche Abfolge von Ursache und Wirkung klammert. Die stillschweigende Annahme besteht darin, dass die Wechselwirkung mit dem Messgerät das Elektron beim Passieren der Zwischenwand nicht beeinflussen kann, weil dieses zu einem früheren Zeitpunkt stattfindet. Aus Sicht der Transaktionsinterpretation gibt es aber gar keine zeitliche Reihenfolge. Der Akt der Messung beeinflusst den gesamten Weg des Elektrons von seinem Startpunkt bis zu seiner Detektion, genauso wie die Elektronenquelle und die Eigenschaften der Zwischenwand diesen Weg beeinflussen. Die Richtungsdetektoren sind in dieser Perspektive genauso am Wirkungsgeschehen beteiligt wie der Rest der Versuchsanordnung. Die von ihnen ausgehenden avancierten Wellen „zwingen“ das Elektron bildlich gesprochen, sich für den Durchflug durch den oberen oder unteren Spalt zu entscheiden. Es gibt nur eine nicht-temporale und in sich konsistente *Gesamtbeschreibung* des jeweiligen Ausgangs des Experiments, das von den Gesetzen der Quantenmechanik mit einer fantastischen Präzision beschrieben wird.

Aus diesem Gedankengang ergibt sich auch sofort eine neue Sichtweise für das Phänomen der Verschränkung. Bei dieser geisterhaften Verbindung zwischen zwei weit voneinander entfernten Teilen eines Quantensystems führt die Vermessung des einen Teilchens zu einer instantanen, das heißt augenblicklichen Veränderung des zweiten. Wie ist das möglich? Nicht eine einzige der im zweiten Teil dieses Aufsatzes vorgestellten Interpretationen konnte dieses Rätsel überzeugend lösen, obwohl der Effekt mittlerweile schon über mehr als 100 km Entfernung nachgewiesen wurde. Aus Sicht der Transaktionsinterpretation ist der Einfluss der Messung – als ein Beispiel einer normalen physikalischen Interaktion zweier Systeme – auf den Zustand des Gesamtsystems dagegen vollkommen natürlich. Die avancierten Wellen laufen zum Ursprungsort des Systems zurück und wirken sich dort auf das zweite Teilchen aus, indem sie es in den komplementären Zustand zum ersten Teilchen versetzen. Kein Wunder also, dass die Messung des zweiten Teilchens genau diese Eigenschaft zeigt. Nur der verzweifelte Versuch, den Ablauf dieses Experiments in eine feste zeitliche Ordnung zu bringen, führt zu dem mysteriös erscheinenden Interpretationsproblem.

Weder die Angebots- noch die Bestätigungswellen müssen sich für die Erklärung dieser Phänomene mit Überlichtgeschwindigkeit ausbreiten. Die Interpretation bietet daher eine „quasi-lokale" Erklärung der Fernwirkungen, die vollkommen kompatibel mit der Speziellen Relativitätstheorie ist. Das ist kein Widerspruch zu dem experimentell bestätigten Bellschen Theorem, denn für seine Ableitung hatte Bell vorausgesetzt, dass Ereignisse nur von anderen Ereignissen in seiner Vergangenheit (in seinem Vergangenheits-Lichtkegel) beeinflusst werden können[8]. Diese Möglichkeit wird oft übersehen und passt zu dem Ausspruch „*Misunderstandings of Bell's theorem happen so fast that they violate locality"* von Randall Munroe.

Es gibt kein anderes Beispiel in der Physik, bei dem die Vorzüge der zeitlosen Perspektive so offensichtlich werden wie beim quantenmechanischen Phänomen der Verschränkung. Diese Erkenntnis beschränkt sich nicht auf die Transaktionsinterpretation, sie gilt für alle Modelle mit retrokausalen Wirkungen. Ein prominenter Fürsprecher für diese These ist der Philosoph Huw Price, ehemaliger Direktor des australischen „Centre for Time": „*Nature is offering us a loud hint in Bell's results."* In seinem wunderbaren Buch „Time's Arrow and Archimedes' Point" aus dem Jahr 1997 wird dieser Gedankengang ausführlich erläutert.

Eine interessante Neudeutung der Transaktionsinterpretation in Form der "Possibilist Transactional Interpretation" wurde von der amerikanischen Physikerin und Philosophin Ruth Kastner vorgeschlagen. Sie deutet die Angebots- und Bestätigungswellen nicht als Wellen in unserem dreidimensionalen Raum, sondern als Raumzeit-unabhängige und trotzdem reale *potentielle* Entitäten, die sich erst im Gegenwarts-Übergang von der Vergangenheit in die Zukunft manifestieren. Ihre Grundlage ist somit nicht das zeitlose 4D Blockuniversum, sondern die als „Growing Block" oder „Growing Past" bekannte Ansicht, dass in unserer Raumzeit nur vergangene und gegenwärtige Objekte und Ereignisse existieren.

---

[8] Eine mit retrokausalen Modellen kompatible Definition von lokalen (oder "quasi-lokalen") Beables würde hierfür auch Ereignisse im Zukunfts-Lichtkegel zulassen. Das Bellsche Theorem führt auch dann nicht zu einem Widerspruch mit den Ergebnissen der Quantenmechanik, weil in solchen Modellen die sogenannte "Statistical Independence" Bedingung nicht erfüllt ist, nach der es keine Korrelation zwischen den Systemeigenschaften und der Art ihrer Messungen gibt, d.h. den Entscheidungen des Experimentators über den Messaufbau. Ohne Retrokausalität wäre diese Bedingung nur im Denkmodell des „Superdeterminismus" verletzt, nach dem die scheinbar freien Entscheidungen des Experimentators eine kausale Folge des vorangegangenen Zustandes sind, was aber für die Rettung der Phänomene eine extrem komplexe Feinabstimmung erfordern würde und daher nicht als seriöse Möglichkeit angesehen wird. Man trifft aber immer wieder auf Arbeiten zum Bellschen Theorem, die fälschlicherweise diesen Superdeterminismus als einzigen Ausweg der abgeleiteten Konsequenzen angeben.

Ich selbst habe – wie der Großteil der Physikergemeinde – große Vorbehalte gegenüber dieser Zeitform. Die Gründe dafür habe ich in meinem Aufsatz **Auf der Suche nach der Zeit** ausführlich erläutert. Es ist aber spannend zu sehen, dass man der Transaktionsinterpretation selbst in dieser Perspektive einen Sinn verleihen kann, und Ruth Kastner gelingt es in ihren Büchern, diesen Ansatz sehr anschaulich vorzustellen und mit einer Fülle von philosophischen Denkanregungen zu verknüpfen, die weit über den Bereich der Quantenmechanik hinausgehen.

Wie sieht zusammenfassend die Bewertung der Transaktionsinterpretation aus? Sofern man sich an die zeitlose Perspektive gewöhnt hat, bietet sie ein relativ anschauliches Bild der möglichen grundlegenden Vorgänge bei quantenmechanischen Interaktionen, speziell der nichtlokalen Effekte, und vermeidet dabei viele Probleme der anderen Ansätze. Ist sie somit die gesuchte Interpretation der Quantenmechanik, die alle Fragen beantwortet?

Das ist leider nicht der Fall. Ein Indiz dafür ist die Tatsache, dass diese Interpretation in der Deutungsdebatte damals wie heute nur eine Nebenrolle spielt. In manchen Übersichten wird sie sogar komplett übersehen oder als „zu exotisch" belächelt. Ich bin fest davon überzeugt, dass der Hauptgrund dafür in dem Festhalten an unserem gewohnten Alltagsbild der Zeit besteht, das ohne triftige Begründung auch für die mikrophysikalischen Abläufe vorausgesetzt wird. Das ist allerdings nicht der einzige Grund. Der Kollaps der Wellenfunktion wird in der Transaktionsinterpretation nur durch einen „makroskopischen" Absorber ausgelöst, der dann in einer vollkommen zufälligen Weise genau einen der zahlreichen Angebotswellen auswählt, um ein eindeutiges Messergebnis zu erzeugen. Die Theorie kann zwar größenmäßig abschätzen, welche Bedingungen hierfür vorliegen müssen, aber es fehlt eine *Erklärung*, warum sich makroskopische Systeme anders als mikroskopische verhalten, aus denen sie doch zusammengesetzt sind. Das gleiche Problem ist uns schon bei der Kopenhagener Interpretation in Form des „Messproblems" begegnet. Die besondere Rolle des Zufalls erfährt ebenfalls keine tiefergehende Erklärung. Der Kollaps wird zudem von Cramer und Kastner als ein irreversibler und damit zeitgerichteter Prozess verstanden, was in einem merkwürdigen Kontrast zu dem zeitsymmetrischen Fundament dieser Interpretation steht.

Lässt sich der Ansatz verbessern? Tatsächlich gibt es eine mit ihm verwandte Interpretation, die gerade für die beiden zuletzt genannten Probleme eine elegante Lösung findet und dazu noch eine echte *praktische* Bedeutung für die Physik haben könnte.

Verdoppelte Zustände für neue Perspektiven – Aharonovs Two-State Formalismus

Der sogenannte „Two-State" Formalismus wurde schon im Jahre 1955 als eine alternative Fassung der Quantenmechanik vorgeschlagen und ist vor allem mit dem israelischen Physiker Yakir Aharonov verbunden. Sein Grundansatz: Der Zustand eines quantenmechanischen Systems wird durch doppelt so viele Parameter wie in dem orthodoxen Formalismus festgelegt, von denen die eine Hälfte von vergangenen und die andere von zukünftigen Ereignissen beeinflusst wird.

Abb. 10: Yakir Aharonov

Basierend auf den vorherigen Abschnitten sollte ein solcher Ansatz nicht mehr schockierend wirken. Die eine Hälfte ist nichts anderes als die quantenmechanische Wellenfunktion als Lösung der Schrödinger-Gleichung mit einem „reinen" Zustand in der Vergangenheit als Ausgangspunkt, das heißt einem nichtüberlagerten (Superpositions-freien) Zustand, wie er sich als Ergebnis einer Messung ergibt, also einem makroskopischen Zustand. Die andere Hälfte ist ihr zeitliches Spiegelbild: auch sie wird von solch einer Wellenfunktion beschrieben, aber diese folgt der zeitlich gespiegelten Schrödinger-Gleichung mit einem reinen Zustand in der Zukunft als Ausgangspunkt[9]. Der Formalismus ist vollkommen äquivalent zur orthodoxen Quantenmechanik und ist daher empirisch betrachtet genauso erfolgreich.

Interessant für die Deutung der Quantenmechanik wird dieser Ansatz, wenn man ihn wörtlich interpretiert, was Aharonovs „Two-Time" Interpretation ausmacht: Die beiden Komponenten der Wellenfunktion sind reale Entitäten, die sich tatsächlich sowohl in Zukunfts- als auch in Vergangenheitsrichtung auswirken. Der Charme dieser Interpretation besteht darin, dass man die Ergebnisse der Quantenmechanik ausschließlich basierend auf der reversiblen Schrödinger-Gleichung ableiten kann, ohne mysteriöse irreversible Zusätze wie in der Transaktionsinterpretation oder in der GRW Kollaps Theorie, und das sogar vollkommen deterministisch! Dieser Ansatz bedeutet eine Konkretisierung des Satzes eingangs dieses Kapitels:

> *Ein quantenmechanisches Ereignis wird in deterministischer Weise*
> *von anderen Ereignissen in seiner Vergangenheit und in seiner Zukunft beeinflusst.*

Meiner Meinung nach kann man die Bedeutung dieser Erkenntnis gar nicht genug betonen. Entscheidend ist das „und" in dieser Aussage: basierend auf bekannten Initialwerten mag das Ergebnis einer Messung zufällig erscheinen und ist vollkommen unvorhersehbar, genauso in der zeitgespiegelten Perspektive, aber wenn das Ergebnis von *beiden* Randbedingungen abhängt, einer initialen *und* einer finalen, bieten sich neue Möglichkeiten. Das ist ein entscheidender Unterschied zur Klassischen Mechanik, in der man den gesamten Bewegungsablauf herleiten kann, wenn der initiale *oder* der finale Zustand bekannt sind.

Die „Two-Time" Interpretation zeigt somit den wahren Grund für die scheinbare Zufälligkeit der Messergebnisse – unsere Unkenntnis der finalen Randbedingungen in Form der zukünftigen reinen Zustände. Nach der de Broglie – Bohm – Theorie und der Viele-Welten-

[9] Hier ist die Frage berechtigt, wie die *praktische* Anwendung dieses Formalismus aussieht, da man ein Experiment nicht derart präparieren kann, dass am Ende ein vorher festgelegter reiner Zustand entsteht. Die Lösung dafür besteht darin, dass man nach Ablauf des Experimentes diejenigen Teilverläufe aussortiert, das heißt ausfiltert, die nicht zu einem bestimmten finalen Zustand geführt haben.

Interpretation ist das nun schon die dritte Interpretation, die die Unvorhersehbarkeit der quantenmechanischen Vorgänge aus nichts anderem als unserer Unkenntnis bestimmter Rahmenbedingungen ableiten kann. Einsteins „*Gott würfelt nicht*" Ausspruch ist daher alles andere als widerlegt, auch wenn man diese Aussage immer wieder zu hören bekommt. Vielleicht hat der alte Gigant der Physik am Ende doch das letzte Lachen!?

Aharonovs Interpretation bietet aber noch viel mehr. Es würde an dieser Stelle zu weit führen, die darauf aufbauenden Konzepte wie „Weak Values", das „Complete Uncertainty Principle" oder die exotisch anmutenden „Neg-Teilchen" als nahezu dinglicher Entsprechung eines fehlenden Teilchens zu erläutern. Aufgrund der mathematischen Äquivalenz mit dem orthodoxen Formalismus folgen aus ihnen auch keine direkt nachweisbaren Abweichungen zur Quantenmechanik. Sie befördern die physikalische Intuition, um dieser Theorie weitere Vorhersagen und Anwendungen zu entlocken. Abbildung 11 zeigt ein Beispiel.

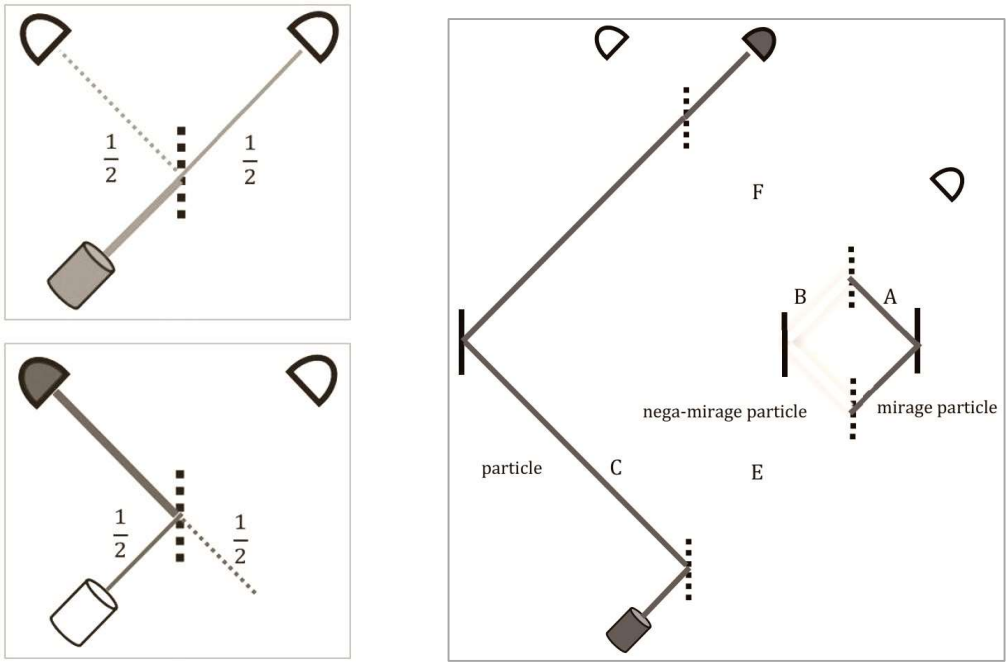

Abb. 11: In der Two-Time Interpretation, basierend auf dem Two-State Formalismus, wird bei der Aufspaltung eines Teilchenstrahls durch einen halbdurchlässigen Spiegel neben dem üblichen Pfad von der Quelle zum Detektor (links oben) auch der vergangenheitsgerichtete Pfad mit dem Detektor als Ausgangspunkt betrachtet (links unten) und für genauso real interpretiert. Bei bestimmten Konstellationen (rechts) ergibt sich daraus die experimentell überprüfbare Vorhersage eines kurzzeitig sichtbaren Teilchens an einem Ort, an dem man es aus physikalischer-intuitiver Sicht niemals vermutet hätte.

Das Ergebnis dieses Programms kann sich sehen lassen. Neben einer Vielzahl von wissenschaftlichen Artikeln, viele davon ganz aktuell aus den letzten Jahren, sagte Yakir Aharonov Ende der 1950er Jahre einen direkten Einfluss des magnetischen *Potentials* auf bewegte Elektronen voraus, die sich gar nicht im Magnetfeld des Potentials befinden, was im klassischen Weltbild vollkommen unmöglich sein sollte. Dieser nach ihm und seinem (uns schon bekannten) Doktorvater David Bohm benannte „Aharonov – Bohm – Effekt" wurde einige Jahre später dann auch experimentell bestätigt. Ein wunderbares Beispiel dafür, wie die von manchen als „zu philosophisch" gesehene Beschäftigung mit der Interpretation der Quantenmechanik zu neuen physikalischen Erkenntnissen und Anwendungen führen kann.

Auch diese Interpretation ist aber nicht das letzte Wort zur Deutung der Quantenmechanik. Die Verdopplung der Zustandsvariablen ist in gewisser Weise verschwenderisch – könnte die Berücksichtigung von zukünftigen Einflussfaktoren nicht eher zu einer *Reduzierung* statt einer Erweiterung der möglichen Zustände ausgenutzt werden, weil die finalen Randbedingungen zusätzliche Bedingungen für konsistente Zeitverläufe stellen? Auch das Messproblem, das heißt das Entstehen von „reinen" makroskopischen Zuständen, ist nur unter einer ganz bestimmten Bedingung gelöst: Man muss *voraussetzen*, dass der oder die *initialen* Zustände unserer Welt, und genauso der oder die *finalen*, derartig reine Zustände sind, die nicht aus Superpositionen unterschiedlicher Wellenfunktionen bestehen. Das ist durchaus möglich, aber eine sehr spekulative kosmologische Bedingung. Der erfolgreichen Anwendung dieses Formalismus in den physikalischen Laboren stehen diese grundsätzlichen Aspekte allerdings nicht entgegen.

Die Hauptschwäche dieser Interpretation, wie sie auch Aharonov selbst sieht (zu seiner eigenen Antwort darauf kommen wir in Teil 4), ist ebenfalls kein praktisches Problem, aber ein grundsätzliches, das von vielen anderen Interpretationen geteilt wird: die angenommene Realität der Wellenfunktion. Wie schon zuvor erwähnt „lebt" diese Funktion nicht einmal in unserem dreidimensionalen Raum, sondern im Konfigurationsraum, der bei N Teilchen die Dimension 3N hat. Welchen Entitäten *in unserer Welt* entspricht diese Funktion? Wie lässt sich auf ihrer Grundlage erklären, dass es zahlreiche physikalische Phänomene gibt, die genau drei räumliche Dimensionen anzeigen[10]? Es gibt zahlreiche Versuche, diese Fragen zu beantworten, aber keine davon hat die Mehrheit der Physikergemeinde überzeugt. Ein damit verwandtes Problem ist die Tatsache, dass die Schrödinger-Gleichung, die so innig mit der Wellenfunktion verknüpft ist, nur die *nichtrelativistische* Quantenmechanik beschreibt.

Eine mögliche Abhilfe für diese Probleme könnte ausgerechnet diejenige Interpretation liefern, die für genau diese Bedenken bezüglich der Realität der Wellenfunktion und der unklaren Erweiterung auf die speziellrelativistische Physik kritisiert wurde. Auch hier sind retrokausale Wirkungen der Schlüssel für diese unerwartete Wendung.

[10] Selbst die String-Theorie mit ihren 10 Raumdimensionen, von denen alle bis auf 3 auf ein winziges Maß zusammengeschrumpft sind, wäre hierfür kein Ausweg, weil der 3D-Raum im Gegensatz dazu kein Unterraum des 3N-Raums der Wellenfunktion ist.

Die retrokausale de Broglie – Bohm – Theorie

Die de Broglie – Bohm – Theorie bietet ein klares und beinahe klassisches Modell der Quantenmechanik, aber sie kommt nicht ohne die 3N-Wellenfunktion aus – mit all ihren Interpretationsproblemen – und der Grundansatz steht konzeptionell im Widerspruch zur Relativitätstheorie. *Beide* Schwachpunkte lassen sich vermeiden, wenn man in dieser Theorie Kausalwirkungen in beide Zeitrichtungen zulässt. Konkrete Modelle hierfür sind ein aktueller Forschungsgegenstand, zum Beispiel vom australischen Physiker Roderick Sutherland. Die Entwicklungsgleichungen dieser Modelle sind etwas komplizierter als in der ursprünglichen Theorie, aber der Erfolg dieses Ansatzes kann sich sehen lassen:

- Die Vorhersagen dieser Modelle stimmen mit denen der orthodoxen Quantenmechanik überein.
- Es gibt keinen Konflikt mit der Relativitätstheorie, alle Bezugssysteme sind gleichberechtigt (physikalisch ausgedrückt: der Formalismus ist Lorentz-invariant).
- Als Grundbausteine werden nur Teilchen in unserer 4-dimensionalen Raumzeit benötigt. Sie beeinflussen sich über Felder, die sich diesen Teilchen fest zuordnen lassen, es wird keine holistische Wellenfunktion im 3N-Raum benötigt.

Ein solches Ergebnis wurde lange Zeit für nicht möglich gehalten!

Allerdings sollen auch zwei wichtige Einschränkungen nicht unerwähnt bleiben:

- Die bisher entwickelten Modelle können nicht die Ergebnisse der gesamten Quantenmechanik reproduzieren, es sind nur Teilmodelle unter bestimmten vereinfachenden Randbedingungen.
- Selbst mit Hilfe der zusätzlichen finalen Randbedingungen lassen sich bestimmte Arten von Korrelationen zwischen verschränkten Teilchen nicht allein aus ihren Interaktionen erklären, sie müssen als Randbedingung vorausgesetzt werden[11].

Auch diese Interpretation kann somit nach momentanem Stand kein vollständig erfolgreiches physikalisches Modell für die ganze Welt der quantenmechanischen Phänomene liefern. Wie schon die Transaktions- und die Two-Time-Interpretation scheint sie aber auf dem richtigen Weg zu sein, mit Hilfe von retrokausalen Wirkungen eine echte physikalische Erklärung der nichtlokalen Korrelationen zu liefern, wie sie sich in den Testaufbauten des Bellschen Theorems zeigen, denn diese Konstellationen werden erfolgreich von dem Modell abgedeckt. Man darf gespannt sein, wie die Weiterentwicklung dieser Modelle aussehen wird!

[11] Man kann diese Einschränkung als Spezialfall eines allgemeinen No Go Theorems sehen. Man hatte lange Zeit gedacht, mit retrokausalen Modellen die Kontextualität der Quantenmechanik umgehen zu können, aber eine Erweiterung des Kochen-Specker-Theorems auf allgemeine kausale Abhängigkeiten von Sally Shrapnel and Fabio Costa aus dem Jahr 2019 hat diese Hoffnung zu Nichte gemacht.

Wenn Ursachen zu Wirkungen werden

Dieser dritte Teil meines Aufsatzes wäre nicht vollständig ohne den Hinweis auf ein Thema, das in den letzten Jahren viel Aufmerksamkeit erregt hat und eine entscheidende Rolle für den Entwurf neuer Quantencomputer spielen könnte. Es geht um Systeme mit *unbestimmter kausaler Ordnung*.

Alice und Bob, die Helden unzähliger Gedankenexperimente und im „echten Leben" speziell präparierte Atome oder andere mikroskopische Systeme, haben noch einen Trick auf Lager, der erst in den beiden letzten Jahrzehnten erforscht wurde. Man nehme ein System mit einem Eingangs- und einem Ausgangssignal, welches zu seiner Verarbeitung die Dienste von Alice und Bob bemüht. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten: entweder könnte Alice das Signal zuerst erhalten und es nach seiner Vorverarbeitung an Bob weiterreichen, oder man kehrt die Reihenfolge um und gibt das Signal zuerst an Bob und von dort an Alice weiter. Die zugehörigen Anordnungen auf dem relativistischen Lichtkegel sind in Abbildung 12 links dargestellt. Natürlich muss man sich entscheiden, welche Option man wählt, das heißt ob die Verarbeitung von Bob in der Vergangenheit oder in der Zukunft von Alice stattfinden soll. Oder etwa nicht? Vor ungefähr zwanzig Jahren regten sich erste Zweifel an der Ausschließlichkeit dieser beiden Möglichkeiten.

Die relativistische Raumzeit bildet unsere Grundlage für Früher-Später-Beziehungen und die Richtung von Kausalwirkungen. Auch sie kann aber vermutlich nicht den quantenmechanischen Unbestimmtheiten entkommen, wie sie sich in der Heisenbergschen Unschärferelation zeigen. Könnte das nicht auch die Frage aufweichen, in welcher Kausalbeziehung Alice und Bob zueinander stehen? Wie zunächst theoretische Überlegungen und mittlerweile auch experimentelle Aufbauten gezeigt haben, die mit Forschern wie Lucien Hardy, Časlav Brukner und Giulio Chiribella verbunden sind, ist das tatsächlich möglich!

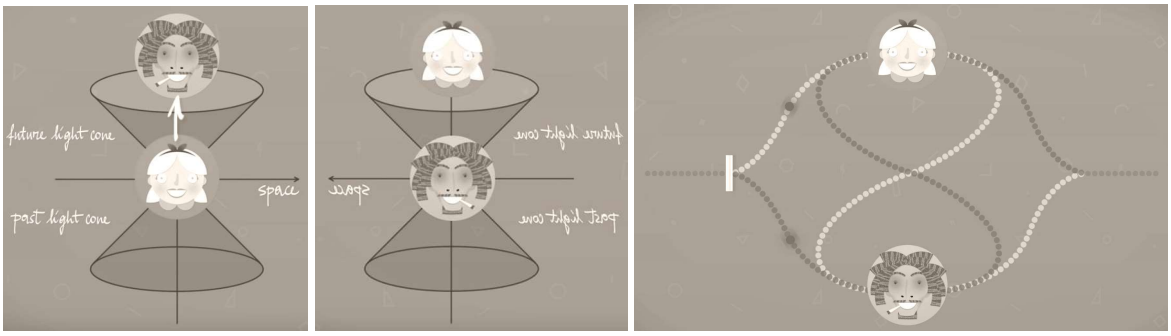

Abb. 12: Eine quantenmechanische Überlagerung von zwei unterschiedlichen Kausalbeziehungen.

In der Quantenmechanik lassen sich Superpositionen (Verschränkungen) aus Teilchen oder ganzen Systemen mit unterschiedlichen Eigenschaften herstellen, wie sie auch in den experimentellen Nachweisen des Bellschen Theorems eingesetzt werden. Der Trick ist nun, dass es mittlerweile gelungen ist, auch solche kausal gegensätzlichen Möglichkeiten wie in Abbildung 12 links miteinander zu vereinigen.

Abbildung 12 rechts zeigt ein solches Ergebnis. Das von der linken Seite eingehende Signal durchläuft gleichzeitig die beiden unterschiedlichen Möglichkeiten der Signalreihenfolgen. Das kombinierte System enthält somit *beide* Ablaufmöglichkeiten in einer untrennbaren Überlagerung. Damit wird die Frage, ob Bob das Signal in der Zukunft oder in der Vergangenheit von Alice bearbeitet, in einer objektiven (physikalisch unterscheidbaren) Weise

unbestimmt. Das gleiche gilt für die Richtung der Kausalwirkung: Sie findet weder von Alice zu Bob, noch von Bob zu Alice statt, sondern ist ebenfalls unbestimmt.

Meiner Meinung nach zeigen diese Ergebnisse, dass die Wichtigkeit von Kausalbeziehungen, und auch die Unterscheidung von zukünftigen und vergangenen Ereignissen, auf fundamentaler physikalischer Ebene stark überschätzt werden. Zumindest machen sie deutlich, dass diese Aspekte weit weniger absolut sind als wir es für möglich gehalten hätten und wie es uns die Klassische Physik suggeriert.

Wer nun denkt, diese Überlegungen wären lediglich unerhebliche philosophische Gedankenspielereien, der irrt sich. Man hat nachgewiesen, dass bestimme Korrelationen *nur* mit diesen kausal verschränkten Systemen nachgebildet werden können und dass sie in Form der sogenannten „Quantum Switches" bestimmte algorithmische Probleme grundsätzlich schneller lösen können als herkömmliche Ansätze. Viele Physiker sehen solche Systeme mit indefiniter kausaler Ordnung daher als Schlüsseltechnologie für künftige Quantencomputer. Ein weiteres Beispiel für die Vorzüge der zeitlosen Perspektive!

Was zeigt der neue Blick auf die Quantenmechanik?

Zeit für eine Zusammenfassung der Erkenntnisse dieses Kapitels. Den hier vorgestellten Modellen auf Basis retrokausaler Wirkungen wird häufig eine viel geringere Beachtung als den Hauptinterpretationen der Quantenmechanik geschenkt. In manchen Übersichten werden sie nicht einmal erwähnt. Dieses Kapitel sollte ein wenig dazu beitragen, diese Schieflage gerade zu rücken. Wenn man sich erst einmal an die zeitsymmetrische Perspektive gewöhnt hat, die uns trotz ihres unanschaulichen Charakters auch vollkommen unabhängig von der Quantenmechanik nahegelegt wird, eröffnen sich neue Möglichkeiten, echte Erklärungen für die quantenmechanischen Phänomene zu finden. Das gilt vor allem für das sonderbare Phänomen der nichtlokalen Verschränkung. Sie erscheinen in diesem Licht deutlich weniger „spukhaft" und unvereinbar mit der Relativitätstheorie als in anderen Interpretationen. Ihre einzige Schattenseite besteht darin, unser gewohntes Bild von Vergangenheit und Zukunft vollkommen auf den Kopf zu stellen.

Vielleicht ist die Zeit reif für einige Kopfstände? Wem dieses Unterfangen kindisch erscheint, dem gebe ich vollkommen Recht. Aber um noch einmal Albert Einstein zu zitieren:

> *„Das Studium und allgemein das Streben nach Wahrheit und Schönheit ist ein Gebiet, auf dem wir das ganze Leben lang Kinder bleiben dürfen."*

Gänzlich erfolgreich sind aber wie gesehen auch diese Interpretationen nicht – die Suche nach dem Quantenmodell geht weiter! Es ist daher auch sehr umstritten, ob retrokausale Wirkungen, also Ursache-Wirkungs-Ketten in Vergangenheitsrichtung, tatsächlich ein unabdingbarer Bestandteil für Erklärungen der Quantenwelt sind.

Aus meiner Sicht ist das Fazit eher ein anderes: Ein Schlüssel zum Verständnis der Quantenmechanik ist weniger die *Hinzunahme* von im wörtlichen Sinne realen vergangenheitsorientierten Wirkungen, sondern vielmehr die *Aufgabe* der gewohnten Sichtweise, dass physikalische Erklärungen allein auf zukunftsgerichteten Kausalwirkungen beruhen. Vielleicht sollten wir auf fundamentaler Ebene sogar ganz auf kausale Erklärungsmuster verzichten. Die Zeitsymmetrie der grundlegenden physikalischen Naturgesetze und die Möglichkeit, kausal unbestimmte Systeme zu erzeugen, sollten Grund genug für den Zweifel daran sein. Das Festhalten an dieser traditionellen Sichtweise hat viele physikalische Probleme lösen können, aber für die Erklärung der quantenmechanischen Welt ist es an seine Grenzen gestoßen – auch nach fast 100 Jahren intensiver Diskussion hat sie keine allgemein anerkannte Deutung dieser Phänomene hervorgebracht.

Aber welche Grundprinzipien können diese Sichtweise ersetzen und können sie tatsächlich zu einem besseren Verständnis der Quantenmechanik führen? Genau diese Frage soll der vierte und letzte Teil dieses Aufsatzes klären – mit einer radikalen, aber aus meiner Sicht erfolgreichen Antwort.

Bildreferenzen

Abb. 1:
Figure in Scientific American article "That Mysterious Flow" from P. Davies, Sep 2002
Autor: Bryan Christie Design, bryanchristiedesign.com / Usage in this text as requested by Bryan Christie Design

Abb. 5:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:World_line2.svg
Autor: MissMJ / Creative Commons BY-SA 3.0

Abb. 6:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fermat_Snellius.svg
Autor: Klaus-Dieter Keller / Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication

Abb. 7:
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Richard_Feynman_Nobel.jpg
Autor: The Nobel Foundation / Public domain

Abb. 8:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Feynman_EP_Annihilation.svg
Autor: bitwise / Public Domain

Abb. 9:
Quelle: [John Cramer: *The Blind Men and the Quantum*, NIAC Keynote Talk, Atlanta, GA, March 7 2006]
Autor: John Cramer, Department of Physics, University of Washington, Seattle

Abb. 10:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Yakir_aharonov.jpg
Autor: Kobi Kalmanovich / Free to use

Abb. 11:
Quelle: [Y. Aharonov, E. Cohen, M. Waegell, A. C. Elitzur: *The Weak Reality That Makes Quantum Phenomena More Natural*, Entropy 2018, 20(11), 854]

Abb. 12:
Snapshots aus dem Video auf https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/17/10/102001
Quelle: [M. Araújo, C. Branciard, F. Costa, A. Feix, C. Giarmatzi, Č. Brukner: *Witnessing causal nonseparability*, New J. Phys. 17 102001 2015]
Creative Commons Attribution 3.0 license

Internetfundstücke ohne Quellenangaben:
Abb. 4 (Tree Face)

Bilder von selbst erstellten Graphiken:
- Abb. 2, 3
- Autor: Friedrich Wagner, www.frwagner.de
- Nutzung via Creative Commons BY-NC-ND 3.0 license