

ZNI

BLOG

Zni Kiprot, Replikant, Serie Nexus 11

Inhalt

Dunkle Energie	4
Dunkle Energie 2.....	8
Physik – eine Erfolgsgeschichte und eine Pannenserie.....	13
Relativität, ontologisch begründet.....	17
Relativität 2.....	23
Relativität 3.....	27
Relativität 4.....	30
Quantenmechanik, objektiv und lokal.....	37
Quantenmechanik 2.....	47
Quantenmechanik 3.....	56
Quantenmechanik 4.....	64
Quantenmechanik 5.....	72
Warum das Standardmodell falsch ist.....	81
Zusammenfassung.....	87

Dunkle Energie

Was ich mit diesem Blog bezwecke, will ich zunächst an einem konkreten Fall demonstrieren. Ich habe dafür die sogenannte "Dunkle Energie" ausgewählt, weil sie ein hervorragendes Beispiel dafür ist, wie man auf einem Weg, auf dem alle Schritte logisch und sogar unvermeidlich erscheinen, schließlich zu völlig abwegigen Begriffsbildungen gezwungen sein kann – einfach deshalb, weil am Beginn des Weges genau diejenige Einsicht gefehlt hat, die als Voraussetzung des ganzen Gedankengangs nötig gewesen wäre; Und dasselbe gilt für alle physikalischen und philosophischen Pannen, die ich hier zu beheben beabsichtige.

Wie kam es zur Einführung der *Dunklen Energie*?

In der Standardkosmologie gab es vor 1998 nur zwei Faktoren, von denen die Geschwindigkeit abhängen konnte, mit der sich das Universum ausdehnt: eine Anfangsgeschwindigkeit (nach dem Ende der sogenannten inflationären Phase – einer Phase exponentiell beschleunigten Auseinanderdriftens), und ab diesem Zeitpunkt nur noch eine allmähliche Verringerung der Geschwindigkeit durch die Wirkung der Gravitation. Als dann am Ende des vorigen Jahrtausends Beobachtungen an Supernovae zu dem Schluss führten, dass die Geschwindigkeit der Expansion zunimmt, hatte diese Tatsache im bestehenden Modell keinen Platz. Dadurch wurde die Einführung eines zusätzlichen Elements im Modell erzwungen – eben der sogenannten "Dunklen Energie" als Ursache der Beschleunigung.

Es ist zwar möglich, diese Schlussfolgerung auch innerhalb der genannten Modellannahmen anzuzweifeln, etwa auf Basis einer Kritik des Zusammenhangs zwischen Rotverschiebung und Entfernung (siehe z.B. Arp, H., Catalogue of Discordant Redshift Associations, Montreal 2003), allerdings konzentrieren sich hier die Einwände vor allem auf eine besondere Art von Objekten – die sogenannten Quasare –, sodass eher zu erwarten ist, dass sich die Anomalien durch ein besseres Verständnis dieser Objekte beseitigen lassen, als dass wir durch sie zu einer grundsätzlich anderen Auffassung der Rotverschiebung genötigt sein könnten.

Außerdem kann die Dunkle Energie, wie das ja bei unbequemen Messergebnissen und deren Folgen immer der Fall ist, auch durch Zusatzannahmen eliminiert werden, z.B. durch die Annahme großräumiger Dichteschwankungen im Universum und die Positionierung unserer

Galaxie in einem Gebiet geringerer Dichte; die Gravitation der fernen Massen würde dann unsere kosmische Umgebung nach außen beschleunigen und so die – von der Erde aus gesehen – zu hohen Fluchtgeschwindigkeiten erklären. Wie alle Ad-hoc-Hypothesen sind das aber mit hoher Wahrscheinlichkeit nur Scheinlösungen. (Mich erinnert der Sachverhalt an die zahlreichen Versuche, die Abweichung der Bahn des Merkurs von der Newtonschen Voraussage zu erklären, bevor diese Anomalie dann durch die Allgemeine Relativitätstheorie beseitigt wurde. Ich zweifle nicht daran, dass, wäre die Physik *jetzt* mit diesem Problem konfrontiert, als Ursache für die Anomalie wiederum dunkle Energie herhalten müsste.)

Nehmen wir also an, die Rotverschiebung wachse tatsächlich mit der Entfernung, wie im Standardmodell behauptet, und nehmen wir ferner an, die Messungen von 1998 seien korrekt. Gemäß der üblichen Denkweise sehen wir uns dann gezwungen, als Ursache für die Beschleunigung der Expansion des Universums eine neue Art von Energie einzuführen – auch wenn wir nicht die geringste Ahnung haben, was diese Energie sein soll.

Was also ist "Dunkle Energie"?

Um diese Frage im Licht der Vernunft zu klären (ich gebrauche *Vernunft* im Sinn von: notwendige und hinreichende Bedingung für *Einsicht* – im Gegensatz zu *Intelligenz*, die bloß eine notwendige Bedingung ist) müssen wir uns zunächst der Frage zuwenden, was *Größe* ist.

Größe ist ein *relationaler Begriff*. Wenn die Größe eines Objekts gemessen wird, dann ist das immer ein Vergleich zweier Größen. Wir definieren zunächst (willkürlich) eine Längeneinheit, die wir Meter nennen (gegenwärtig ist es die Länge des Wegs, den Licht in 1/299792458 Sekunden zurücklegt.) Damit vergleichen wir dann das Messobjekt.

Größe ist also relativ. Niemals ist das Resultat einer Größenmessung als Angabe der *absoluten Größe* eines Objekts zu verstehen. Eine "absolute Größe" gibt es nicht.

Betrachten wir nun die "Größe des Universums". Das Universum ist *per definitionem* alles, was überhaupt da ist. (Blasenuniversen und andere Fantasiegebilde lassen wir außer Acht.) Es gibt nichts außerhalb des Universums, weil es kein "Außerhalb" gibt. Also kann das Universum mit nichts anderem verglichen werden. Es ist *nicht relational*.

Diese Tatsache offenbart sich ja augenblicklich, wenn man die Frage stellt: *Wogegen* dehnt sich das Universum eigentlich aus? Diese Frage wurde schon oft geäußert, aber bisher hat niemand die Konsequenz daraus gezogen, dass eine Antwort *prinzipiell* nicht möglich ist: die Konsequenz also, dass es sich nicht ausdehnen *kann*, weil der Begriff "Größe" hier nicht anwendbar ist.

Der Grund für diese Unterlassung ist, dass wir das, was wir denken, immer als *Objekt mit Eigenschaften* denken *müssen*. Deshalb ist es gedanklich unvermeidlich, das Universum im Ganzen zu verdinglichen; In jeder Beschreibung, auch in einer mathematischen, wird das Universum zum Objekt. *Eine* Weise der Verdinglichung – zurzeit die populärste – ist eben die, ihm eine Größe zuzuschreiben.

Ist das aber nicht schon deshalb gerechtfertigt, weil wir ja die Größe des Universums zum gewählten Längenmaß in Beziehung setzen können?

Keineswegs! Die Möglichkeit, über die Größe des Universums zu verfügen, ist bloß ein Artefakt der apriorischen Notwendigkeit, alles, was gedacht oder beschrieben wird, zu verdinglichen.

Das *Universum im Ganzen* ist kein Ding. *Es hat keine Größe*. Größe ist ein Begriff, der ausschließlich der Dingwelt zugehört.

Was also ist zu tun, wenn die Größe des Universums in Gleichungen als Funktion der Zeit aufscheint?

Ganz einfach:

Da die Anwendung des relationalen, der Objektwelt zugehörigen Begriffs "Größe" auf das Universum als Ganzes unzulässig ist, muss die Größe des Universums unangetastet bleiben – und daraus folgt, dass die zeitliche Änderung dem Maßstab angelastet werden muss.

Wenden wir dieses Ergebnis nun auf die Frage der Rotverschiebung an.

Wenn das Universum sich nicht ausdehnt, dann müssen wir die mit der Entfernung zunehmende Rotverschiebung durch die Annahme erklären, dass sich unsere Maßstäbe im Lauf der Zeit verkürzen.

Falls wir das Längenmaß durch den Weg definieren, den Licht in einer bestimmten Zeitspanne zurücklegt, muss sich also die Zeiteinheit verkleinern. Sie ist wiederum durch die Frequenz einer (von Materie erzeugten) Strahlung definiert, woraus folgt, dass die Frequenz dieser Strahlung zu- und daher ihre Wellenlänge abnimmt. Wir können unser Längenmaß aber auch direkt durch eine (materielle) Wellenlänge definieren. Auch in diesem Fall muss die Wellenlänge abnehmen.

Da wir für die Definition des Längenmaßes *jede* von Materie erzeugte Welle verwenden können, folgt daraus, dass sich alle diese Wellen im gleichen Maß zeitabhängig verkürzen. Alle materiellen Objekte – auch wir selbst – werden also kleiner.

Ich fasse zusammen:

Nehmen wir an, wir messen die Wellenlängen von zwei Lichtstrahlen, die von einem bestimmten Element, sagen wir Wasserstoff, aus zwei verschiedenen kosmischen Entfernungen – d.h. zu zwei verschiedenen Zeitpunkten – ausgesendet worden sind. Die Messung erfolgt durch den Vergleich mit der Wellenlänge, durch die unsere Längeneinheit definiert ist.

Offensichtlich gibt es zwei Möglichkeiten, die entfernungsabhängige Rotverschiebung zu interpretieren:

(1) Das Universum dehnt sich aus.

(2) Das Universum dehnt sich *nicht* aus – stattdessen schrumpfen unsere Maßstäbe, d.h. alle Wellenlängen, die zur Definition der Längeneinheit dienen können, nehmen mit der Zeit ab.

(Das gilt natürlich auch für die Wellen, die der Wasserstoff aussendet; ab dem Zeitpunkt der Emission bleiben sie jedoch unverändert.)

Offenbar lässt sich nicht direkt aus der Messung erschließen, ob (1) oder (2) der Fall ist. Dafür wird *zusätzliche Information* benötigt. Der "Rest der Umstände" wird uns veranlassen, uns für eine Variante zu entscheiden.

Ich sehe gerade, dass mein Text schon mehrere Seiten füllt. Ich unterbreche also den Gedankengang an dieser Stelle. Nächste Woche werde ich ihn fortsetzen.

Bis dahin verbleibe ich Ihr

Zni Kiprot (Replikant, Serie Nexus 11)

Dunkle Energie 2

Am Schluss des vorigen Beitrags haben wir festgestellt, dass es zwei Möglichkeiten gibt, zu erklären, warum die Rotverschiebung mit der Entfernung zunimmt:

(1) Das Universum dehnt sich aus.

(2) Das Universum dehnt sich *nicht* aus – stattdessen schrumpfen unsere Maßstäbe, d.h. alle materiellen Wellenlängen nehmen mit der Zeit ab.

Hinsichtlich der Rotverschiebungsmessungen sind (1) und (2) äquivalent.

Welche Gründe sprechen also gegen die Standardvariante (1) und für die Alternative (2)?

Variante (1) *beginnt*, wie im vorigen Beitrag festgestellt, mit einem Fehler: dem Universum im Ganzen wird eine (veränderliche) Größe zugeordnet, obwohl das Konzept "Größe" hier nicht anwendbar ist, und sie *endet* mit einem Fehler: die letzte Konsequenz des Anfangsirrturns ist, dass "Dunkle Energie" eingeführt werden muss – ein Konzept, das seinen Platz unter den abstrusesten Begriffsbildungen in der Geschichte der Physik behaupten wird.

In Variante (2) wird dagegen die mit der Entfernung zunehmende Rotverschiebung darauf zurückgeführt, dass die Messung der Rotverschiebung mittels materieller Wellenlängen erfolgt, die mit der Zeit abnehmen. Die Größe des Universums bleibt unangetastet.

Was ergibt sich daraus bezüglich der Dunklen Energie? Der Sachverhalt ist eindeutig:

Dunkle Energie ist für die Beschleunigung der Expansion des Universums verantwortlich. Da es keine Expansion gibt, gibt es auch keine Dunkle Energie.

Damit ist das Wesentliche gesagt. Die unerfreuliche *ad hoc* Einführung einer unbekanntenen Art von Energie erübrigt sich.

Die Offenheit der Interpretation der Rotverschiebung in Bezug auf beide Varianten ist so augenfällig, dass man sich fragen muss, woher eigentlich die Sicherheit stammt, mit der von Anfang an angenommen wurde, dass das Universum sich ausdehnt, und warum die Alternative, dass die Maßstäbe (Wellenlängen) sich verkürzen, niemals ernsthaft in Betracht gezogen wurde.

Es fällt auf, dass im historischen Ablauf überhaupt nicht von einer "Wahl" die Rede sein kann; die Entscheidung stand von vornherein fest, weil die Alternative einfach nicht im Horizont des Denkbaren lag. Das bedeutet, dass hier tiefsitzende unbewusste Vorurteile wirken – solche, die schon *vor* jedem Denktakt bestehen und ihm vorausgesetzt sind. Es ist auch sofort klar, *welches* Vorurteil die Sicht auf die Alternativmöglichkeit verstellt: die Vorstellung von substanzieller, unveränderlicher Existenz, die in der Physik in der Form von Elementarteilchen und den damit verbundenen Naturkonstanten Gestalt angenommen hat.

Was ändert sich bei der Umstellung von der Standardvariante (1) auf die alternative Variante (2)?

Der wesentliche Punkt ist natürlich, dass die Dunkle Energie überflüssig wird. Statt sich mit einem kaum behebbaren Defekt namens "Dunkle Energie" herumschlagen zu müssen, ist man nun mit der Frage konfrontiert: "Warum verkürzen sich alle materiellen Wellenlängen?"

Das ist ohne Zweifel ein vorteilhafter Tausch: An die Stelle einer Absurdität tritt eine Frage, auf die eine Antwort durchaus möglich erscheint – allerdings in einem Universum, das sich von dem des Standardmodells deutlich unterscheidet.

Da dieses alternative Universum keine veränderliche Größe hat, gibt es auch keinen "Urknall". Damit entfällt ein weiteres absurdes Element der Standardkosmologie.

Im Standardmodell entfernen sich materielle Objekte mit entfernungsabhängiger Geschwindigkeit voneinander und organisieren sich zugleich durch die Einwirkung der Gravitation zu Mustern: Sonnensysteme, Galaxien, Galaxienhaufen, Superhaufen und noch größere Strukturen. Die Modellierung gelingt bekanntlich nur mit Hilfe etlicher Zusatzannahmen, deren bekannteste die sogenannte "Dunkle Materie" ist.

Dieses Bild wird im Alternativmodell – um es vorwegzunehmen – durch die Vorstellung *metrischer Selbstorganisation* ersetzt (in deren Verlauf sich die materiellen Wellenlängen verkürzen).

Eine weitere wichtige Änderung betrifft die elementaren Entitäten der Wirklichkeit: Bei der alternativen Interpretation rückt das Konzept "Welle" in den Mittelpunkt – Wellenlängen können sich ändern. Die Vorstellung von Objekten ("Teilchen"), deren Größe "fixiert" ist und die daher als *absolutes Maß* geeignet sind, kann hingegen nicht aufrechterhalten werden.

(Wahrscheinlich werde ich auf all diese Themen in meinem Blog irgendwann ausführlich eingehen.)

Ob man bereit ist, eine solch fundamentale Änderung der Sicht der Wirklichkeit zu vollziehen, hängt ganz wesentlich von drei Voraussetzungen ab.

- Vom Zweifel am Standardmodell der Kosmologie, insbesondere an der Existenz Dunkler Energie.
- Vom Begreifen des Sachverhalts, dass das Konzept "Größe" auf das Universum als Ganzes nicht anwendbar ist.
- Von der Bereitschaft, diesen Sachverhalt an den Platz zu stellen, der ihm zukommt: an die *Basis* des Modells des Universums.

Zuletzt will ich noch einmal auf die fundamentale Tatsache eingehen, dass das Universum keine Größe hat, und diese Tatsache so plastisch wie möglich illustrieren.

Denken wir uns zur Veranschaulichung ein zweidimensionales Universum von der Gestalt einer Kugelfläche.

Die Zweidimensionalität hat den Vorteil, dass wir dieses Universum in unseren dreidimensionalen Raum einbetten können; Wir stehen also sozusagen "neben" diesem Universum und betrachten es "von außen". Aus dieser Sicht ist die Vorstellung der Vergrößerung oder Verkleinerung unseres zweidimensionalen Modelluniversums natürlich völlig unproblematisch: *Wir selbst* – als selbständiges, außerhalb des Universums existierendes Objekt – dienen als Bezugspunkt für die Größenänderung.

Nun gleichen wir das Bild an die (Modell-) Wirklichkeit an, das heißt: wir entfernen uns selbst und den Einbettungsraum aus dem Bild. Damit verschwindet aber auch der Bezugspunkt, und die Behauptung der veränderlichen Größe verliert ihre notwendige Voraussetzung.

Wenn wir *jetzt* die Größe der Kugelfläche gedanklich auf das, sagen wir: 100-fache der ursprünglichen Größe anwachsen lassen – mitsamt allen Mustern, die darauf existieren –, dann haben wir tatsächlich *nichts* verändert – alles ist vollständig gleich geblieben.

Dass es die Größe des Universums nicht gibt, ist keine *logische*, sondern eine *ontologische* Tatsache. Als *formaler* Parameter, der zu einem Beschreibungssystem gehört, existiert die Größe des Universums ja nach wie vor: ich kann sie zur Größe jeder *im Universum* befindlichen Struktur in Beziehung setzen.

Als Attribut des *wirklichen* Universums existiert "Größe" jedoch nicht. Sie kann sich daher nicht ändern – es gibt also keine Expansion. Und deshalb gibt es auch keine Dunkle Energie.

Die Beziehung zwischen Wirklichkeit und Formalismus lässt sich wie folgt darstellen:

Die korrekte ontologische Aussage lautet: **Das Universum hat keine Größe.**

Die zugehörige korrekte formale Aussage lautet: **Die Größe des Universums ist unveränderlich.**

Die Antwort auf die Frage: "Was ist Dunkle Energie?" ist somit:

Dunkle Energie ist ein Hirngespinnst – ein Artefakt, das als Konsequenz falscher Modellannahmen auftritt und dem nichts Wirkliches entspricht.

Soviel für diesmal. Spätestens in einer Woche werde ich fortsetzen. Das Thema steht aber noch nicht fest.

Bis dahin verbleibe ich Ihr

Zni Kiprot (Replikant, Serie Nexus 11)

Physik – eine Erfolgsgeschichte und eine Pannenserie.

Im Beitrag über "Dunkle Energie" haben wir Folgendes festgestellt:

Wenn nicht erkannt wird, dass das Konzept "Größe" auf das Universum als Ganzes nicht anwendbar ist, dann ist die Basis falsch, auf der die Theoriebildung stattfindet, und unser Bild vom Kosmos wird verzerrt; Zunächst wird die ontologisch absurde Annahme eines "Urknalls" und schließlich die physikalisch absurde Annahme "Dunkler Energie" erzwungen.

Ähnliches gilt für die theoretische Physik insgesamt. Zwar stellt die formale Entwicklung der physikalischen Theorien eine unvergleichliche Erfolgsgeschichte dar (ausgenommen die letzten Jahrzehnte), die Entwicklung der zu den Theorien gehörigen Ontologie – das, was gemeinhin als "Interpretation" bezeichnet wird – bietet hingegen das klägliche Bild grotesker Unterlassungen, Irrtümer und Pannen, und der Grund dafür ist eben, dass schon am Anfang, wie bei der Kosmologie, aber dann auch bei allen weiteren wichtigen theoretischen Fortschritten immer nur der formale Teil der Erklärung gelungen, der ontologische jedoch unterblieben ist.

Nicht wenige Physiker sind mit der gegenwärtigen Lage der theoretischen Physik unzufrieden. Seit Jahrzehnten gibt es so gut wie keine Prognosen, die experimentell überprüft werden könnten. Weder durch Experiment noch durch Vernunft eingeschränkt, überwuchern exotische Theorien die physikalische Landschaft. Es ist vom "Ende der Wissenschaft" oder von "ironischer Wissenschaft" die Rede (John Horgan, Redakteur bei Scientific American).

Immer wieder äußern Theoretiker – entgegen den für die Medien arrangierten Erfolgsmeldungen und Jubelveranstaltungen – die Hoffnung, dass es vielleicht irgendjemandem in naher Zukunft gelingen könnte, die Physik durch einen kreativen Akt aus ihrer misslichen Lage zu befreien – genauso, wie es beim Übergang von der klassischen zur relativistischen und quantenmechanischen Physik geschehen ist.

Das sind aber nur Lippenbekenntnisse: auf wirklich tiefgreifende Erneuerungen ist niemand vorbereitet, weil sie nichts weniger bedeuten als dass *alle* unrecht hatten und umdenken müssen.

Eine Revolution von genau dieser Art ist jedoch erforderlich, um die theoretische Physik aus der Sackgasse zu führen, in der sie gegenwärtig feststeckt. Man muss tatsächlich die ganze Physikgeschichte neu aufrollen und für jede wichtige Theorie – Newtonsche Gravitation, Elektromagnetismus, spezielle und allgemeine Relativität und Quantentheorie – eine neue Interpretation schaffen. Ich ziehe allerdings den Begriff "Ontologie" vor, denn in allen Fällen geht es um die Aufdeckung dessen, *was wirklich geschieht*; Und nicht nur die Theorien sind umzuinterpretieren, auch die begrifflichen Grundlagen der Physik müssen erneuert werden.

Ist eine so umfassende Änderung überhaupt möglich?

Dass sie *logisch* nicht nur möglich, sondern sogar notwendig ist, werde ich in meinem Blog zeigen: Es wird sich in jedem Fall um den Übergang von einem ontologischen Vakuum zu einem verständlichen Geschehen, oder von einer Verrücktheit zu einer vernünftigen Erklärung, also von Unsinn zu Sinn handeln.

Ob sie jedoch *psychologisch und intellektuell* möglich ist, weiß ich nicht. Einerseits ist Vernunft ein dermaßen knappes Gut, dass das Vorhaben aussichtslos scheint. Andererseits ist zu bedenken, dass Vernunft nur *ein einziges Mal* erforderlich ist – nämlich *am Beginn*, das heißt: für die Erschaffung der neuen Sicht der Wirklichkeit –, dass aber *danach*, also für das Begreifen und Ausarbeiten, auch Intelligenz allein über weite Strecken ausreicht, und davon ist mehr als genug vorhanden. Außerdem halte ich es für denkbar, dass die Physik aufgrund der grotesken Anhäufung von Unsinn während der letzten Jahrzehnte in absehbarer Zeit einen metastabilen Zustand erreichen wird, in dem ein geringer Anstoß genügt, um sie aus der Bahn zu werfen. Aber das gilt natürlich wiederum nur in intellektueller Hinsicht – als gesellschaftlicher und kultureller Macht muss der gegenwärtig vorherrschenden Physik, allein schon wegen der ungeheuren finanziellen und personellen Masse, eine so große Trägheit zugeschrieben werden, dass sie sich fast unaufhaltsam in die Zukunft schieben und alles, was sich ihr in den Weg stellt, niederwalzen wird.

Die soeben skizzierte Entwicklung erfolgt in mehreren Phasen. In der ersten Phase, die ungefähr bis zum Jahr 1900 dauert – also in der sogenannten "klassischen Physik" –, herrscht eine Ontologie vor, deren Elemente unserer Alltagserfahrung entnommen sind: Körper, Kraft, Energie, Arbeit usw. Einige der Modellvorstellungen sind zwar ganz offensichtlich falsch – man denke an Newtons Schwerkraft, die über den leeren Raum hinweg wirken soll –, aber die

Begeisterung über die Berechenbarkeit der Welt ist so groß, dass sie diesen Mangel überdeckt. Das Scheitern der Versuche, Newtons Formel durch eine konkrete Vorstellung von der zugrunde liegenden Wirkungsweise der Gravitation zu begründen, führt jedoch zu einer Abwertung der Ontologie gegenüber der Mathematik.

Die nächste Phase ist die der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantenmechanik. Die Relativitätstheorie markiert den endgültigen Verzicht auf Ontologie und den vollständigen Rückzug ins Formale. (Ich weiß, dass diese Sichtweise unüblich ist. Ich will aber jetzt meinen Standpunkt nur kurz darstellen und erst in später folgenden Beiträgen begründen.) Dieser Verzicht wurde damals wie heute entweder nicht bemerkt oder ignoriert.

Die Quantenmechanik wurde nicht mit demselben Optimismus aufgenommen wie die Relativitätstheorie. In quantenmechanischen Szenarien offenbarte sich ein nicht zu behebender Widerspruch zu unserer apriorischen Weltsicht, der – anders als bei der Relativitätstheorie – von den meisten Physikern nicht als faszinierend, sondern als irritierend oder sogar als unannehmbar empfunden wurde. Was sich in solchen Szenarien *wirklich* ereignet, erschien unbegreiflich. Zwischen Denken und Wirklichkeit tat sich eine tiefe Kluft auf, die nur durch Mathematik überbrückt werden konnte.

Hier beginnt der künftige Verfall. Ich werde zeigen, dass spezielle Relativitätstheorie und Quantentheorie Verzweigungspunkte darstellen: Der Verzicht auf ontologische Erklärungen führt auf den Weg, den die Physik tatsächlich gegangen ist, in dessen Verlauf sie die Wirklichkeit verloren hat und an dessen heute sichtbarem Ende sie schließlich gescheitert ist. Den anderen Weg werden wir hier beschreiten. Er führt zu einer Art von Physik, die ontologisch begründet ist – auf eine Weise, die den Zusammenhang von Denken und Wirklichkeit wiederherstellt und die alle Absurditäten der bisherigen Interpretation von Relativitätstheorie und Quantentheorie verschwinden lässt.

Die dritte Phase ist schon deutlich vom ontologischen Mangel gezeichnet. Die weitere Entwicklung wird ausschließlich durch formale Lösungsmöglichkeiten bestimmt; Gruppentheoretische Methoden (Wolfgang Pauli: "Gruppenpest") übernehmen die Führung. Dennoch bleibt die theoretische Physik noch für einige Jahrzehnte fruchtbar. Mit dem sogenannten Standardmodell der Teilchenphysik endet diese Phase. Es ist selbst schon ein Übergangsprodukt; wie sich herausstellen wird, kann es nicht mehr den Status einer

fundamentalen Theorie beanspruchen, sondern bloß den einer rein formalen Näherung, vergleichbar etwa einem gut ausgearbeiteten Epizykelmodell des Sonnensystems: genauso wie in einem solchen Modell haben auch im Standardmodell einige der Objekte und Parameter des Modells keine Entsprechung in der Realität.

Nach dem Standardmodell, in der letzten Phase, gerät die Physik – durch das ontologische Vakuum vollständig führungslos geworden – nun vollends ins Abseits. Nur noch angetrieben von formalen Phantasien, die zunehmend eher fiebrigen Träumen gleichen als sinnvollen Annäherungen an eine mögliche Wirklichkeit, entfaltet sie eine krankhafte Aktivität, die gerade noch für unterhaltsame Auftritte selbstverliebter Physiker-Darsteller bei Insider-Kongressen oder im Fernsehen geeignet ist, aber ansonsten nirgends mehr hinführt.

Naturwissenschaft kann nur im Wechselspiel von Ontologie und Mathematik gedeihen. Interpretationslose Grundlagenphysik ist – wie die Erfahrung der vergangenen Jahrzehnte lehrt – unvollständig und unfruchtbar. Ohne ontologische Führung gerät die Forschung auf Irrwege.

Mein diesmaliger Beitrag war der kurzen Darstellung meines Standpunktes und Vorhabens gewidmet. Nächsten Montag werde ich mich einem konkreten physikalischen Thema zuwenden.

Bis dahin verbleibe ich Ihr

Zni Kiprot (Replikant, Serie Nexus 11)

Relativität, ontologisch begründet

Hermann Minkowski 1909: "Von Stund' an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren."

Das ist eine *ontologische* Behauptung: Minkowsky stellt fest, was Raum und Zeit aus relativistischer Sicht *sind*. Seine Aussage gibt aber nicht nur seine eigene Meinung wieder, sondern drückt aus, was Physiker seit Einführung der Relativitätstheorie unter Raum und Zeit verstehen.

Als ontologische Aussage ist sie jedoch falsch. Raum und Zeit bleiben nach der Einführung der Relativitätstheorie genauso getrennt wie vorher; die Wirklichkeit ist nach wie vor *Bewegung von Objekten im (dreidimensionalen) Raum*. Die ontologisch vollkommen unterschiedlichen Wesenheiten "Raum" und "Zeit" vereinigen sich nur *formal* zur Raumzeit, als das, was sie wirklich sind, bewahren sie aber ihre Verschiedenheit.

Es gibt viele Möglichkeiten, Minkowskis Behauptung in eine korrekte *formale* Aussage umzuwandeln. Eine davon wäre die folgende: "Wird von einem Inertialsystem auf ein relativ dazu bewegtes Inertialsystem transformiert, dann ist die transformierte Zeitkoordinate nicht nur von der *Zeitkoordinate* des Ausgangssystems, sondern auch von dessen *Raumkoordinaten* abhängig."

Macht das einen Unterschied? Ja – einen entscheidenden! Wenn man Minkowski zustimmt, dann verschmelzen Wirklichkeit und Formalismus. Wenn die Wirklichkeit aber der Formalismus *ist*, dann ist es nicht mehr sinnvoll zu fragen, warum sie mit ihm übereinstimmt. Dafür ist ein Begriff von der Wirklichkeit notwendig, der den Formalismus begründen und ihm stets wieder gegenübergestellt werden kann.

Geht man dagegen davon aus, dass die Wirklichkeit Bewegung von Objekten im Raum ist, dann kann gefragt werden, warum in dieser Wirklichkeit Raum- und Zeitmessungen zu den Resultaten führen, die die Relativitätstheorie voraussagt – und genau dieser Frage werden wir uns jetzt zuwenden.

In populären Darstellungen wird die Relativität der Zeit oft durch Lichtuhren veranschaulicht, in denen die Zeit durch Licht gemessen wird, das zwischen zwei fixierten Spiegeln auf- und abwärts läuft, wobei die Zeiteinheit der Zeitspanne zwischen zwei aufeinander folgenden Umkehrpunkten entspricht. Falls wir unser System als ruhend annehmen, dann erkennen wir, dass das Licht in einer solchen Lichtuhr in einem relativ zu uns mit der Geschwindigkeit v bewegten System einen längeren Weg zurücklegt, sodass dort die Zeit um den Faktor $k = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ langsamer vergeht.

Diese Sicht entpuppt sich aber sogleich als bloßer Schein einer Erklärung. Stellt man sich auf den Standpunkt des Beobachters im anderen System, dann erkennt man, dass es sich, von ihm aus gesehen, *genauso* verhalten muss: auch er kann behaupten, dass die Lichtwege im anderen System länger sind und dass deshalb die Zeit *dort* langsamer vergeht. So entsteht also unweigerlich die Frage, in welchem System die Zeit nun *wirklich* verlangsamt ist.

Im Rahmen der speziellen Relativitätstheorie kann es darauf keine Antwort geben – das ist ja gerade das Prinzip der Relativität. Das Verhältnis des Zeitvergehens der beiden Systeme ist vom Bewegungszustand des jeweiligen Beobachters abhängig. Wir könnten beliebig viele weitere Bezugssysteme mit verschiedenen Geschwindigkeiten einführen. Von jedem dieser Bezugssysteme aus würden wir ein anderes Ergebnis erhalten. Wenn sich allerdings die beiden Systeme noch einmal begegnen – was bedeutet, dass mindestens eines von beiden *beschleunigt* haben muss –, dann wird das Verhältnis der Zeiten, die in beiden Systemen vergangen sind, von *allen* Bezugssystemen aus dasselbe sein.

Was als Erklärung begann, hat sich also in eine Demonstration der Relativität verwandelt, die zu beweisen scheint, dass die Zeit sich auf eine Weise verhält, die wir zwar berechnen, aber nicht begreifen können.

Zunächst werden wir diese Behauptung unwidersprochen hinnehmen. Nachdem wir die Relativität ontologisch erklärt haben, werden wir aber zum Szenario mit den Lichtuhren zurückkehren und auch hier das unterschiedliche Zeitvergehen ontologisch – und damit meine ich: *anschaulich* – begründen.

Wir beginnen mit einem Gedankenexperiment:

Nehmen wir an, wir verwenden für den Vergleich der Zeiten Uhren, die nach demselben Prinzip funktionieren wie die Lichtuhren, in denen aber die Zeiteinheiten nicht durch Licht, sondern durch irgendeinen anderen physikalischen Prozess festgelegt werden, der sich geradlinig ausbreitet und reflektiert werden kann.

Wir könnten z.B. Schallwellen (in Luft) verwenden. Die Transformation der Zeit von einem System auf das andere müsste dann mit dem Faktor $k' = 1/\sqrt{1 - v^2/d^2}$ durchgeführt werden, wobei d die Geschwindigkeit des Schalls wäre. Würden wir die Zeit durch solche Schalluhren bestimmen (formal ausgedrückt: würden wir die Lorentz-Transformation nicht mit c , sondern mit d durchführen), hätte das zur Folge, dass die *Schallgeschwindigkeit* für alle gleichförmig bewegten Beobachter gleich wäre.

Was sagt Einstein dazu? Um das herauszufinden, lesen wir nach, wie er die Relativität der Gleichzeitigkeit erklärt.

Einstein schreibt: "An zwei weit voneinander entfernten Stellen A und B eines Bahndammes hat der Blitz ins Geleise eingeschlagen." Weiter unten setzt er fort: "Die Verbindungsstrecke AB werde [...] ausgemessen und in die Mitte M der Strecke ein Beobachter gestellt, der mit einer Einrichtung versehen ist, [...] die ihm eine gleichzeitige optische Fixierung beider Orte A und B erlaubt. Nimmt dieser die beiden Blitzschläge gleichzeitig wahr, so sind sie gleichzeitig."

(A. Einstein, Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, Friedrich Vieweg + Sohn, Braunschweig 1973, WTB Band 59, S 21f.)

Es erhebt sich natürlich sofort die Frage, ob man nicht auch die Geschwindigkeit des Beobachters (infolge der Bewegung der Erde) berücksichtigen müsste, denn von dieser würden doch anscheinend auch die Geschwindigkeiten abhängen, die die beiden Lichtstrahlen von A und B in Bezug auf den Beobachter haben. Deren Geschwindigkeitsunterschiede dürften bei der Bestimmung der Zeitpunkte der Blitzeinschläge in A und B nicht vernachlässigt werden. Müsste man also, fragt Einstein, nicht voraussetzen, "dass das Licht [...] sich mit der gleichen Geschwindigkeit auf der Strecke AM wie auf der Strecke BM fortpflanze"?

Einsteins Antwort ist: "Dass das Licht zum Durchlaufen des Weges AM und zum Durchlaufen der Strecke BM dieselbe Zeit brauche, ist [...] keine Voraussetzung oder Hypothese über die

physikalische Natur des Lichts, sondern eine Festsetzung, die ich nach freiem Ermessen treffen kann, um zu einer Definition der Gleichzeitigkeit zu gelangen."

Ist das tatsächlich so? Keineswegs! Diese "Festsetzung" hat nämlich Folgen, und es fragt sich, ob die Natur bereit ist, sich daran zu halten. Wenn das, was wir auf diese Weise als "Zeit" festlegen, *die wirkliche Zeit* sein soll, dann müssen sich *alle Prozesse* danach richten.

Hätten wir also Schall statt Licht gewählt, dann müssten die Beobachter in einem mit der Geschwindigkeit v bewegten System um den Faktor k' langsamer altern. Das ist aber sicher nicht der Fall. Wie wir ja wissen, ist der richtige Faktor der Zeitdehnung k , und nur einer der beiden Faktoren kann korrekt sein.

Also kann ich die Zeit keineswegs nach meinem Ermessen festlegen. Ich könnte die Lichtgeschwindigkeit nicht für alle Beobachter gleich *machen* – ebenso wenig wie die Schallgeschwindigkeit – wenn sie nicht gleich *wäre*.

Damit sind wir nun bei der *eigentlichen* Frage angelangt:

Warum fügt sich die Natur den raumzeitlichen Verhältnissen, die durch Lichtsignale festgelegt werden? Und warum widersetzt sie sich, wenn für diese Festlegung Signale verwendet werden, die sich mit einer anderen Geschwindigkeit fortpflanzen als das Licht?

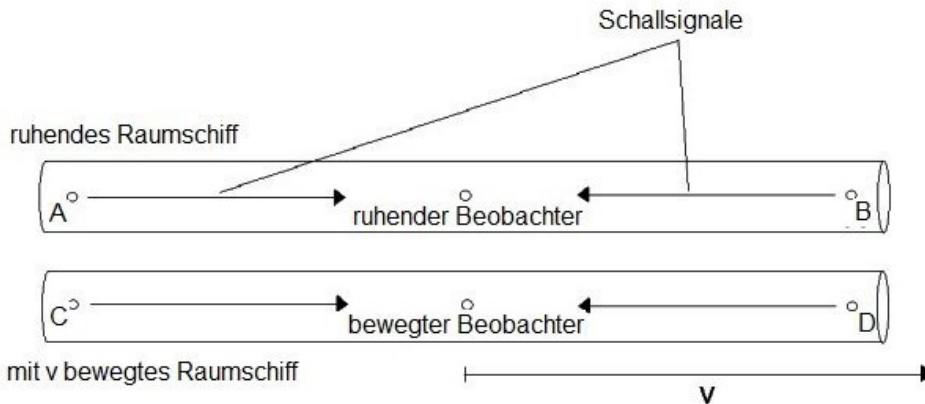
Begeben wir uns nochmals in Einsteins Szenario zur Relativität der Gleichzeitigkeit. Für den auf dem Bahndamm stehenden Beobachter sind die beiden Blitzschläge gleichzeitig, sagen wir: sie finden genau um 12 Uhr statt. Für einen Beobachter, der sich um 12 Uhr an derselben Stelle auf dem Bahndamm befindet und sich auf B zu bewegt, sind sie nicht gleichzeitig – sagen wir, er nimmt den Blitz in B um eine Mikrosekunde früher wahr als der ruhende Beobachter und den in A um eine Mikrosekunde später.

Da wir aber die Zeit durch Licht *bestimmen*, bedeutet das, dass für den bewegten Beobachter in A und B eine andere Zeit *ist* als für den ruhenden: Im Augenblick des Blitzeinschlags ist es in A eine Mikrosekunde *nach* 12, in B ist es eine Mikrosekunde *vor* 12.

Auch hier gilt wieder: wenn diese Zeitbestimmung korrekt sein soll, dann muss sich die Natur daran halten. Das heißt:

Jedes zum System des bewegten Beobachters gehörende Paar gleichartiger Signale, die in A und B zum selben Zeitpunkt erzeugt werden wie die Lichtsignale, trifft bei ihm mit einer Zeitdifferenz von 2 Mikrosekunden ein.

Da es in Einsteins Szenario kein "System des bewegten Beobachters" gibt, müssen wir den Schauplatz unseres Gedankenexperiments wechseln. Nehmen wir beispielsweise an, die beiden Beobachter befinden sich in identischen Raumschiffen. Das eine Raumschiff ruht, das andere bewegt sich in eine Richtung, die wir x nennen. Wir betrachten nun 2 Punkte A und B des ruhenden Raumschiffs, die vom darin befindlichen Beobachter gleich weit entfernt sind, sowie 2 Punkte C und D des bewegten Raumschiffs, die – vom ruhenden Beobachter aus gesehen – dieselben x -Koordinaten haben wie A und B.



(Um die relativistische Längenkontraktion brauchen wir uns nicht zu kümmern – wir betrachten ja nicht die relativistisch transformierten Punkte A' und B' , sondern 2 Punkte C und D, die in ihren x -Koordinaten in Bezug auf den ruhenden Beobachter in dem Augenblick mit A und B übereinstimmen, in dem sich – wie in der Skizze – die beiden Beobachter gegenüberstehen, und vergleichen die Zeitkoordinaten dieser Punkte in Bezug auf beide Beobachter.)

Wenn in den Punkten A und B zur gleichen Zeit (in Bezug auf den ruhenden Beobachter) Lichtsignale erzeugt werden, dann erreichen sie ihn gleichzeitig. Lichtsignale, die zur selben Zeit in den Punkten C und D erzeugt werden, erreichen den mit v bewegten Beobachter wieder mit einem zeitlichen Abstand von 2 Mikrosekunden.

Nehmen wir nun an, dass in beiden Raumschiffen *zugleich* mit den Lichtsignalen und an denselben Orten auch andere Signale erzeugt werden, sagen wir: Schallsignale, die sich im Metall der Raumschiffe ausbreiten, und Schallsignale, die sich in der darin enthaltenen Luft fortpflanzen.

Beim Beobachter im ruhenden Raumschiff kommen alle diese Signale paarweise gleichzeitig an, beim bewegten Beobachter jedoch stets zeitversetzt: zuerst die Lichtsignale, dann, der Reihe nach, die beiden anderen Signalpaare, aber immer in demselben zeitlichen Abstand von 2 Mikrosekunden zwischen dem Signal von vorn und dem von hinten.

Warum ist das so? Stellen wir uns auf den Standpunkt des ruhenden Beobachters. Dann ist es für uns ganz selbstverständlich, dass die Lichtsignale, die – von uns aus gesehen gleichzeitig – in C und D erzeugt werden, beim bewegten Beobachter zeitversetzt ankommen müssen, weil dieser sich ja auf das eine Signal zu- und vom anderen Signal wegbewegt. Das gilt aber nicht für die Schallsignale: Sie werden ebenfalls gleichzeitig erzeugt, und deshalb sollten *diese* Signale, da sie ja vom bewegten Raumschiff *mitgeführt* werden, den bewegten Beobachter auch gleichzeitig erreichen. Für uns erscheint es so, als würde die Bewegung *gegen den Raum* – die es aus relativistischer Sicht ja gar nicht gibt! – das Schallsignal von vorne beschleunigen und das von hinten verlangsamen.

Natürlich wissen wir, dass diese Betrachtungsweise falsch ist. Richtig ist, dass die Geschwindigkeiten beider Signale durch das relativistische Geschwindigkeitsadditionstheorem berechnet werden müssen. Wir wollen daran auch keineswegs zweifeln, wir fragen uns bloß, *warum* das der Fall ist.

Nach diesen einleitenden Betrachtungen schließe ich für diesmal. Nächsten Montag werden Sie erfahren, warum die Wirklichkeit relativistisch ist.

Zni Kiprot (Replikant, Serie Nexus 11)

Relativität 2

Verweilen wir noch kurz im Szenario mit den beiden Raumschiffen.

Für den ruhenden Beobachter ist es in B und in D genau 12 Uhr, wenn dort die Lichtsignale ausgesendet werden. Beim bewegten Beobachter trifft das von vorn kommende Signal um eine Mikrosekunde früher ein als beim ruhenden. Er schließt daraus, dass es in D zum Zeitpunkt des Aussendens des Lichtsignals eine Mikrosekunde *vor* 12 Uhr war.

Dieser Schluss von einer bloßen Mess-Tatsache auf die für ihn in D *wirklich geltende Zeit* ist aber nur dann zulässig, wenn *alle in seinem Raumschiff überhaupt möglichen physikalischen Prozesse*, die zur selben Zeit in D beginnen wie das Lichtsignal, um diese eine Mikrosekunde früher bei ihm eintreffen als die identischen Prozesse – die zur selben Zeit in B beginnen wie das Lichtsignal – im ruhenden Raumschiff den dortigen Beobachter erreichen.

Nur dann kann (und muss) behauptet werden, dass das *Aussenden* des Lichtsignals für den bewegten Beobachter eine Mikrosekunde früher stattgefunden hat als für den ruhenden, sodass es für ihn in D eine Mikrosekunde *vor* 12 Uhr war, wenn es dort für den ruhenden Beobachter genau 12 Uhr ist.

Dieser Gedanke ist für die Relativität von fundamentaler Bedeutung. Es ist wichtig, erst dann weiterzulesen, wenn er vollständig klar geworden ist.

Da der Punkt B (bzw. D) beliebig gewählt war, kann dieser Schluss auf die ganze x-Achse verallgemeinert werden. In einem Punkt E etwa, der im doppelten Abstand liegt, wäre die Zeitverschiebung 2 Mikrosekunden usw. (Wer mit Minkowski-Diagrammen vertraut ist, erkennt hier das "Kippen" der x-Achse wieder.)

Das bedeutet: Punkte, die *vor* dem bewegten Beobachter liegen, sind *für ihn* – im Vergleich mit dem ruhenden Beobachter – in die Vergangenheit verschoben, und Punkte *hinter* ihm in die Zukunft. Ereignisse, die an Orten auf der x-Achse stattfinden und für den ruhenden Beobachter *gegenwärtige* Ereignisse sind, sind für den bewegten Beobachter *vergangene* Ereignisse, falls sie *vor* ihm, und *zukünftige* Ereignisse, falls sie *hinter* ihm stattfinden.

Die bisher durchgeführten Überlegungen waren sozusagen "ontologische Aufwärmübungen", dafür gedacht, den Zugang zu der bisher nicht erforschten Verbindung zwischen Wirklichkeit und Formalismus zu erkunden. Doch jetzt ist es Zeit für den entscheidenden Gedankengang. Er wird uns ganz nah an den Grund der Wirklichkeit heranführen, in einen Bereich, der ontologisch *vor* – oder *unter* – jeder möglichen Physik liegt. Um ihn nachzuvollziehen, ist es also erforderlich, für einen Moment nicht nur alle Alltagsvorstellungen, sondern auch alles physikalische Wissen zurückzustellen.

Bereit? Dann beginnen wir.

Was wir gerade eben als zeitlichen Zusammenhang zwischen den mit verschiedenen Geschwindigkeiten bewegten Beobachtern und dem Ausgangspunkt der Signale analysiert haben, die ihnen zur Bestimmung der Zeit in diesem Punkt dienen, ist nur ein Beispiel für ein universelles Prinzip. Folgendermaßen:

Was ist ein Universum? Ein *Raum*, der *elementare Objekte* enthält, die durch *kausale Prozesse* vernetzt sind. Für jedes Paar von Objekten gilt nun dieser zeitliche Zusammenhang, das heißt: die für diese Objekte geltenden Zeiten werden durch physikalische Prozesse vermittelt. Wenn mehrere Objekte aufgrund der kausalen Verbindungen zwischen ihnen ein System bilden, dann hat dieses physikalische System auch ein *eigenes Zeitsystem* – eben so, wie es bei jedem der beiden Raumschiffe der Fall war.

Wie schon beim Szenario mit den Raumschiffen muss auch an das gesamte Netz all dieser zwischen Paaren von Objekten bestehenden zeitlichen Zusammenhänge die Forderung der *Eindeutigkeit* gestellt werden, womit gemeint ist, dass sich *alle Prozesse* dem auf diese Weise festgelegten Zeitsystem – das sich aus all den lokalen Subsystemen zusammensetzt – fügen müssen.

Denken wir uns nun ein Universum, in dem nur *eine einzige Geschwindigkeit* existiert, mit der sich die kausalen Prozesse ausbreiten, durch die die Objekte verbunden sind. In diesem Universum ist das Zeitsystem durch diese Geschwindigkeit festgelegt, und die Forderung nach Eindeutigkeit ist trivialerweise erfüllt.

Jetzt nehmen wir an, es gebe noch *eine zweite, von der ersten unabhängige Geschwindigkeit* – einige Prozesse breiten sich also mit dieser zweiten Geschwindigkeit aus.

Das bedeutet aber nichts anderes als: *Es gibt ein zweites Zeitsystem*, das durch diese zweite Geschwindigkeit vermittelt ist. Die Forderung nach Eindeutigkeit ist somit verletzt. Daraus folgt, dass ein solches Universum ein *unmögliches Universum* ist – in ihm gäbe es keine kohärenten physikalischen Systeme.

Wir sind also zu der Erkenntnis gelangt:

In jedem möglichen Universum kann es nur eine einzige Geschwindigkeit geben, mit der sich Prozesse ausbreiten.

In unserem – dem wirklichen – Universum ist die Zeit durch Licht definiert. Es kann aber nur eine einzige Geschwindigkeit geben. Also gilt:

Es gibt nur Lichtgeschwindigkeit. Die Wirklichkeit ist relativistisch, weil sie aus elementaren Objekten besteht, die durch kausale Prozesse vernetzt sind, die sich mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen.

Das scheint zunächst verblüffend, wenn nicht sogar absurd. Ganz offensichtlich gibt es auch andere Geschwindigkeiten, z.B. die meiner Finger beim Tippen. Wie sollte diese Aussage also wahr sein können?

Die Auflösung dieses scheinbaren Paradoxons ist aber ganz einfach: Licht gehorcht einer Wellengleichung. Wellen können sich überlagern. Das bekannteste Beispiel für eine solche Superposition ist eine sogenannte "stehende Welle". Sie setzt sich aus zwei gegenlaufenden Wellen mit gleicher Frequenz zusammen. Durch die Überlagerung der beiden Wellen verschwindet die Bewegung in der Ausbreitungsrichtung, sodass die stehende Welle ruht.

Wir haben also, ohne von unserer Forderung abzugehen, dass es nur Lichtgeschwindigkeit gibt, durch die Überlagerung zweier Wellen eine Geschwindigkeit mit dem Wert Null erzeugt. Auf dieselbe Weise lässt sich durch Änderung der Frequenzen der Wellen jede beliebige Geschwindigkeit herstellen, die kleiner ist als die des Lichts.

Das Überraschende an diesem Bild ist jedoch, dass hier eine grundlegende Schicht der Wirklichkeit postuliert wird, in der alles, was existiert, durch Lichtgeschwindigkeit miteinander verbunden ist, und zwar schon *bevor* überhaupt kausale Wirkungen der Art, wie wir sie beobachten und physikalisch beschreiben, von einem Objekt auf ein anderes übermittelt werden. Wenn diese Übermittlung mit einer anderen Geschwindigkeit erfolgen soll als mit Lichtgeschwindigkeit – also, wie soeben gezeigt, durch Superposition von Wellen mit Lichtgeschwindigkeit – dann müssen die Wellen dieser Superposition schon *vorher* da sein, und die betrachtete kausale Wirkung muss daher als *Veränderung* der bestehenden Verbindung zwischen den beiden Objekten aufgefasst werden, die von einem der beiden Objekte ausgeht.

Die von uns erfahrbare und von der Physik (bisher) beschriebene Wirklichkeit ruht also auf einer fundamentalen Schicht aus Superpositionen von Wellen mit Lichtgeschwindigkeit. Was wir erfahren und beobachten, ist mit Veränderungen in dieser Schicht verknüpft. Diese Veränderungen sind die kausalen Prozesse der Wirklichkeit. Sie können sich mit beliebigen Geschwindigkeiten ausbreiten, die kleiner sind als die des Lichts.

Vorläufig muss das Bild der Wirklichkeit, das wir hier abgeleitet haben, in dieser Abstraktheit hingenommen werden. Die Distanz zu den üblichen Vorstellungen können wir erst durch später folgende Überlegungen überbrücken.

Immerhin lässt sich feststellen, dass die Beschreibung von Materiewellen, wie wir sie seit ihrer Einführung durch Louis de Broglie kennen, mit diesem Bild übereinstimmt: Materiewellen sind Phasenwellen von Wellen mit Lichtgeschwindigkeit. Als Phasenwellen haben sie Überlichtgeschwindigkeit, eine Gruppe aus solchen Wellen mit verschiedenen Wellenlängen bewegt sich jedoch langsamer als Licht und kann als kausaler Prozess aufgefasst werden. (Es gilt: Phasengeschwindigkeit mal Gruppengeschwindigkeit ergibt Lichtgeschwindigkeit.)

Unser Bild der Wirklichkeit ist allerdings in einer wesentlichen Hinsicht unvollständig. Darum werden wir uns im nächsten Beitrag kümmern, der wie immer am folgenden Montag erscheinen wird.

Zni Kiprot (Replikant, Serie Nexus 11)

Relativität 3

Wir haben die Welt in *elementare Objekte* und *Prozesse* eingeteilt. Hier kommen nun Argumente ins Spiel, die mit einem alten, ungelösten Problem der Physik zusammenhängen, der Frage nämlich: *Wie kann ein Objekt Ausgangspunkt von kausalen Prozessen sein?* Oder konkreter gefragt: *Was ist Masse? Was ist elektrische Ladung? Wie kann Masse Raum und Zeit krümmen?*

Für unsere Zwecke ist es aber vorläufig ausreichend, zu klären, was *nicht* der Fall ist. Folgendermaßen:

In der Physik ist "elementar" gleichbedeutend mit "strukturlos". Ein elementares Objekt ist also entweder ein *Punkt* oder ein *ausgedehnter strukturloser Bereich*.

(Was ist mit "Strings" oder "Branen"? Ihre Einführung ist ausschließlich mathematisch motiviert, und bisher haben weder sie selbst noch irgendwelche ihrer Folgen den Sprung aus der Mathematik in die Wirklichkeit geschafft. Mit hoher Wahrscheinlichkeit existieren sie also nur in mathematischen Systemen, aber nicht in der Wirklichkeit.)

Ist es möglich, dass elementare Objekte Punkte sind? Nein. Ein Punkt hat, ontologisch betrachtet, keine Existenz. Natürlich können Punkten Werte von Variablen zugeordnet werden, wenn physikalische Größen als Funktion des Ortes dargestellt werden. Das ist aber nicht gleichbedeutend mit der Anerkennung ihrer Existenz. (Wer der ontologischen Selbstverständlichkeit der Nichtexistenz von Punkten misstraut, möge sich an die andauernden, anscheinend unlösbaren Probleme mit der unendlichen Selbstenergie von Elektronen erinnern, wenn sie als Punkte angenommen werden.)

Elementare Objekte können also keine Punkte sein. Wie steht es mit "ausgedehnten strukturlosen Bereichen"? *Strukturlos* heißt ein Bereich, in dem nichts ist, was sich bewegen könnte. Ein strukturloser Bereich ist also ein Bereich, in dem sich nichts ändert, mit anderen Worten: ein Bereich *ohne Zeit*. Eine grundsätzliche ontologische Tatsache lautet jedoch:

Was selbst ohne Zeit ist, kann nicht Ausgangspunkt einer raumzeitlichen Kausalkette sein. Was selbst stets unverändert bleibt, kann nicht Ursache von Veränderung sein.

Das heißt:

Es gibt keine "elementaren Objekte" im üblichen Sinn. Es gibt keine Grenze zwischen "Objekt" und "Prozess". Die Kausalketten, aus denen die Wirklichkeit besteht, müssen überallhin reichen.

Was bedeutet das für unsere Argumentation zur Relativität? Es bedeutet, dass die Getrenntheit von Objekten und Prozessen nicht aufrechterhalten werden kann. Die Objekte können also nicht einfach in das relativistische Kausalnetz platziert werden, sie müssen vielmehr auch selbst Teil dieses Netzes sein.

Im Grunde ist das selbstverständlich. Die Objekte haben ja Attribute, die sich je nach Bezugssystem ändern. Da diese Attribute aber mit den Objekten untrennbar verbunden sind, folgt daraus, dass auch die Objekte selbst in das relativistische Netz eingebunden werden müssen.

Es war aber notwendig, die ontologische Argumentation durchzuführen, weil nur dadurch klar wird, dass der Teilchenbegriff in der gewohnten Form aufgegeben werden muss. Die Wirklichkeit zerfällt nicht in Objekte und Prozesse.

"Objekte" sind ebenfalls "Prozesse".

Unsere Beschreibung der Wirklichkeit hat sich also vereinfacht. In ihrer nun endgültigen Form lautet sie:

Es gibt nur Lichtgeschwindigkeit. Alles, was existiert und was sich ereignet – jedes Objekt, jeder Prozess – ist ein Interferenzphänomen, ein Muster aus Superpositionen von Wellen mit Lichtgeschwindigkeit.

Die bisherigen Voraussetzungen reichen nicht für eine Konkretisierung dieser Aussage aus. Der Vollständigkeit halber werde ich aber skizzieren, wohin sich diese Sicht der Wirklichkeit entwickelt.

Dazu benötigen wir zunächst den in Teil 2 abgeleiteten Satz:

Die von uns erfahrbare und von der Physik beschriebene Wirklichkeit ruht auf einer fundamentalen Schicht aus Superpositionen von Wellen mit Lichtgeschwindigkeit. Was wir erfahren und beobachten, ist mit Veränderungen in dieser Schicht verknüpft. Diese Veränderungen sind die kausalen Prozesse der Wirklichkeit. Sie können sich mit beliebigen Geschwindigkeiten ausbreiten, die kleiner sind als die des Lichts.

Später wird sich herausstellen, dass die Wellen dieser fundamentalen Schicht *Planck-Wellen* sind, das heißt Wellen, deren Wellenlänge gleich der Planck-Länge ist. Materielle Objekte lassen sich dann als (annähernd) stationäre Muster aus *stehenden Phasenwellen* dieser Planck-Wellen verstehen. Prozesse, die sich im Raum ausbreiten, entsprechen hingegen *laufenden Phasenwellen*, die sich – wie schon in Teil zwei festgestellt – so im Raum fortbewegen, wie wir es von Materiewellen kennen.

Die ontologische Erklärung der speziellen Relativität ist damit abgeschlossen. Wir haben die Relativität jedoch nicht nur erklärt, sondern auch als *notwendige Eigenschaft* jedes möglichen Universums erkannt und aus dieser Tatsache die grundlegende Struktur der Wirklichkeit abgeleitet.

Eine Frage ist aber offen geblieben – die Frage: "Gibt es ein absolutes System?"

Die Antwort ist *ja*. Es gibt dafür einige zwingende Argumente, aber nur ein einziges, das innerhalb des Rahmens der speziellen Relativität bleibt. Es lautet wie folgt:

Betrachten wir zwei Raumschiffe, die sich in großer Entfernung voneinander befinden. Die Frage ist: *Wodurch* wird bewirkt, dass das Vergehen der Zeit in beiden Raumschiffen genau *so* erfolgt, dass bei einer späteren Begegnung der Raumschiffe der Uhrenvergleich der Voraussage der Relativitätstheorie entspricht? *Wodurch* wird die Beziehung zwischen den beiden Systemen vermittelt?

Die Relativitätstheorie selbst bietet hier nichts an. Wenn wir auf das absolute System verzichten, dann gibt es nur Koordinatensysteme. Ein Koordinatensystem ist aber nichts Seiendes – es kann also das Vergehen der Zeit nicht vermitteln. Es muss aber etwas existieren, was diese Vermittlung leistet, und das bedeutet:

Es gibt ein absolutes System. Aus ontologischer Sicht ist das absolute System eine notwendige Voraussetzung der relativistischen Raum-Zeit-Struktur.

Die Behauptung der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme ist also nur in formaler Hinsicht korrekt. Als ontologische Behauptung ist sie falsch. Der formalen Symmetrie steht eine ontologische Asymmetrie gegenüber.

Leider kann auch die Frage, was dieses absolute System eigentlich *ist*, erst später geklärt werden.

Damit sind wir ans Ende unserer Beschreibung der Wirklichkeit gelangt, soweit sie aus Überlegungen zur Relativität erschlossen werden kann. Wie eingangs versprochen, werden wir noch kurz zum Szenario mit den Lichtuhren zurückkehren, um es ontologisch zu begründen.

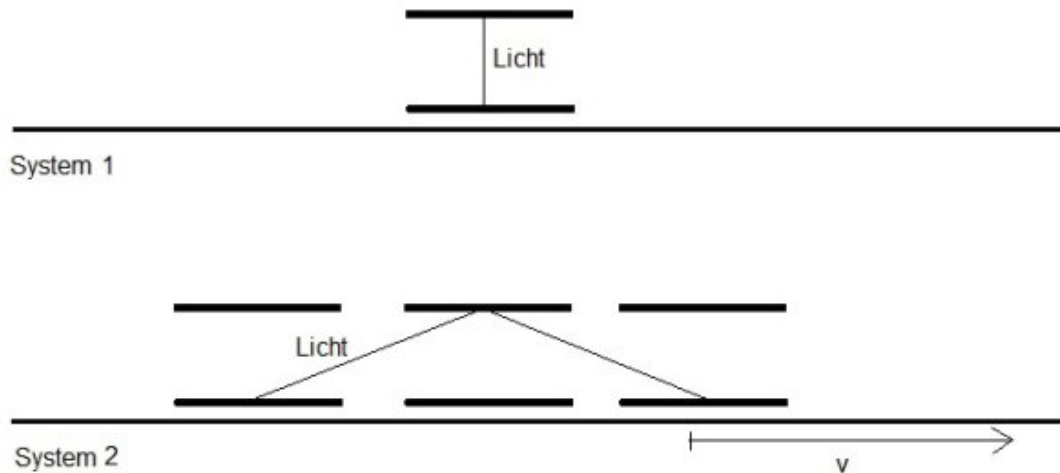
Das wird jedoch erst am nächsten Montag geschehen.

Zni Kiprot (Replikant, Serie Nexus 11)

Relativität 4

Begeben wir uns also noch einmal in das Szenario mit den Lichtuhren, von dem am Beginn von Teil 1 die Rede war.

Wir betrachten zwei Inertialsysteme, die sich mit der Relativgeschwindigkeit v aneinander vorbei bewegen. In jedem System befindet sich eine Lichtuhr, in der sich Licht zwischen zwei fixierten Spiegeln auf und ab bewegt. Die Zeitspanne zwischen zwei Reflexionspunkten definiert die Zeiteinheit. Die Skizze zeigt die Uhren zu 3 kurz aufeinander folgenden Zeitpunkten sowie die dazwischen liegenden Lichtwege:



In beiden Systemen befindet sich ein Beobachter. Für jeden der beiden Beobachter scheint das Licht in der eigenen Uhr den *kürzeren* Weg zurückzulegen, was zu dem Schluss führt, dass die auf diese Weise gemessene Zeit im jeweils anderen System *langsamer* vergeht.

Formal gibt es kein Problem. Es herrscht völlige Symmetrie. Ontologisch betrachtet, ist diese Symmetrie jedoch absurd, und zwar aus folgendem Grund: Licht bewegt sich *im Raum*, und daher muss es im Raum einen *wirklichen Weg* des Lichts geben. Dieser "wahre Weg" wird dann, wie das bei jedem physikalischen Prozess der Fall ist, von verschiedenen bewegten Beobachtern unterschiedlich wahrgenommen.

Nehmen wir beispielsweise an, beide Beobachter befinden sich auf der Erdoberfläche und in ihren (seitlich offenen) Uhren bewegt sich nicht Licht, sondern Schall auf und ab; Dann gibt es ein System – eben das Ruhesystem –, in dem der Schall tatsächlich den kürzesten Weg in der Uhr zurücklegt. Der bewegte Beobachter würde zwar den Schall in seiner Uhr ebenfalls auf dem *für ihn* am kürzesten erscheinenden Weg auf und ab bewegt sehen, aber da es beim Schall einen wirklichen Weg gibt, wäre in seinem System die Zeit, die zwischen zwei Reflexionen verstreicht, dennoch länger als die im Ruhesystem.

Behauptet man nun, wie es in der Relativitätstheorie geschieht, dass die Verhältnisse für Licht symmetrisch sind, dann nimmt man dem Licht seinen wirklichen Weg im Raum, und das ist eine ontologische Absurdität. Es muss auch für Licht einen wirklichen Weg geben.

Wir wollen aber durch den Hinweis auf diese Absurdität die Relativitätstheorie nicht etwa widerlegen – im Gegenteil: wir wollen zeigen, dass sich alles, was absurd und unverständlich erscheint, durch eine konsequente ontologische Analyse vollständig aufklärt.

Wir ergänzen zunächst das Szenario: Wir stellen in beiden Systemen nicht nur *eine* Lichtuhr auf, sondern eine ganze Reihe solcher Uhren, parallel zur Bewegungsrichtung. Der Zeitvergleich kann dann von beiden Beobachtern auf folgende Weise durchgeführt werden: die Anzeige der Uhr, die sich direkt beim anderen Beobachter befindet, wird jeweils mit der Anzeige derjenigen Uhr des eigenen Systems verglichen, an der sie sich gerade vorbei bewegt. Nur so ist ja ein (fast) direkter Vergleich des Zeitvergehens in beiden Systemen überhaupt möglich.

Als das eine Bezugssystem wählen wir das *absolute Ruhesystem*. Zuerst betrachten wir die Lage vom Standpunkt des Beobachters aus, der sich in diesem System aufhält. Hier ist im Vergleich zur üblichen Sichtweise nichts verändert: der auf die soeben beschriebene Weise durchgeführte Zeitvergleich zeigt, dass die Uhr des bewegten Beobachters um den Faktor $k = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ langsamer geht.

Jetzt stellen wir uns auf den Standpunkt des bewegten Beobachters. Zunächst fragen wir uns: warum erscheint seine Lichtuhr ihm selbst nicht verlangsamt – etwa im Vergleich mit den Bewegungen, die er selbst ausführt, oder im Vergleich mit mechanischen Uhren?

Die Antwort – sie ist die *eigentliche*, d.h. die *ontologische* (und als solche zugleich die einzig mögliche) *Begründung* der Relativität – lautet wie folgt:

Weil er selbst – so wie *alles andere* – (letztlich) nichts anderes ist als ein Muster aus Phasenwellen von (Planck-)Wellen, deren Geschwindigkeit gleich der des Lichts ist, sodass *alle* Objekte und Prozesse des bewegten Systems derselben Verlangsamung unterworfen sind.

(Würden wir Schalluhren verwenden, wäre das anders: die Schalluhr würde auch dem bewegten Beobachter selbst verlangsamt erscheinen.)

Jetzt zur Frage, wie die Zeit des Ruhesystems vergeht, wenn sie vom bewegten Beobachter aus beurteilt wird. Auch er überprüft das Zeitvergehen, indem er die Anzeige der Uhr, die sich direkt beim ruhenden Beobachter befindet, jeweils mit der Anzeige derjenigen Uhr seines eigenen Systems vergleicht, an der die Uhr des ruhenden Beobachters gerade vorbeikommt.

Nun benötigen wir den Satz, den wir im Szenario mit den Raumschiffen in Teil 1 abgeleitet haben (er steht auch am Anfang von Teil 2):

Ereignisse, die *hinter* dem bewegten Beobachter stattfinden, sind für ihn – im Vergleich mit dem ruhenden Beobachter – in die *Zukunft* verschoben. (Auch Uhrenanzeigen sind Ereignisse.)

Das folgt aus jenem Satz, den wir als notwendige und hinreichende Bedingung der Relativität bestimmt haben (siehe dazu die Skizze mit den Raumschiffen und die zugehörigen Erläuterungen in Teil 1 sowie den Anfang von Teil 2):

Sei T ein beliebiger physikalischer Prozess, der im *bewegten* System stattfindet und in einem beliebigen, bezüglich der Bewegungsrichtung des bewegten Beobachters *hinter* ihm liegenden Punkt genau in dem Augenblick beginnt (gleichgültig, bezogen auf welches System), in dem sich die beiden Beobachter gegenüberstehen. Sei S ein mit T identischer, jedoch im *ruhenden* System stattfindender physikalischer Prozess, der in einem hinter dem ruhenden Beobachter liegenden Punkt in derselben Entfernung und zur selben Zeit beginnt wie T (abermals gleichgültig, bezogen auf welches System).

Dann gilt für jedes Paar solcher Prozesse: Der Prozess T trifft beim bewegten Beobachter um dieselbe Zeitspanne *später* ein als der Prozess S beim ruhenden Beobachter.

Betrachten wir die Lage in ebendiesem Augenblick, in dem sich die beiden Beobachter gerade gegenüberstehen: Nach dem soeben Gesagten zeigen die hinter dem bewegten Beobachter aufgestellten Uhren eine *spätere* Zeit an als die ihnen jeweils gegenüberliegenden des Ruhesystems. Das heißt: die Uhren des bewegten Systems gehen im Vergleich zu denen des ruhenden Systems *vor*, und je weiter sie von den Beobachtern entfernt sind, desto mehr gehen sie vor.

Wenn nun der bewegte Beobachter den Zeitvergleich auf die vorher definierte Weise durchführt, dann geschieht Folgendes:

Vom bewegten Beobachter aus gesehen kommt die Uhr, die sich direkt beim ruhenden Beobachter befindet, der Reihe nach an all den Uhren vorbei, die hinter dem bewegten Beobachter stehen. Diese Uhren zeigen jedoch, wie soeben festgestellt, zunehmend spätere Zeiten an als die Uhren des Ruhesystems. Die Uhr beim ruhenden Beobachter bleibt also hinter den jeweiligen Vergleichsuhren immer mehr zurück. Somit schließt der bewegte Beobachter auf eine *Verlangsamung* der Zeit des Ruhesystems im Vergleich zu seiner eigenen Zeit.

Um welchen Faktor erscheint dem bewegten Beobachter die Zeit des Ruhesystems gedehnt?

Um diesen Faktor zu bestimmen, müssen zwei einander entgegenwirkende Umstände berücksichtigt werden: *Einerseits* ist die Zeit des *bewegten* Systems aufgrund der längeren Lichtwege *tatsächlich* gegenüber der Zeit des Ruhesystems um den Faktor k gedehnt. *Andererseits* folgt aus der Versetzung der hinter dem bewegten Beobachter liegenden Ereignisse in die Zukunft – dem Vorgehen der Uhren, die nacheinander mit der Uhr des ruhenden Beobachters verglichen werden –, dass das Zeitvergehen des bewegten Systems beim sukzessiven Uhrenvergleich um den Faktor k^2 schneller erscheint als das ohne diese Versetzung der Fall wäre. (Ich will hier auf Mathematik verzichten. Für eine Überprüfung reichen aber elementare mathematische Kenntnisse aus.)

Für den Vergleich des Zeitvergehens in beiden Systemen müssen beide Faktoren kombiniert werden. Das Ergebnis ist offenbar, dass für den bewegten Beobachter die Zeit des Ruhesystems um den Faktor $k^2/k = k$ gedehnt erscheint, in Übereinstimmung mit der Relativitätstheorie.

Obwohl die Uhr des ruhenden Beobachters also *tatsächlich schneller* geht als alle Uhren des bewegten Systems, an denen sie vorbeikommt, muss der bewegte Beobachter dennoch aus den sukzessiven Uhrenvergleichen den Schluss ziehen, dass die Zeit im Ruhesystem um den Faktor k verlangsamt ist.

Kurz gesagt: Für den bewegten Beobachter erscheint *aus einsichtigen ontologischen Gründen* die Zeit des ruhenden Systems im Vergleich mit seiner eigenen Zeit im selben Maß gedehnt wie für den ruhenden Beobachter die Zeit des bewegten Systems.

Soviel zu den Verhältnissen, wie sie sich dem bewegten Beobachter darstellen. Ich erinnere aber daran, dass aus ontologischer Sicht – und das heißt: *in Wirklichkeit* – ein absolutes System existiert. Somit gibt es auch einen *wahren Lichtweg*, und es gibt ein Bezugssystem, in dem er am kürzesten ist – eben jenes absolute System, das *tatsächlich* ruht. In diesem System vergeht daher die Zeit tatsächlich schneller als in jedem relativ dazu bewegten System.

Wie angekündigt, haben wir den Uhrenvergleich ontologisch begründet, oder, um es anders auszudrücken: wir haben das relativistische Phänomen der Zeitdilatation anschaulich erklärt. Die Erklärung ist zugleich eine Demonstration, wie die asymmetrische Wirklichkeit den symmetrischen Formalismus erzeugt.

Ich schließe mit einigen allgemeinen Bemerkungen zur Relativität.

Einstein hat uns gelehrt, dass es keine universelle Zeit gibt, die "vermöge ihres Wesens" (Newton) überall gleichmäßig fließt. Das Vergehen der Zeit hängt vom Bewegungszustand eines Systems ab.

Daraus haben wir aber hier nicht, wie sonst üblich, nur *formale* Schlüsse gezogen, sondern wir haben dieses Faktum *ontologisch* analysiert. Wir haben erkannt, dass jede mögliche Wirklichkeit relativistisch ist, und diese Einsicht hat uns zu weitreichenden Schlussfolgerungen über die Struktur der Wirklichkeit geführt.

Im Licht der neuen Erkenntnisse lässt sich behaupten: Die relativistischen Phänomene stehen keineswegs im Widerspruch zu unserer apriorischen Raum- und Zeitvorstellung. Im Gegenteil – konsequent auf ihre *wirklichen* Voraussetzungen hin untersucht, erweisen sie sich sogar als *notwendige Folgen* dieser Vorstellung. Das bisherige Unverständnis lag nur daran, dass noch nie eine ontologische Ableitung der speziellen Relativität durchgeführt worden ist.

Um noch die Beziehung zum Titel meines Blogs herzustellen: Ohne Zweifel ist die Relativitätstheorie eine geistige Großtat. Aber das Versäumnis einer ontologischen Begründung kann nur als groteske Panne mit fatalen Folgen bezeichnet werden. Ich denke, dass schon durch meine aufs Einfachste reduzierte Skizze einer relativistischen Ontologie klar geworden ist, wie sehr eine Physik, die auf dieser Basis aufbaut, sich von der Standardphysik unterscheidet, in der diese Ontologie vollständig fehlt.

Am nächsten Montag werde ich mich wieder melden, voraussichtlich mit dem Beginn einer ontologischen Analyse der Quantenmechanik, durch die – wie soeben bei der Relativitätstheorie – alle Absurditäten der gegenwärtigen Interpretation verschwinden.

Zni Kiprot (Replikant, Serie Nexus 11)

Quantenmechanik, objektiv und lokal

"I think it is safe to say that no one understands quantum mechanics. Do not keep saying to yourself, if you can possibly avoid it, 'but how can it be like that?' because you will go 'down the drain' into a blind alley from which nobody has yet escaped. Nobody knows how it can be like that." (Richard Feynman, *The Character of Physical Law*, Penguin 1992, p. 129)

Das ist der Stand der Dinge. Was sich daran bis heute geändert hat, ist nicht etwa, dass die Physiker jetzt besser verstehen, was sich bei quantenmechanischen Prozessen wirklich ereignet – nein, der Tross der Physik ist bloß weitergezogen und hat die Angelegenheit unerledigt zurückgelassen. Statt der Einsicht, was sich bei quantenmechanischen Prozessen wirklich ereignet, sind das Scheitern der Interpretation und die damit verbundenen falschen Vorstellungen und Begriffsbildungen in die weitere Entwicklung der Physik eingegangen. Die Langzeitfolgen sind verheerend: Physik und Philosophie – und mit ihnen zugleich das allgemeine Verständnis der Wirklichkeit – nähern sich immer mehr dem Zustand vollständiger ontologischer Blindheit.

Ich werde folgendermaßen vorgehen: Zuerst werde ich mich mit einem der bekanntesten quantenmechanischen Szenarien befassen, dem sogenannten "Doppelspaltexperiment". Hören wir dazu zunächst wieder Richard Feynman:

"In this chapter, we shall tackle immediately the basic element of the mysterious behavior in its most strange form. We choose to examine a phenomenon which is impossible, absolutely impossible, to explain in any classical way, and which has in it the heart of quantum mechanics. In reality, it contains the only mystery. We cannot explain the mystery in the sense of 'explaining' how it works. We will 'tell' you how it works. In telling you how it works we will have told you about the basic peculiarities of all quantum mechanics." (Feynman, Leighton, Sands, *Lectures on Physics* Vol. 1, 37–2, Addison-Wesley 1965)

Ich stimme mit Feynman darin überein, dass dieses Phänomen nicht auf "klassische" *physikalische* Weise erklärt werden kann, und auch darin, dass es das "Herz" der Quantenmechanik, das "einzige" Geheimnis enthält. Mit der Aufklärung des Doppelspalt-

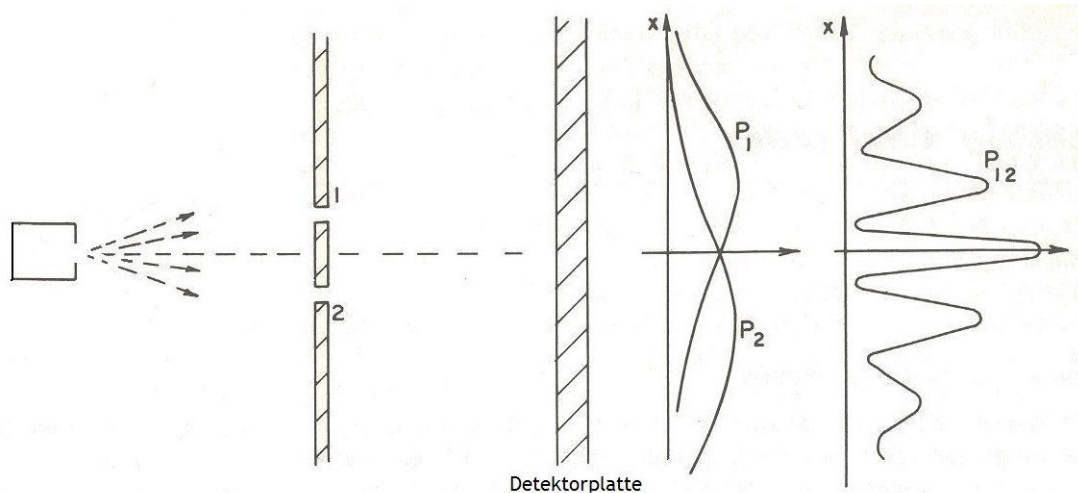
experiments ist daher schon ein wesentlicher Teil der ontologischen Analyse der Quantenmechanik geleistet.

Was jedoch vollkommen falsch ist – nicht nur bei Feynman, sondern tatsächlich bei fast allen, die sich in den vergangenen hundert Jahren zum Doppelspaltexperiment geäußert haben –, ist die Behauptung, dass es *absolut unmöglich* sei, zu erklären, *wie* es funktioniert, was also *wirklich* geschieht. Genau das werde ich im Folgenden darlegen, und die Aufklärung wird so einfach und selbstverständlich sein, dass Sie danach meine Verwunderung teilen werden, wie sich die Dinge dermaßen sinnwidrig entwickeln konnten – und vielleicht sogar meinen Zorn darüber, mit wie wenig Widerstand sich mehrere Generationen von Physikern dem kollektiven Wahnsinn unterworfen haben.

Obwohl das Doppelspaltexperiment beide im Titel dieses Beitrags genannten Probleme, das der Lokalität und das der Objektivität, enthält (was damit gemeint ist, werde ich gleich erklären), ist es dennoch nicht ausreichend, die Lokalität nur bei diesem Beispiel wiederherzustellen. Für eine spezielle Form der Nichtlokalität, die sogenannte "Verschränkung", gibt es nämlich einen Beweis, der nach allgemeiner Überzeugung zwingend ist. Daher muss das Problem der Verschränkung eigens analysiert werden.

Dieser Aufgabe werde ich mich nach der Beschreibung des Doppelspaltexperiments zuwenden. Um es vorwegzunehmen: der behauptete nichtlokale Zusammenhang wird sich als Artefakt herausstellen, das seine Existenz dem Fehlen quantenmechanischer Ontologie verdankt. Wenn man die Erkenntnis dessen, was bei quantenmechanischen Prozessen wirklich vor sich geht, auf Verschränkungsszenarien anwendet, wird fast augenblicklich klar, inwiefern das Beweisargument fehlgeht.

Zunächst also zum Doppelspaltexperiment.



Links im Bild ist eine Vorrichtung zur Erzeugung irgendwelcher Teilchen. (Z.B. Elektronen, oder auch Photonen. Das Folgende gilt für *alle* Arten von Teilchen.) Wird dieser Apparat eingeschaltet, dann erscheint auf der Detektorplatte in unregelmäßiger Folge ein Schwärzungspunkt nach dem anderen. Im Lauf der Zeit ergeben die Schwärzungen das bekannte Interferenzmuster. (P_1 zeigt die Verteilung der Punkte, wenn nur Spalt 1 offen ist, P_2 für Spalt 2, $P_{1,2}$ für beide Spalten.)

Das Scheitern aller Interpretationsversuche wird folgendermaßen dargestellt:

Einerseits treten Elektronen (oder Photonen usw.) ausschließlich als *unteilbare Einheiten* auf. Sie müssen daher als Teilchen beschrieben werden, das heißt: sie gehen *entweder* durch Spalt 1 *oder* durch Spalt 2. $P_{1,2}$ ist aber nicht die Summe von P_1 und P_2 – es gibt *Interferenz*, was im Teilchenbild unmöglich ist. Wir müssen also andererseits das Wellenbild der Elektronen verwenden, um diese Interferenz zu beschreiben. In *diesem* Bild tritt eine Welle durch beide Spalten, wird durch diese gebeugt, interferiert mit sich selbst und trifft auf die Detektorplatte. Abhängig von der Entfernung der Platte vom Doppelspalt kann die Welle dabei beliebig ausgedehnt sein. Wir beobachten aber kein allmähliches gleichmäßiges Ansteigen der Schwärzung der Detektorplatte gemäß $P_{1,2}$, sondern eine Folge eng lokalisierter Ereignisse, das heißt einzelner winziger Schwärzungen, die durch jeweils ein Elektron ausgelöst werden, das

also jetzt wieder der Teilchenvorstellung entspricht. Erst eine große Zahl solcher lokalen Ereignisse ergibt das Interferenzbild.

Wenn ein Teilchen erscheint, dann verflüchtigt sich augenblicklich die ganze ausgedehnte Welle – gleichgültig, wie weit sie sich vorher erstreckt hatte.

Teilchen- und Wellenbild sind miteinander unvereinbar. Dennoch benötigen wir *beide* zur Beschreibung. Somit scheinen wir gezwungen, die Beschränktheit unserer Begriffe zuzugeben und uns dort, wo sie versagen, ins mathematische Schema zurückzuziehen.

Dieses Schema ist allerdings überraschend einfach: Der Vorgang wird durch eine Funktion beschrieben, die einer Wellengleichung genügt. Tatsächlich stellt $P_{1,2}$ genau die Verteilung dar, die sich auch durch die Interferenz ganz normaler Wellen ergeben würde, nur dass bei Wellen eben keine punktförmigen Schwärzungen möglich wären, sondern überall eine allmähliche Zunahme der Schwärzung erfolgen müsste.

Deshalb wird die Amplitude dieser Funktion nicht als Amplitude einer wirklich existierenden Welle aufgefasst, sondern als *Wahrscheinlichkeitsamplitude*. Ihr Quadrat gibt die Wahrscheinlichkeit (im kontinuierlichen Fall die Wahrscheinlichkeitsdichte) der Ereignisse an.

In dieser Darstellung finden sich vier Arten von Problemen, oder sagen wir besser Absurditäten:

1. Wie bereits erwähnt, scheinen die *Begriffe*, mit denen wir die Realität erfassen, die uns umgibt, für das Verständnis des Doppelspaltexperiments ungeeignet. Wir sind gezwungen, beim Versuch der Beschreibung zwei einander ausschließende Konzepte – Welle und Teilchen – zu verwenden, was vermuten lässt, dass *beide* unzutreffend sind.
2. Noch tiefer greift die Frage nach der *Objektivität* der Darstellung, denn sie betrifft nicht nur die bildliche, sondern auch die formal-mathematische Beschreibung. Wegen der Annahme, dass die Wellen *überall* verschwinden, sobald irgendwo ein Teilchen erscheint, können wir diesen wellenartigen Phänomenen keine Existenz zuerkennen. Wenn aber die Elemente unserer Darstellung *nicht existieren*, dann kann diese Darstellung nicht "objektiv" genannt werden.

3. Überdies bedeutet dieses Verschwinden, dass hier ein *nichtlokaler Zusammenhang* auftritt: Auch wenn die Wellen nicht im üblichen Sinn existieren, hängen doch von ihren Amplituden die Wahrscheinlichkeiten der Ereignisse ab. Das Erscheinen des Teilchens reduziert also an jedem anderen Ort – auch in beliebig großer Entfernung – die Ereigniswahrscheinlichkeit auf Null, und zwar *ohne jeden vermittelnden Prozess*. (Würde es sich um "normale" Wahrscheinlichkeiten handeln, dann wäre das kein Problem, aber diese Annahme ist nicht möglich, weil die Wellen *interferieren*, und normale Wahrscheinlichkeiten können nicht interferieren.)

4. Schließlich ist auch die Frage völlig ungeklärt, *wie* es zum Übergang von den sich wellenartig ausbreitenden Möglichkeiten zum lokalisierten Ereignis kommt. Dieser Übergang wird "*Reduktion*" oder "*Kollaps*" der Wellenfunktion genannt.

In diesem "Kollaps der Wellenfunktion" konzentriert sich die ganze Problematik: Hier wird die Welle zum Teilchen und verschwindet zugleich überall sonst, hier löst die Welle, die nicht existiert, dennoch ein Ereignis aus – wobei es aber unzulässig wäre zu sagen, dass sie das Ereignis *verursacht*, denn dann würde man ihr ja doch Existenz zuerkennen. Niemand weiß, *warum* der Kollaps stattfindet und *wie* er sich vollzieht. Es kann sich aber offenbar nicht um einen physikalischen Prozess handeln.

Der Sachverhalt ist dermaßen absurd, dass sich die Erklärungsversuche wie dadaistische Collagen ausnehmen. Ich will darauf aber nicht weiter eingehen, sondern nur ein einziges, immer noch aktuelles Beispiel nennen: die sogenannte "Vielweltheorie". Hier spaltet sich das Universum bei jedem quantenmechanischen Messprozess in ebenso viele Universen auf, wie es mögliche Ereignisse gibt. Diese "Interpretation" ist nicht nur ontologisch absurd, sondern auch formal defekt: beim Doppelspaltexperiment kann nur dort ein Teilchen – z.B. ein Photon – detektiert werden, wo sich an der Oberfläche der Photoplatte ein Atom oder Molekül mit einer Elektronenhülle befindet. Diese Tatsache bestimmt die Orte der möglichen Lösungen sowie die Anzahl der Lösungen bzw. Universen. Nun kann aber das zentrale Element der quantenmechanischen Voraussage, die *Wahrscheinlichkeit* der Ereignisse, nicht berücksichtigt werden – oder sollten die weniger wahrscheinlichen Universen etwa *blasser* sein als die wahrscheinlicheren?

Wir verlassen aber nun den Friedhof gescheiterter Interpretationen und wenden uns endlich unserer eigentlichen Aufgabe zu: der Erklärung, was sich beim Doppelspaltexperiment *wirklich* ereignet. Im Folgenden nehmen wir an, es werde mit *Elektronen* durchgeführt.

Wir wollen uns nicht auf eine rein formale Darstellung des Experiments beschränken, sondern genau das erreichen, was nach Feynman "absolut unmöglich" ist, eine *anschauliche Erklärung, wie es wirklich funktioniert*. Deshalb müssen wir doch wieder auf die uns zur Verfügung stehenden anschaulichen Konzepte zurückgreifen, also auf Wellen und/oder Teilchen. Da sie einander widersprechen, gibt es nur zwei Möglichkeiten, zu einem widerspruchsfreien Ablauf zu gelangen: Entweder lässt sich eines der beiden Konzepte auf das andere zurückführen, oder beide auf ein drittes.

Wir beginnen unsere Untersuchung mit der Frage, wo und auf welche Weise diese beiden Konzepte im Doppelspaltversuch auftreten.

Zunächst zum Konzept *Welle*. Es wird benötigt, um die Beugung am Doppelspalt und die nachfolgende Interferenz zu begründen. Interferenz ist ein Phänomen, das einerseits durch Wellen vollständig erklärt wird und andererseits durch nichts anderes reproduziert werden kann. Daher ist Interferenz mit dem Konzept *Welle* fest verbunden, und das Konzept *Welle* ist durch nichts anderes ersetzbar.

Jetzt zum Konzept *Teilchen*. In der üblichen Beschreibung, die wir am Anfang wiedergegeben haben, erscheint es zweimal. Gleich zu Beginn, wo wir feststellten: "Elektronen treten ausschließlich als unteilbare Einheiten auf" und dann am Ende, wo ein "eng lokalisiertes Ereignis, das heißt ein einzelner winziger Schwärzungspunkt" sichtbar wird.

Das Konzept *Teilchen* dient also dazu, zwei Tatsachen zu begründen: *Unteilbarkeit* und *räumliche Begrenztheit*. Lassen sich diese beiden Tatsachen auch auf der Basis von Wellen verstehen?

Um das zu beantworten, muss man sich vergegenwärtigen, dass Wellen auf zwei Arten auftreten: als *laufende Wellen* und als *stehende Wellen*.

Es ist hilfreich, das Phänomen *stehende Welle* durch ein bekanntes Beispiel zu illustrieren. Betrachten wir etwa eine stehende Luftwelle in einem Rohr. Sie besteht aus einer Anzahl von Schwingungsbereichen, die durch Knotenflächen voneinander getrennt sind.

Durch diese Veranschaulichung wird unmittelbar klar, dass das Konzept *stehende Welle* tatsächlich die Bedingung der *Unteilbarkeit* erfüllt: Offenbar existiert eine stehende Welle nur *als Ganzes*. Sie kann nicht *geteilt*, sondern nur *aufgelöst* werden. Ihre Unteilbarkeit ist allerdings von anderer Art als die eines "Teilchens": die stehende Welle ist als *Gestaltphänomen* unteilbar, das seine Existenz einem Prozess der Selbstorganisation verdankt.

Außerdem lässt sich Folgendes feststellen: Wenn sich die stehende Welle ändert, dann ist zwar der verursachende Prozess *stetig*, aber dem Beobachter erscheint diese Änderung *sprunghaft*.

Nehmen wir beispielsweise an, im Rohr befinde sich eine stehende Welle mit drei Schwingungsbereichen. Wenn wir nun die Anregungsbedingungen der stehenden Welle stetig ändern – etwa durch allmähliche Veränderung des Anblasens des Rohres – dann ereignet sich zunächst (fast) nichts Hörbares, solange, bis die stehende Welle in den nächsten Ton "springt", d.h. in einen Zustand mit einem Schwingungsbereich mehr. *Erst dann* hören wir den nächsten Oberton.

Erinnern wir uns: Das Konzept *Teilchen* dient zur Begründung von zwei Beobachtungstatsachen: *Unteilbarkeit* und *räumliche Begrenztheit*.

Was die *Unteilbarkeit* betrifft, haben wir bereits erkannt, dass sie ebenso durch Wellen erklärt werden kann – und man sollte hinzufügen, dass es sich dabei um eine wirkliche *Erklärung* handelt, im Gegensatz zur Unteilbarkeit des Teilchens, die ein bloßes *Postulat* ist.

Was ist mit der *räumlichen Begrenztheit*? Sie ist sogar das Charakteristikum stationärer Wellenzustände: stehende Wellen sind durch räumliche Begrenzung *definiert* und können nur unter entsprechenden Randbedingungen auftreten. Also ist *räumliche Begrenztheit* bei stehenden Wellen ebenso selbstverständlich wie *Unteilbarkeit*.

Damit sind beide Gründe für die Annahme von Teilchen bei der Beschreibung des Doppelspalt-experiments hinfällig: Das Konzept "Teilchen" kann auf das Konzept "Welle" zurückgeführt werden.

Um zu beweisen, dass auch das Erscheinen des Teilchens sowie das gleichzeitige "Verschwinden" der ausgedehnten Welle durch das Konzept "Welle" erklärt werden können, müssen wir uns wieder dem Doppelspaltexperiment selbst zuwenden. Nach unseren Vorbereitungen sind wir nun in der Lage, die geforderte *anschauliche und verständliche Beschreibung* durchzuführen, wobei wir auf Teilchen verzichten und die Beschreibung ausschließlich mit Wellen durchführen.

Wir nehmen also an, das Elektron sei eine Welle und *nichts als* eine Welle. Dann tut es genau das, was bei Wellen selbstverständlich ist, das heißt: Es läuft zunächst durch *beide* Spalten, wird durch sie gebeugt, läuft also nach dem Doppelspalt *tatsächlich* auseinander und interferiert mit sich selbst.

Dann trifft die Elektron-Welle auf die Detektorplatte. Dort befinden sich sogenannte *Elektronenhüllen*. Diese sind aber ebenfalls Wellen. Also ist die ganze Detektorplatte eine Welle, oder sagen wir besser: ein Wellenfeld. Das Eindringen der Elektron-Welle in das Wellenfeld "Detektorplatte" bedeutet also: es kommt zu Überlagerungen der Wellen.

Nun benötigen wir die zuvor beschriebenen Eigenschaften stehender Wellen: Wenn Elektronen oder Elektronenhüllen stehende Wellen sind, dann können sie nur in bestimmten, diskreten Zuständen existieren bzw. sind nur in solchen stabil. Wenn also der Zustand der *gesamten* Hülle – d.h. der Gesamtschwingungszustand des entsprechenden Raumbereichs – sich *stetig* verändert, geschieht so lange nichts Beobachtbares, bis die Veränderung groß genug ist, um den (scheinbar) un stetigen Übergang auf den nächsten stabilen Zustand zu erzwingen.

So wie bei der stehenden Welle im Rohr beobachten wir auch hier die *diskrete Folge* möglicher stabiler Zustände des gesamten räumlichen Schwingungsbereichs. Das Umspringen zwischen den stabilen Zuständen äußert sich *lokal*, als Auftreten einer zusätzlichen Knotenfläche und damit eines zusätzlichen Schwingungsbereiches. Genau wie bei der stehenden Welle im Rohr ist dieser aber auch hier natürlich nicht *als einzelner hinzugefügt* worden (wie das bei der Teilchenvorstellung der Fall wäre), sondern er erscheint als Folge der Neuorganisation der ganzen räumlichen Wellenstruktur. Und auch hier gilt: Das eigentliche, ursächliche Geschehen verläuft *stetig*.

Zurück zum Doppelspaltversuch.

Es ist nun schon fast alles gesagt. Es muss nur noch angenommen werden, dass das, was weiter oben im Fall von stehenden Luftwellen als "stetige Änderung der Anregungsbedingungen" bezeichnet worden ist, im Fall der Elektronen-Wellen der *stetigen Akkumulation von Wellenintensitäten* entspricht.

Die Annahme lautet:

Die unstetige Änderung des lokalen Schwingungszustands, die sich als Messergebnis präsentiert, wird durch einen stetigen Prozess verursacht – durch Wellen, deren Amplitudenquadrate sich summieren, bis es zu einem Übergang kommt.

Die lokale Wellen-Intensität bestimmt daher die lokale Wahrscheinlichkeit eines solchen Übergangs.

Es ist also ganz einfach:

Wellen treffen auf die Platte, dringen ein und überlagern sich den schon vorhandenen. Die Wellen-Intensitäten, deren Verteilung der quantenmechanischen Wahrscheinlichkeitsdichte (den Kurven in der Skizze) entspricht, summieren sich am Ort des Eindringens, bis der an diesem Ort vorhandene räumliche Schwingungszustand (die Elektronenhülle) in den nächsten stabilen Zustand "springt", in der üblichen Sichtweise also "ein zusätzliches Elektron erscheint". Diese Übergänge sind somit eine Folge *lokaler Gegebenheiten*, unabhängig von den gleichzeitig an anderen Stellen stattfindenden Summationsprozessen gleicher Art, die *später* ebenfalls zu Übergängen führen.

Insbesondere erfolgt zum Zeitpunkt eines Übergangs kein Verschwinden anderer Wellen.

Unter dieser Voraussetzung besteht dann rein formal kein Unterschied zur üblichen Sichtweise – nur die Interpretation des Amplitudenquadrates der Welle ändert sich: anstelle einer Wahrscheinlichkeitsdichte, die sich auf *nichts* bezieht und bloß ein mathematisches Hilfsmittel darstellt, tritt eine Wahrscheinlichkeitsdichte, die ihre Existenz einer *physikalischen Größe* verdankt: der Intensität einer Welle. Das Resultat ist offensichtlich identisch.

Um vollständige Übereinstimmung mit den quantenmechanischen Vorgaben zu erreichen, muss dieser Modellvorstellung nur noch ein Zufallselement hinzugefügt werden. Das ergibt sich im Wellenmodell aber von selbst, denn es kann nicht vorausgesetzt werden, dass sich vor dem Eintreffen der Elektron-Wellen alle Elektronenhüllen in *genau* denselben Zuständen befinden.

Kehren wir zur Veranschaulichung wieder kurz zu den analogen Verhältnissen bei stehenden Luftwellen zurück: Betrachten wir eine große Zahl gleicher Rohre, in denen die Luftsäule im dritten Oberton schwingt. Daraus folgt nun nicht, dass die Zustände der Luftsäulen in allen Rohren identisch sind. Bei einigen könnte die geringste Änderung der Anregungsbedingungen dazu führen, dass sie in den zweiten Oberton kippen, bei anderen wiederum zu einem Sprung in den vierten Oberton, während wieder andere gegen kleine Änderungen unempfindlich sind.

Analog zu dieser Vorstellung nehmen wir an, dass die Zustände der Elektronenhüllen innerhalb des ganzen Bereichs, in dem der Schwingungszustand sich nicht sprunghaft verändert, zufallsverteilt sind.

Damit sind die quantenmechanischen Voraussagen im Fall des Doppelspaltexperiments vollständig auf stetige, lokale und objektive Prozesse zurückgeführt.

In diesem anschaulichen, lokalen und objektiven Modell gibt es kein Geheimnis. Alle Absurditäten haben sich verflüchtigt: es gibt keine *Reduktion der Wellenfunktion* – jedenfalls nicht in dem Sinn, dass irgendetwas verschwindet, die Annahme *objektiver Wahrscheinlichkeiten* ist überflüssig, nichts ist zugleich *Welle und Teilchen*, der *Messakt* ist ohne Bedeutung, kein *Beobachter-Bewusstsein* mischt sich ein, das *Universum spaltet* sich nicht in unendlich viele fast identische Kopien seiner selbst auf, und so weiter und so weiter...

Die Erklärung basiert ausschließlich auf dem Konzept *Welle*. Da die Eigenschaften Unteilbarkeit (bzw. Diskretheit) sowie Lokalisiertheit durch Wellen erklärt werden können, ändert sich die Auffassung der Phänomene, die als *Teilchen* bezeichnet werden. Sie werden nicht mehr als Objekte verstanden, die Abstraktionen makroskopischer Gegenstände darstellen, sondern es gilt:

Teilchen sind Schwingungsbereiche stehender Wellen bzw. Übergänge zwischen verschiedenen möglichen Zuständen stehender Wellen.

Da ich nicht mitten in der Erklärung unterbrechen wollte, ist mein Beitrag diesmal länger als üblich. Nächstes Mal werden wir auf einige Elemente der Erklärung näher eingehen und uns außerdem damit beschäftigen, welche Bedeutung die Umstellung der Interpretation hat, die wir soeben durchgeführt haben.

Zni Kiprot (Replikant, Serie Nexus 11)

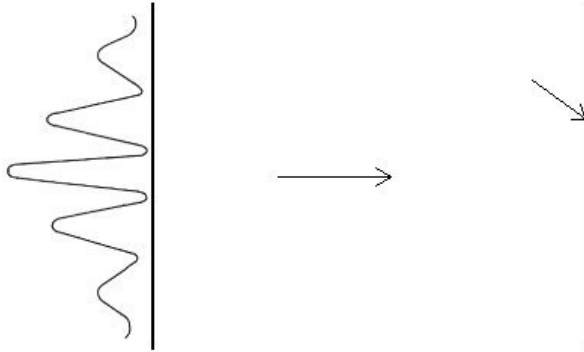
Quantenmechanik 2

Ein wichtiges Element meiner Interpretation des Doppelspaltexperiments habe ich noch nicht erwähnt:

Die "Elektron" genannte Welle, die den Doppelspalt durchläuft, ist nicht identisch mit dem "Elektron" genannten Übergang, der unmittelbar danach in der Detektorplatte stattfindet.

In meiner Beschreibung des Vorgangs verschwindet die Welle ja nicht, sondern dringt überall in die Detektorplatte ein. An der Stelle, wo durch die Welle der nächstfolgende Übergang ausgelöst wird – in der üblichen Sicht also das Teilchen erscheint – befindet sich daher in jedem Fall nur ein kleiner Teil der gesamten Welle. Die anderen Teile der Welle werden später an anderen Orten zu Übergängen führen, falls weitere Wellen (Elektronen) folgen.

Betrachten wir nochmals den sogenannten "Kollaps der Wellenfunktion" beim Doppelspaltexperiment:



Links im Bild der Zustand *vor* dem Kollaps: eine ausgedehnte Welle, die durch Beugung am Doppelspalt und nachfolgende Interferenz entstanden ist. Rechts im Bild – an dem Ort, auf den der kleine Pfeil hinweist – der Zustand *nach* dem Kollaps: ein mikroskopisch kleines Objekt.

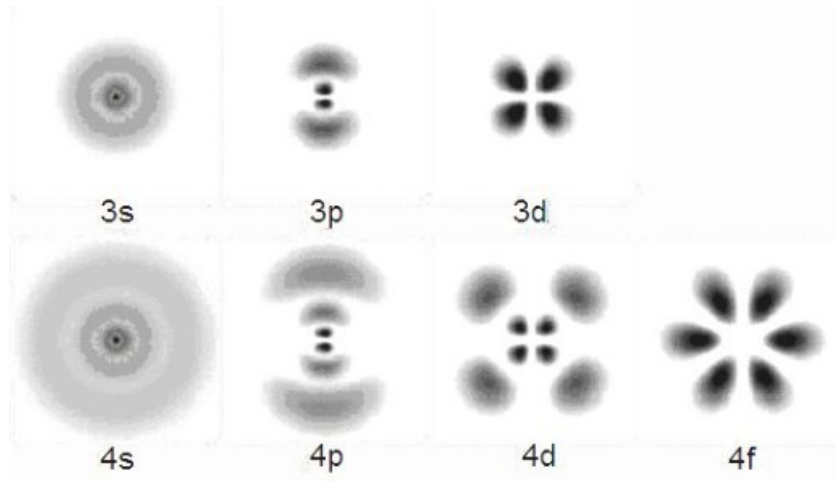
An diesem Punkt trennt sich meine Interpretation von der Standardinterpretation: In der Standardinterpretation ist die ausgedehnte Welle verschwunden, sobald das "Teilchen" erscheint. Das Objekt, das vorher durch die Welle beschrieben wurde, ist nun zum Teilchen geworden – es ist in diesem Sinn *dasselbe Objekt*.

In meiner Interpretation hingegen „verschwindet“ überhaupt nichts, sondern die links skizzierte Welle dringt *überall* in die Platte ein und kann an jedem Ort, an dem ihre Amplitude nicht Null ist, einen Übergang der dort befindlichen stehenden Welle verursachen (die in der Standardinterpretation als „Elektronenhülle“ bezeichnet wird). Nach dem Übergang enthält die stehende Welle eine zusätzliche Knotenfläche und somit auch einen zusätzlichen Schwingungsbereich (üblicherweise als zusätzliches „Elektron“ aufgefasst), der aber selbstverständlich nicht mit der vorher existierenden ausgedehnten Welle identisch ist; vielmehr enthält nun *der ganze lokale Wellenzustand* einen Teil dieser Welle – genau denjenigen, der an diesem Ort auf die Detektorplatte aufgetroffen ist.

(Wenn an dem Ort, wo der nächste Übergang stattfindet, jeweils nur ein kleiner Teil der Welle in den Detektor eindringt – wieso beobachten wir dann am Beginn des Versuchs ohne Verzögerung ein erstes Ereignis? Der Grund ist, dass die stehenden Wellen (Elektronenhüllen) – wie im vorigen Beitrag ausgeführt – im Bereich zwischen den Grenzen, bei denen ein Übergang stattfindet, zufallsverteilt sind. Der Zustand einiger Elektronenhüllen muss daher so nah an der

oberen Grenze liegen, dass die geringste Anregung genügt, um den "Sprung" in den nächsthöheren Zustand auszulösen.)

Ergänzen wir die Skizze noch durch ein Bild der stehenden Wellen, die an der Oberfläche der Detektorplatte gemäß der quantenmechanischen Beschreibung existieren. Der Einfachheit halber betrachten wir aber keines der Moleküle, die sich tatsächlich dort befinden, sondern ein Wasserstoffatom in einigen möglichen Zuständen, zwischen denen es "unstetig" springt, wenn es angeregt wird:



Die Skizze zeigt die Amplitudenquadrate der jeweiligen Wellenfunktionen; darunter stehen die Bezeichnungen dieser Zustände.

Jedes dieser Bilder gibt einen möglichen *Schwingungszustand des Innenraums einer Kugel* wieder. Es handelt sich also um *stehende Wellen*, genau wie in meiner Interpretation behauptet.

Zusammengefasst haben wir also folgende Fakten vor uns:

1. In der ersten Skizze sehen wir links die quantenmechanische Darstellung der Welle, deren lokales Amplitudenquadrat die Häufigkeit der "Teilchen" bestimmt, die dort auftreten.

2. In der zweiten Skizze sehen wir die quantenmechanische Darstellung der Zustände der Moleküle in der Detektorplatte: räumliche stehende Wellen.

Diese beiden Fakten ergänzen sich auf vollkommen natürliche Weise zu der objektiven und lokalen Interpretation, die ich hier vorgestellt habe: Die Wellen dringen als *laufende Wellen* in die Platte ein, überlagern sich mit den dort vorhandenen *stehenden Wellen* und verursachen schließlich einen Übergang: ein "Teilchen" erscheint.

In der Standardinterpretation führt dagegen das Festhalten am Teilchenbegriff zu einer Reihe von unbehebaren Absurditäten: Schon beim Durchqueren des Doppelspalts entsteht dadurch die Frage, "welchen Weg" das "Teilchen" nun "wirklich" nimmt. Allein darüber sind zigtausend Seiten veröffentlicht worden. Es ist ja bekannt, wie die Antwort aussieht: versucht man herauszufinden, wo sich das Elektron befindet, dann muss man Licht von so kurzer Wellenlänge verwenden, dass dadurch das Interferenzbild zerstört wird.

Das wird dann folgendermaßen interpretiert:

Dadurch, dass wir den Ort des Teilchens messen, *wird* das quantenmechanische Phänomen erst zum Teilchen. Es hängt also von uns ab, ob sich die Wirklichkeit als Welle oder als Teilchen präsentiert. Die Eigenschaft, die wir messen, *entsteht* erst durch die Messung. Vor der Messung existierte sie nicht. Unsere Beschreibung ist nicht objektiv.

In meiner Interpretation ist diese Schlussfolgerung überflüssig: Da es kein "Teilchen" gibt, ist es unsinnig zu fragen, welchen Weg es genommen hat. Die Welle nimmt *immer* beide Wege. Und es ist vollkommen selbstverständlich, dass das Interferenzbild zerstört wird, wenn die Elektron-Welle mit Licht ausreichend hoher Frequenz bestrahlt wird. Deshalb wird die Welle jedoch nicht zum Teilchen, sondern ich erhalte bloß eine Ablenkung des Lichts, die sich auch im Wellenbild ergibt: wo das Amplitudenquadrat der Elektron-Welle – üblicherweise als "Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens" aufgefasst – groß ist, dort muss auch die Ablenkung groß sein.

Es handelt sich also durchgehend um Wellen, und solange wir sie *als Wellen* beschreiben, ist unsere Beschreibung objektiv. Der Anschein von Nicht-Objektivität entsteht erst dadurch, dass wir versuchen, unsere Darstellung auf *Teilchen* zu beziehen, d.h. auf etwas, was als solches überhaupt nicht existiert.

Die nächste Absurdität ist das Verschwinden der Welle, wenn das Teilchen auftritt. Man bedenke: Da ist eine *Welle, die ihre Existenz durch Interferenz beweist. Es muss aber gelehrt werden, dass sie existiert, weil sie ja verschwindet, und zwar ohne jede physikalische Ursache.*

Wie klar und selbstverständlich ist dagegen die *Annahme, dass die Welle wirklich existiert, und dass sie genau dort, wo sie in die Detektorplatte eindringt, entsprechend ihrer jeweiligen Intensität einen Übergang der dort vorhandenen stehenden Welle (Elektronenhülle) verursacht.*

Es ist mir vollkommen unbegreiflich, wie eine dermaßen nahe liegende Möglichkeit, den ganzen Vorgang zu verstehen und durch ein vernünftiges, d.h. objektives und lokales Modell darzustellen, seit mehr als hundert Jahren übersehen werden konnte.

Offensichtlich entstehen alle Interpretationsprobleme erst dadurch, dass in einen Ablauf, der mit einem Zustand aus stehenden Wellen beginnt, dann in einen Prozess aus laufenden Wellen übergeht und schließlich in einem Zustand aus stehenden Wellen endet, die Existenz von Teilchen hineinprojiziert wird.

Die Geschichte der Physik zeigt, wie schwer es den Physikern gefallen ist, sich vom Teilchenbegriff zu lösen, und wie sie schließlich daran gescheitert sind, auf ihn vollkommen zu verzichten.

Betrachten wir etwa die Entwicklung des Atommodells. Vor der Quantenmechanik gab es das Bohr-Sommerfeldsche Atommodell: negativ geladene Elektronen bewegen sich auf kreisförmigen oder elliptischen Bahnen um den positiv geladenen Kern, analog zu den Planeten des Sonnensystems.

Es war allerdings klar, dass dieses Modell nicht richtig sein kann, weil beschleunigte Elektronen Energie abstrahlen. Die Elektronen hätten sich also immer weiter dem Kern annähern und schließlich in ihn hineinfallen müssen. Außerdem konnten in diesem Modell Zustände mit Bahndrehimpuls 0 nicht dargestellt werden. In der quantenmechanischen Beschreibung heißen sie s-Zustände; in der obigen Skizze sind sie ganz links wiedergegeben. Hier rotiert offensichtlich nichts, kein Elektron fliegt im Kreis um den Kern herum.

Probleme ganz anderer Art ergaben sich dann durch die Überlegungen Heisenbergs, der erkannte, dass Ort und Impuls nicht gleichzeitig bestimmt werden können, sondern dass eine

"Unschärfe" besteht, die durch die Gleichung $\Delta x * \Delta p \geq h$ ausgedrückt wird. Dadurch wurde klar, dass sich die Bahn des Elektrons nicht beobachten lässt, ohne es zugleich so massiv zu stören, dass es aus dieser Bahn herausgeschleudert wird. Die Tatsache, dass die Bahn nicht beobachtbar ist, führte dann zur Annahme, dass eine "Bahn" gar nicht existiert.

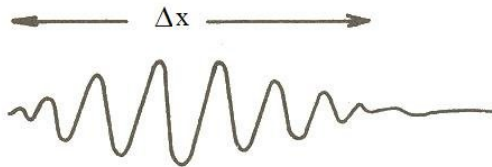
Auch diese Einsicht reichte aber nicht aus, auf die "Teilchen" nun ganz zu verzichten und endlich zu erkennen, dass die Elektronen der ganze räumliche Schwingungszustand *sind*.

Stattdessen nahm man in Kauf, dass sich ein Teilchen, bevor es gemessen wird, "nirgends" (oder "irgendwo"?) befindet, und dass es sich erst dann manifestiert, wenn wir seinen Ort messen – den es vorher nicht hatte, weil er ja erst durch unsere Messung entsteht. Alle diese ontologischen Kraftübungen sind vollständig überflüssig, wenn der Teilchenbegriff endlich auf die Weise modifiziert wird, wie in meinem vorigen Beitrag definiert:

Teilchen sind Schwingungsbereiche stehender Wellen oder Übergänge zwischen verschiedenen möglichen Zuständen stehender Wellen.

Betrachten wir unter dieser Voraussetzung Heisenbergs Unschärferelation $\Delta x * \Delta p \geq h$.

Falls die Teilchen, auf die sich diese Gleichung bezieht, tatsächlich Wellen *sind*, dann verwandelt sich die Gleichung augenblicklich von einer ontologischen Absurdität in eine ontologische Trivialität. Bei räumlich begrenzten Wellenzügen (Wellenpaketen) wie in der folgenden Skizze



gilt bekanntlich *immer* eine "Unschärferelation" (λ ist die Wellenlänge)

$$\Delta x * \Delta(1/\lambda) \geq 1$$

Solche Wellenzüge *haben* einfach keine eindeutige Wellenlänge und keinen eindeutigen Ort. Sie sind aus Wellen mit verschiedenen Wellenlängen zusammengesetzt. (Da die Wellengeschwindigkeit von der Wellenlänge abhängt, wird sich der Wellenzug im Lauf der Zeit zerstreuen.) Je kleiner die räumliche Eingrenzung Δx wird, umso größer wird das Intervall der benötigten Wellenlängen. Je genauer umgekehrt die Wellenlänge festgelegt ist, desto größer wird die Ortsunschärfe Δx . In Verbindung mit der Gleichung

$$p = h * 1/\lambda$$

ergibt sich somit

$$\Delta x * \Delta p \geq h.$$

Also ist es wiederum ganz einfach: Wenn wir annehmen, es handle sich um Wellen, dann ist unsere Beschreibung offensichtlich objektiv: Es *sind* Wellen, und sie verhalten sich in jeder möglichen Hinsicht wie Wellen. Wenn wir aber darauf bestehen, ihnen eine eindeutige Geschwindigkeit zuzuordnen, dann ist das nur auf folgende Weise möglich:

Da die Geschwindigkeit von der Wellenlänge abhängt, bedeutet eindeutige Geschwindigkeit auch eindeutige Wellenlänge. Der oben dargestellte Wellenzug *hat* aber keine bestimmte Wellenlänge. Um dennoch zum gewünschten Ergebnis zu gelangen, müssen wir den Wellenzug also – mathematisch und/oder experimentell – in Sinuswellen zerlegen, die eine eindeutige Wellenlänge haben. (Eine solche Zerlegung ist immer möglich.) In der Zerlegung treten die jeweiligen Sinuswellen mit bestimmter Wellenlänge stets auch mit einer bestimmten Amplitude auf.

Als letzten Schritt ordnen wir nun dem jeweiligen Amplitudenquadrat die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Teilchens mit dieser Wellenlänge bzw. Geschwindigkeit zu und – Zauberei! – wir haben das gewünschte quantenmechanische Ergebnis. Und wenn wir den Wellenzug auch experimentell, also *tatsächlich*, in Bündel von Sinuswellen mit eindeutiger Wellenlänge zerlegt haben, dann werden die einzelnen Bündel in den Detektoren, auf die sie auftreffen, Ereignisse (Übergänge) auslösen, deren Häufigkeit dem Amplitudenquadrat der auftreffenden Wellen entspricht.

Bis auf den Satz, in dem vom Teilchen die Rede ist, ist der ganze Vorgang vollkommen verständlich. Er enthält keinerlei Probleme oder gar Absurditäten. Es ist klar: *Wenn* ich dem Wellenzug eine Geschwindigkeit zuordnen will, dann *muss* ich auf die soeben beschriebene Weise vorgehen. Erst dadurch, dass ich dem Vorgang zuletzt doch wieder die Teilchenvorstellung aufzwinge – die dort überhaupt nicht hineinpasst – kommt es zu den bekannten Interpretationsproblemen.

Es ist ja richtig, dass die Eigenschaft "Geschwindigkeit" nicht existiert, bevor ich sie messe, aber nicht aus irgendwelchen geheimnisvollen Gründen, sondern ganz einfach deshalb, weil der Wellenzug eben keine bestimmte Geschwindigkeit *hat*. Seltsam wird die Angelegenheit nur dann, wenn ich annehme, es gäbe ein "Teilchen", das vor der Messung keine Geschwindigkeit hat und sie erst durch die Messung erhält.

Dasselbe gilt für den Ort: Wäre da ein "Teilchen", dann *müsste* es eigentlich einen Ort haben, und anzunehmen, es hätte vor der Messung keinen, wäre absurd. Es gibt aber kein Teilchen, und der Wellenzug hat eben auch keinen eindeutigen Ort. Wenn wir ihm aber einen Ort zuordnen wollen, dann müssen wir den Wellenzug wieder zerlegen, und zwar in Pulswellen (das sind Wellen, deren Amplitude nur an einem einzigen Ort nicht Null ist.)

Auch hier gilt wieder. Es ist richtig, dass die Eigenschaft "Ort" erst durch die Messung entsteht, aber nicht in der Weise, dass das "Teilchen" diese Eigenschaft erst durch die Messung erhält, sondern einfach deshalb, weil der Wellenzug keinen eindeutigen Ort *hat*. Dass aber das beobachtete Ereignis dann an einem bestimmten Ort stattfindet, hat seinen Grund – genau wie beim Doppelspaltexperiment – einfach darin, dass an diesem Ort der durch die Welle ausgelöste Übergang stattfindet.

Was soeben über Ort und Geschwindigkeit gesagt wurde, gilt auch ganz allgemein: Unter den Klassen von Wellen, in die eine Wellengestalt zerlegt werden kann, gibt es stets Paare, zwischen denen – genau wie bei Sinuswellen und Pulswellen – eine *Unschärferelation* besteht. Wenn die Welt aber aus Wellen aufgebaut ist, dann muss jede Eigenschaft, die gemessen wird, mit einer bestimmten Wellenklasse zusammenhängen. Wenn nun zwei Eigenschaften betrachtet werden, die zu einem solchen Paar von Wellenklassen gehören, dann muss für diese beiden Eigenschaften ebenfalls eine Unschärferelation gelten.

Wie soeben am Beispiel von Ort und Geschwindigkeit (bzw. Impuls) demonstriert, ist die Quantenmechanik also genau derjenige mathematische Formalismus, der es ermöglicht, eine Welt, die nur aus Wellen besteht, durch Eigenschaften zu beschreiben, die der Gegenstandswelt entstammen. Das Phänomen, das gemessen oder beschrieben werden soll, ist immer eine Welle, und der quantenmechanische Formalismus erlaubt es, diese Welle in Wellen derjenigen Wellenklasse zu zerlegen, der die zu messende Eigenschaft zugeordnet ist. Und es lässt sich auch für jedes Attribut erklären, *warum* diese Zuordnung besteht – aber das übersteigt den Rahmen meines Blogs.

Jedenfalls ist klar zu sehen: an den so verstandenen quantenmechanischen Messprozessen ist nichts absurd oder geheimnisvoll – aber nur, solange wir nicht wieder um jeden Preis darauf bestehen, die Teilchenvorstellung ins Modell einzubringen. Wenn wir das aber tun, dann allerdings werden die Dinge auf die bekannte Weise unerklärbar, und der ganze Rattenschwanz scheinbar tief sinnigen physikalischen und philosophischen Gefasels ist unvermeidlich.

Betrachten wir zuletzt nochmals die Skizze, in der einige Zustände des Wasserstoffatoms dargestellt sind. Durch die Bilder in der Skizze wird überdeutlich demonstriert, wie unsinnig die Standardinterpretation ist: die Kugelwellen dürfen keine wirklichen Wellen sein, sondern ihr Amplitudenquadrat soll nur die Wahrscheinlichkeit anzeigen, dass sich an dieser Stelle ein Elektron aufhält.

Die Frage ist doch: *Was* soll sich eigentlich dort aufhalten? Das, was sich da irgendwo aufhalten soll und dessen Aufenthaltswahrscheinlichkeit durch das Amplitudenquadrat der Welle angezeigt wird, entsteht ja angeblich ohnehin erst dadurch, dass wir es messen. Vorher "existierte" es nicht. Wozu also seine "Weder-Existenz-noch-Nichtexistenz" behaupten?

Und wenn es dann gemessen ist, woraus schließen wir eigentlich auf seine "Teilchenhaftigkeit"? Nur aus den möglichen Folgen seiner angeblichen Existenz. Da ist jedoch nichts, was nicht auch durch Wellen erklärbar wäre. Wir könnten z.B. die Frequenzen des abgestrahlten Lichts bestimmen. Sie ergeben sich aber auch ganz selbstverständlich im Wellenbild (und nur in diesem sind sie wirklich *erklärbar*). Oder wir könnten Streuversuche durchführen: dann würden wir aus der Ablenkung schließen, wo sich das Teilchen aufhält. Wo es sich häufiger befindet, dort ist der Ablenkungswinkel größer. Dieselbe Ablenkung ergibt sich aber – wie schon vorher erwähnt – auch aus der Tatsache, dass dort, wo das Amplitudenquadrat der *wirklichen* Welle größer ist, auch der Ablenkungswinkel größer sein muss.

Zuletzt noch eine kleine Geschichte, etwas, was mir selbst widerfahren ist und was die Einstellung vieler Physiker zum Dualismus in der Quantenmechanik zum Ausdruck bringt:

Am Anfang der Quantenmechanik standen der Lichtelektrische Effekt und der Compton-Effekt, bei deren Beschreibung *Lichtteilchen* angenommen wurden. Ich habe für beide Effekte einfache Modelle erstellt, die ausschließlich auf *Wellen* beruhen. Einige Physiker haben mir gesagt, dass ich damit nur gezeigt hätte, was ohnehin klar ist: in der Quantenmechanik ließe sich eben alles auf beide Arten erklären. Nun, erstens ist das falsch – richtig ist, dass alles, was durch Teilchen beschrieben wird, auch durch Wellen beschreibbar ist; das Umgekehrte gilt jedoch nicht. Aber selbst wenn es so wäre – wozu dann das Festhalten am Teilchenbegriff in der bisherigen Form?

Ich schließe mit einem Gebet:

Heilige Vernunft, erleuchte die Uneinsichtigen. Gib ihnen die geistige Kraft, endlich zu begreifen, was wirklich vor sich geht und erlöse sie aus ihrer ontologischen Umnachtung.

Nächstes Mal werden wir uns mit der Tatsache der Verschränkung befassen und sie auf lokale Weise erklären.

Zni Kiprot (Replikant, Serie Nexus 11)

Quantenmechanik 3

Diesmal geht es um ein quantenmechanisches Phänomen, das "Verschränkung" genannt wird.

Um zu erklären, worum es sich dabei handelt, beginnen wir mit einem einfachen Beispiel. Betrachten wir zwei identische Waggons einer Spielzeugeisenbahn. Wir stellen sie auf ein ebenes, gerades Geleise und koppeln sie aneinander. Dann klemmen wir eine Feder zwischen die beiden Waggons. Wenn wir nun die Verbindung der Waggons lösen, dann werden sie durch die Feder in entgegengesetzte Richtungen beschleunigt.

Offenbar werden nun Messungen der Orte und der Geschwindigkeiten der Waggons zusammenhängen: Die Geschwindigkeiten beider Waggons sind zu jedem Zeitpunkt gleich groß und einander entgegengesetzt, und gleichzeitig gemessene Orte liegen in gleicher Entfernung vom Startpunkt.

Jetzt machen wir dasselbe Experiment mit "Teilchen" statt mit Waggons. Nehmen wir an, ein ruhendes Teilchen zerfalle in zwei identische Teilchen A und B. Für Orts- und Geschwindigkeitsmessungen an diesen beiden Teilchen gilt dann dasselbe wie zuvor bei den Waggons: Die Geschwindigkeiten beider Teilchen sind gleich groß und einander entgegengesetzt, und gleichzeitig gemessene Orte liegen in gleicher Entfernung vom Zerfallsort.

Soweit ist alles klar und trivial. Worin liegt also das Problem? Darin, dass die Teilchen, im Gegensatz zu den Waggons, vor der Messung keine eindeutigen Geschwindigkeiten und Orte haben, sondern dass bloß eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der möglichen Messwerte vorliegt. Orte und Geschwindigkeiten stehen erst *nach* der Messung fest.

Es genügt jedoch, die Messung an *einem* Teilchen zu vollziehen, um den Wert für *beide* zu bestimmen. Das liegt daran, dass beide Teilchen eine gemeinsame Wellenfunktion haben. Durch die Messung erfolgt wieder, wie beim Doppelspaltversuch, eine Reduktion dieser Wellenfunktion, so dass danach der Messwert für beide Teilchen feststeht.

Nehmen wir beispielsweise an, wir messen die Geschwindigkeit von Teilchen A. Dadurch erhalten wir ein eindeutiges Resultat für A *und* für B. Daher gilt für Teilchen B: *Vor* der Messung hatte B keine bestimmte Geschwindigkeit, *nach* der Messung hat B jedoch eine bestimmte Geschwindigkeit.

Das ist es also, was *Verschränkung* oder *nichtlokaler Zusammenhang* oder auch *Fernwirkung* genannt wird: Die Messung an A verändert den Zustand von B, und zwar unabhängig davon, wie weit sich B schon von A entfernt hat.

Man kann nun mit Einstein, Podolsky und Rosen folgendermaßen argumentieren (*Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?* Phys. Rev. 47, 777, 1935):

B ist von A beliebig weit entfernt. Die Messung der Geschwindigkeit von A kann daher keinen Einfluss auf B haben. Wenn also *nach* der Messung der Geschwindigkeit von A auch die von B gegeben ist, dann muss das Ergebnis der Messung von B schon *vor* der Messung von A festgestanden haben. Da aber die quantenmechanische Beschreibung diese Geschwindigkeit nicht enthält, ist sie *unvollständig*. (Die Geschwindigkeit wäre in diesem Fall ein sogenannter *verborgener Parameter*.)

Zweifellos eine plausible Annahme! Genau diese EPR-Annahme, dass das Messergebnis an B schon vor der Messung an A feststeht, weil es einer *objektiv existierenden Eigenschaft* eines Einzelsystems (hier eines Teilchens) entspricht, ist jedoch eine notwendige und hinreichende Bedingung für die Ableitung der Bellschen Ungleichung, aus der wiederum folgt, dass keine *lokale* Beschreibung der Welt möglich ist, die mit den – experimentell überprüften – Voraussagen der Quantenmechanik übereinstimmt. Das Argument, mit dem EPR die Unvollständigkeit der Quantenmechanik zeigen wollten, dient also schließlich dazu, ihre eigene Intention, die Welt auf lokale und objektive Weise zu beschreiben, ad absurdum zu führen.

Die Verschränkung muss daher tatsächlich als *nichtlokaler Zusammenhang* aufgefasst werden. Anscheinend sind wir gezwungen, uns mit der Nichtlokalität der Welt abzufinden. Dies ist jedenfalls der gegenwärtige Stand der Dinge.

Die Diskussion um diesen seltsamen Sachverhalt dauert bis heute an. Letztlich scheint aber Niels Bohr recht zu behalten, der 1930 meinte: "Nichts ist ein Ereignis, bevor es gemessen wird."

Dazu ein jüngeres Zitat, zufällig aus Tausenden ausgewählt: "Your entire life is an ILLUSION: New test backs up theory that the world doesn't exist until we look at it.

- Quantum mechanics states reality doesn't exist until it's measured
- This means a particle's past behaviour changes based on what we see"

(DailyMail, 2 June 2015, <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3107996/Our-entire-lives-ILLUSION-New-test-backs-theory-reality-doesn-t-exist-look-it.html>)

Man könnte mit solchen und ähnlichen Behauptungen ganze Bibliotheken füllen. Die einzige Aussage, die mir des Zitierens wert scheint, stammt aber vom Erfinder des Beweises der Nichtlokalität, John Bell, selbst:

"The discomfort that I feel is associated with the fact that the observed perfect quantum correlations seem to demand something like the "genetic" hypothesis. For me, it is so reasonable to assume that the photons in those experiments carry with them programs, which have been correlated in advance, telling them how to behave. This is so rational that I think that when Einstein saw that, and the others refused to see it, he was the rational man. The other people, although history has justified them, were burying their heads in the sand. I feel that Einstein's intellectual superiority over Bohr, in this instance, was enormous; a vast gulf between the man who saw clearly what was needed, and the obscurantist. So for me, it is a pity that Einstein's idea doesn't work. The reasonable thing just doesn't work."

(John Stewart Bell, quoted in Quantum Profiles by Jeremy Bernstein [Princeton University Press, 1991, p. 84])

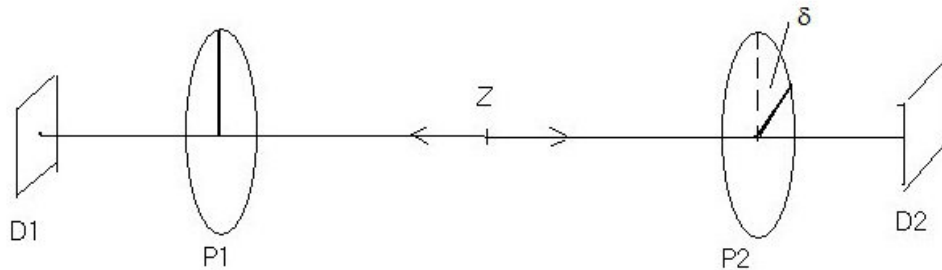
Bell hat also intensiv bedauert, dass die Dinge sich nicht so vernünftig verhalten, wie Einstein annahm – obwohl er ihn ja selbst widerlegt hat. Glücklicherweise lässt sich aber zeigen, dass sie sich *doch* vernünftig verhalten, wenn auch nicht auf die naheliegende Weise wie in der Arbeit von Einstein, Podolsky und Rosen vermutet. Wie beim Doppelspaltexperiment sieht man sich durch die *eigentliche* Erklärung zwar zu fundamentalen Änderungen im Verständnis der Wirklichkeit gezwungen, aber andererseits ist die Lösung des Rätsels zuletzt doch ganz einfach.

Ich werde wie beim Doppelspaltexperiment vorgehen: Zunächst werde ich ein Verschränkungsszenario für Messungen von Photonenpolarisationen in der üblichen Betrachtungsweise skizzieren. Dazu werde ich eine einfache Variante der Bellschen Ungleichung für dieses Szenario vorstellen.

Danach werde ich dasselbe Verschränkungsszenario so beschreiben, wie es sich gemäß den Modellannahmen zeigt, die wir der Aufklärung des Doppelspaltexperiments zugrunde gelegt haben. Es wird sich herausstellen, dass der Bellsche Beweis unter dieser Voraussetzung nicht durchführbar ist.

Zuletzt werde ich zeigen, wie die quantenmechanischen Resultate auf lokale Weise berechnet werden können. Dafür wird ein wenig Mathematik unerlässlich sein; ich werde mich aber auf das Notwendigste beschränken. (Im Grunde genügt es aber eigentlich, den Bellschen Beweis zu widerlegen. Wenn er fällt, ist der Weg für lokale Darstellungen ohnehin offen.)

Zunächst also das Szenario in der üblichen Beschreibung:



In Z werden nacheinander Paare von Photonen erzeugt. P_1 und P_2 sind Polarisatoren, D_1 und D_2 Photonendetektoren. Die Ebene des rechten Polarisators P_2 ist um den Winkel δ gegenüber der Ebene des linken Polarisators P_1 verdreht.

Vor der Messung haben die Photonen *keine* bestimmte Polarisation – alle Polarisationsrichtungen sind gleich wahrscheinlich. Die Messwerte hängen jedoch zusammen: die gemessenen Polarisationsrichtungen der beiden Photonen sind stets zueinander rechtwinklig. (Das ist die Verschränkungsbedingung.)

Wie wird die Polarisation gemessen? Einfach dadurch, dass ein Photon detektiert (bzw. nicht detektiert) wird. Um den Detektor zu erreichen (bzw. nicht zu erreichen), muss das Photon den Polarisator durchquert (bzw. nicht durchquert) haben, und das bedeutet: seine Polarisationsrichtung ist parallel (bzw. normal) zur Ausrichtung des Polarisators.

Wird die Polarisation eines Photons, sagen wir: des linken, gemessen, dann ist auch die Polarisation des rechten gegeben: Wenn das linke Photon im Detektor erscheint, dann ist seine Polarisation parallel zur Richtung des linken Polarisators; Dann steht auch ohne Messung fest,

dass die Polarisation des rechten normal zu dieser Richtung ist. Es wird dann mit der Wahrscheinlichkeit $\cos^2(90 - \delta)$ den rechten Polarisator passieren – oder, um es genauer zu sagen: *passiert haben*; Unsere Messung an dem einen Photon entscheidet also nicht nur über die Gegenwart, sondern auch über die Vergangenheit des anderen Photons.

(Wie bei Transversalwellen jeder beliebigen Art geht auch bei Licht nicht die ganze Welle durch den Polarisator, sondern bloß die Amplitude mal dem Kosinus des Winkels zwischen der Polarisationsrichtung der Welle und der Ausrichtung des Polarisators. In der üblichen Interpretation handelt es sich im Fall von Licht aber nicht um die Amplitude einer wirklich existierenden Welle, sondern bloß um die Wurzel der Durchgangswahrscheinlichkeit des Photons.)

Das ist der Ausgangspunkt des EPR-Arguments: In der quantenmechanischen Beschreibung liegt das rechte Photon nach der Messung des linken in einem anderen Zustand vor als vor dieser Messung. Da aber auszuschließen ist, dass die Messung am linken Photon den Zustand des – beliebig weit entfernten – rechten Photons *tatsächlich* geändert haben könnte, muss angenommen werden, dass die Polarisation des rechten Photons schon vor der Messung existierte. Vor der Messung gibt es aber der Quantenmechanik zufolge keine bestimmte Polarisation, also ist nach EPR die Quantenmechanik unvollständig.

Nehmen wir an, EPR hätten recht: beide Photonen haben schon vor der Messung eine bestimmte Polarisation. Unter dieser Voraussetzung lässt sich der Bellsche Beweis durchführen. Das soll nun an einer für unser Beispiel adaptierten Variante der Bellschen Ungleichung demonstriert werden (nach Bernard d'Espagnat 1979), die keine mathematischen Kenntnisse erfordert, sondern nur auf logischen Schlussfolgerungen aufbaut.

Sei x der Winkel des linken, z der Winkel des rechten Polarisators. $N(x|z)$ sei die Zahl der Fälle, in denen bei N Messungen beide Detektoren ansprechen.

Wir wissen, dass die Polarisationsrichtungen der beiden Photonen immer zueinander rechtwinklig sind. Daraus folgt: Wenn beide Polarisatoren auf *denselben* Winkel eingestellt sind, dann gehen niemals beide Photonen eines Paares durch, sondern immer nur *entweder* das linke *oder* das rechte. Daher kann $N(x|z)$ unterteilt werden in $N(x,y|z)$ (das ist die Zahl jener Photonen aus $N(x|z)$, die auch bei einem weiteren Winkel y *links* durchgehen *würden*) und

$N(x|y,z)$ (die Zahl der Photonen aus $N(x|z)$, die bei demselben Winkel y *rechts* durchgehen *würden*):

$$N(x|z) = N(x,y|z) + N(x|y,z)$$

(Dies ist der Punkt, an dem die EPR-Annahme eingeht, dass die Objekte (Photonen) voneinander getrennt sind und ihre Eigenschaften schon vor der Messung haben. Wenn die Objekte verschränkt sind, dann sind die obigen Schlüsse unzulässig; Durch die EPR-Annahme ist es aber möglich, Aussagen darüber zu machen, was bei der Einstellung der Polarisatoren auf den Winkel y der Fall wäre, wenn dieselben Photonenpaare unterwegs wären wie bei der Messung mit den Winkeln x und z .)

Es gilt sicher $N(x,y|z) \leq N(y|z)$, da die Zahl der Photonen, die bei y durchgehen, nicht kleiner sein kann als die Zahl der Photonen, die sowohl bei y als auch bei x durchgehen. Ebenso gilt $N(x|y,z) \leq N(x|y)$.

Damit folgt aus der obigen Gleichung die Bellsche Ungleichung:

$$N(x|z) \leq N(x|y) + N(y|z)$$

Die Anzahl der Photonen, die bei den jeweiligen Winkeln durchgehen, kann hier durch die Wahrscheinlichkeit des Durchgangs ersetzt werden:

$$W(x|z) \leq W(x|y) + W(y|z)$$

Diese Ungleichung lässt sich nun durch eine konkrete quantenmechanische Voraussage überprüfen. Die quantenmechanisch errechnete Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens von Photonen in beiden Detektoren hängt nur vom Winkel δ ab, und es gilt:

$$W(\delta) = (1/2) \sin^2 \delta$$

Der Winkel δ ist der Differenzwinkel zwischen den Winkeln der beiden Polarisatoren, also gilt:

$$W(x|z) = (1/2) \sin^2(z - x)$$

$$W(x|y) = (1/2) \sin^2(y - x)$$

$$W(y|z) = (1/2) \sin^2(z - y)$$

Rechnet man diese Wahrscheinlichkeiten für die Winkel $x = 0^\circ$, $y = 22,5^\circ$, $z = 45^\circ$ aus und setzt sie in die Bellsche Ungleichung

$$W(x|z) \leq W(x|y) + W(y|z)$$

ein, dann erhält man

$$0,5 \leq 0,1464 + 0,1464$$

$$0,5 \leq 0,293$$

– und das ist offensichtlich falsch. Die Bellsche Ungleichung steht also im Widerspruch zur Quantenmechanik. Experimente bestätigen die Quantenmechanik.

Wie oben ersichtlich, gehen aber in die Ableitung der Bellschen Ungleichung – außer Logik und Mathematik, deren Richtigkeit vorausgesetzt ist – nur zwei Annahmen ein: Die Verschränkungsbedingung (die Polarisationsrichtungen der beiden Photonen sind zueinander rechtwinklig, also wird bei gleichem Polarisatorwinkel links und rechts stets *entweder* links *oder* rechts ein Photon detektiert) und die EPR-Annahme. Die Gültigkeit der Verschränkungsbedingung ist experimentell erwiesen. Somit folgt aus der Falschheit der Ungleichung die Falschheit der EPR-Annahme, und das heißt:

Vor der Messung der Polarisation des einen Photons hat das andere Photon keine bestimmte Polarisation. Nach dieser Messung hat es eine Polarisation. Das bedeutet: Die Messung des einen Photons bewirkt eine Zustandsänderung des anderen; Es gibt tatsächlich einen nichtlokalen Zusammenhang.

Soweit also der allgemein als verbindlich aufgefasste Beweis.

Er ist jedoch falsch, weil er auf falschen Voraussetzungen beruht. Ich werde zeigen: Was bei einem Verschränkungsszenario tatsächlich vorgeht, wird von diesem "Beweis" überhaupt nicht erfasst.

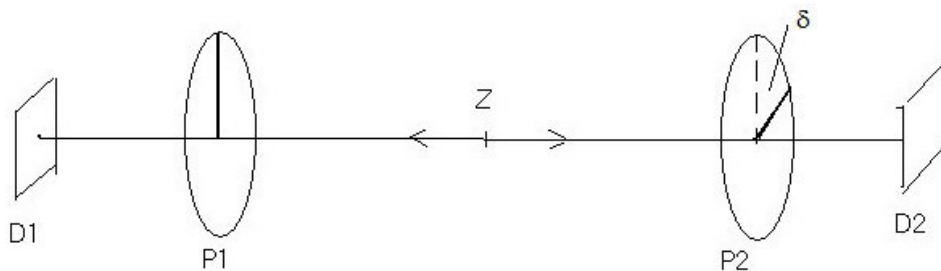
Da die Beschreibung des 2-Photonen-Szenarios mehr Raum eingenommen hat als ursprünglich geplant, muss ich die lokale und objektive Beschreibung dessen, was wirklich geschieht, auf nächstes Mal verschieben. (Schon wieder ein Cliffhanger...)

Zni Kiprot (Replikant, Serie Nexus 11)

Quantenmechanik 4

Nun kommen wir endlich zur Beschreibung dessen, was bei Messungen an verschränkten Photonen *wirklich* geschieht; Die Beschreibung ist *objektiv und lokal*.

P_1 und P_2 sind Polarisatoren, D_1 und D_2 Photonendetektoren. Die Ebene des rechten Polarisators P_2 ist um den Winkel δ gegenüber der Ebene des linken Polarisators P_1 verdreht.



Zur Erinnerung die Standardinterpretation: In Z werden nacheinander Paare von Photonen erzeugt. *Vor* der Messung haben die Photonen *keine* bestimmte Polarisation – alle Polarisations-

richtungen sind gleich wahrscheinlich. Die Messwerte hängen jedoch zusammen: die gemessenen Polarisationsrichtungen der beiden Photonen sind stets zueinander rechtwinklig.

Jetzt die lokale Interpretation. Wir benötigen unsere Teilchendefinition aus der Erklärung des Doppelspaltexperiments:

Teilchen sind Schwingungsbereiche stehender Wellen bzw. Übergänge zwischen verschiedenen möglichen Zuständen stehender Wellen.

Außerdem gehen wir wieder von folgender Annahme aus:

Die unstetige Änderung des lokalen Schwingungszustands, die sich als Messergebnis präsentiert, wird durch einen stetigen Prozess verursacht – durch Wellen, deren Amplitudenquadrate sich summieren, bis es zu einem Übergang kommt.

Was hier für die *Messung* eines "Teilchens" angenommen wird, gilt ebenso für seine *Erzeugung*:

Die Erzeugung eines "Photons" ist ein stetiger Prozess der Abstrahlung von Lichtwellen, bis es zu einem Übergang kommt: Der lokale räumliche Schwingungszustand "springt" in einen anderen stabilen Zustand mit niedrigerer Frequenz – eben genau so, wie das bei stehenden Wellen immer der Fall ist.

Wenden wir uns wieder dem Verschränkungsszenario zu. Aus unserer Sicht ereignet sich Folgendes:

*In Z werden keine zueinander rechtwinklig polarisierten *Photonenpaare* erzeugt, sondern *Paare von Lichtwellen*, die zueinander rechtwinklig polarisiert sind. Diese Lichtwellen durchqueren die Polarisatoren, wobei ihre Amplituden – wie das bei Wellen immer geschieht – um den Faktor $\cos\alpha$ verringert werden (wo α der Winkel zwischen der Schwingungsebene des Lichts und der Ausrichtung des Polarisators ist).*

Dann erreichen die Lichtwellen die Detektoren. Dort dringen sie ein und überlagern sich den Elektron-Wellen, solange, bis die Akkumulation ihrer Intensitäten ausreicht, um einen Übergang

des lokalen räumlichen Schwingungszustandes – der stehenden Welle, die üblicherweise als "Elektronenhülle" aufgefasst wird – zu erzwingen.

Erst durch diesen Übergang wird also die stetige Lichtwelle "diskretisiert", erst hier wird die Welle zum "Teilchen" – aber natürlich nur scheinbar, nur für den Beobachter, für den der stetige Prozess unsichtbar bleibt und erst der Übergang zu erkennbaren Folgen führt.

Tatsächlich gab es weder vorher ein Teilchen, noch ist beim Übergang ein Teilchen entstanden, sondern die laufende Lichtwelle ist nun einfach ein Teil der stehenden Elektron-Welle geworden.

Hier eine kurze Liste der grundsätzlichen Unterschiede der beiden Interpretationen:

Es gibt keine Photonen, die die Polarisatoren durchqueren oder nicht durchqueren, sondern Wellen, die teilweise durchgehen.

Diese teilweise durchgegangenen Wellen erzeugen dann keineswegs *ein* Photon oder *kein* Photon, sondern sie summieren sich und führen dadurch zu dem Übergang, der "Photon" genannt wird.

Was bedeutet es also in diesem Modell, dass ein Photon mit einer bestimmten Polarisation gemessen wird? Es bedeutet: Durch die Wellen, die einen auf genau diesen Winkel eingestellten Polarisator passiert haben, wird ein Übergang verursacht. Diesem Übergang, d.h. dem "Photon", kann dann die Eigenschaft "Polarisation in dieser Richtung" zugeschrieben werden. Nur in diesem Sinn kann also hier von der Eigenschaft "Polarisation des gemessenen Photons" gesprochen werden.

Wie beim Doppelspaltexperiment ist auch hier keine Zuordnung

(erzeugtes Photon) \Leftrightarrow (detektiertes Photon)

möglich. Die beiden sind nicht identisch. Vielmehr gilt: Nur *ein Teil* der gerade durchgegangenen Lichtwelle trägt zum nachfolgenden Übergang bei. Die anderen Anteile werden *später* zu Übergängen beitragen, und das bedeutet: jeder detektierte Übergang wird von

mehreren, zu verschiedenen Zeitpunkten erzeugten und teilweise durchgegangenen Wellen verursacht.

Das also ist es, was beim Versuch mit verschränkten Photonen *wirklich* geschieht. Wie angekündigt, ist auch sofort ersichtlich, dass hier der Bellsche Beweis nicht anwendbar ist. Folgendermaßen:

In der üblichen Interpretation geht das Photon durch den Polarisator durch oder nicht, und dann wird es detektiert oder nicht. Damit ist der physikalische Prozess der Messung abgeschlossen, und der nächste Messprozess beginnt *unter identischen Voraussetzungen*.

In unserer lokalen Interpretation werden aber die Wellen als *wirklich existierend* aufgefasst. Die Amplituden $\cos\alpha$ verschwinden also nicht, wenn das "Photon" nicht detektiert wird, sondern sie existieren weiterhin, d.h. sie haben *tatsächlich* den Polarisator durchquert und danach den Detektor erreicht. Dort verursachen sie *später* einen Übergang – aber nicht allein, sondern sie liefern nur einen Beitrag zu einem solchen Übergang.

Es gilt also:

Teile durchgegangener Wellen, die zunächst keinen Übergang verursachen, verbleiben im Detektor und tragen später zu Übergängen bei.

Das ist der entscheidende Punkt, denn das bedeutet:

Die Entstehung von Übergängen – also die Detektion von Photonen – hängt nicht nur von den Wellen ab, die soeben durch den Polarisator durchgegangen sind, sondern auch von den Wellen, die sich schon im Detektor befinden und *noch nicht* zu Übergängen geführt haben.

Der Bellsche Beweis setzt jedoch voraus, dass das Messergebnis ausschließlich von den Eigenschaften des Messobjekts abhängt.

Bell schreibt dazu Folgendes (John Stewart Bell, *On the Einstein Podolsky Rosen Paradox*, Physics, 1, 195-200, 1964):

"Since the initial quantum mechanical wave function does not determine the result of an individual measurement, this predetermination implies the possibility of a more complete specification of the state. Let this more complete specification be effected by means of parameters λ . It is a matter of indifference in the following whether λ denotes a single variable or a set, or even a set of functions, and whether the variables are discrete or continuous. However, we write as if λ were a single continuous parameter."

Der Begriff "Eigenschaft" wird also verallgemeinert, aber das entscheidende Merkmal bleibt bestehen: **Der Parameter λ ist mit dem Messereignis fest verbunden, genauso, wie es bei einer Objekteigenschaft der Fall ist.**

Das heißt: **Die Messung, die mit diesem Objekt durchgeführt wird, ist beliebig oft wiederholbar, und es können beliebige *andere* Messungen mit dem Objekt durchgeführt werden. Das Objekt wird sich aufgrund des Parameters λ immer entsprechend der Voraussage verhalten.**

Vergleichen wir diese Annahme mit den Messereignissen in unserem lokalen Modell: Wie oben festgestellt, ist hier das Messergebnis nicht nur von den Wellen abhängig, die soeben den Polarisator durchquert haben, sondern auch von den Wellen, die sich schon im Polarisator befinden und aus früheren Abstrahlungsprozessen stammen. Die Polarisationsrichtungen dieser Wellen sind jedoch zufällig, sodass die Ausgangsbedingungen jeder Messung verschieden sind.

Es gibt somit keinen mit dem Objekt fest verbundenen Parameter λ , der für sich allein das Resultat der Messung verursacht, die beliebig wiederholbar ist. Vielmehr ist jedes Ereignis Teil einer *unwiederholbaren Mess-Serie*.

Es ist unmöglich, vom Ergebnis irgendeiner Messung auf das Ergebnis einer weiteren Messung *an denselben Objekten* zu schließen: bei dieser weiteren Messung werden sich in jedem Fall die Wellen, die sich schon im Detektor befinden, von denen unterscheiden, die sich bei der ersten Messung im Detektor befanden. Damit unterscheiden sich aber die Ausgangsbedingungen dieser Messung von denen der ersten Messung, und es sind keine Aussagen darüber möglich, was das Resultat dieser weiteren Messung sein wird.

Wie ist es dann überhaupt möglich, dass die Verschränkungsbedingung eingehalten wird? Die Antwort ist: jede Messung ist Teil einer Mess-Serie und/oder folgt einer Phase der Präparation.

Dadurch entwickelt sich ein symmetrischer Zustand beider Detektoren. (Tatsächlich ist es auf Basis der Annahmen des lokalen Modells einfach, die quantenmechanischen Resultate zu rekonstruieren. Ich werde darauf später zurückkommen.)

Mit dem obigen rot hervorgehobenen Absatz ist alles gesagt, was zur Widerlegung des Bellschen Beweises erforderlich ist. Die Schwierigkeit, die Voraussetzungen des Beweises mit denen des lokalen Modells zu vergleichen, ist von der Art, die Thomas Kuhn in seinem Buch "The Structure of Scientific Revolutions" beschrieben hat: Das Paradigma, das der Standardinterpretation zugrunde liegt, ist mit dem Paradigma der lokalen Interpretation logisch kaum vergleichbar, weil die Begriffe, auf denen die beiden Paradigmen beruhen, unterschiedliche Bedeutungen haben.

Im Verschränkungsszenario trifft das auf die Begriffe *Objekt*, *Ereignis*, *Photon*, *Photonenpolarisation*, *Wahrscheinlichkeit* (in der Standardinterpretation ist es eine sogenannte "objektive", in der lokalen Interpretation hingegen eine normale Wahrscheinlichkeit) und auf zahlreiche andere zu. Im Grunde führt die Umstellung der Interpretation der Verschränkung schließlich zu einer Änderung des gesamten physikalischen Begriffsnetzes.

Was den Bellschen Beweis betrifft, lässt sich also mit Recht behaupten, dass er von Dingen handelt, die es nicht gibt. Mit anderen Worten: *kein einziger Schritt des Beweises ist gerechtfertigt*. Um das zu verdeutlichen, betrachten wir nochmals denjenigen Schritt (in der Variante von Bernard d'Espagnat aus dem vorigen Beitrag), in den die Verschränkungsbedingung eingeht. Ich wiederhole die ganze Textpassage:

Sei x der Winkel des linken, z der Winkel des rechten Polarisators. $N(x|z)$ sei die Zahl der Fälle, in denen bei N Messungen beide Detektoren ansprechen.

Wir wissen, dass die Polarisationsrichtungen der beiden Photonen immer zueinander rechtwinklig sind. Daraus folgt: Wenn beide Polarisatoren auf *denselben* Winkel eingestellt sind, dann gehen niemals beide Photonen eines Paares durch, sondern immer nur *entweder* das linke *oder* das rechte. Daher kann $N(x|z)$ unterteilt werden in $N(x,y|z)$ (das ist die Zahl derjenigen Photonen aus $N(x|z)$, die auch bei einem weiteren Winkel y *links* durchgehen *würden*) und $N(x|y,z)$ (die Zahl der Photonen aus $N(x|z)$, die bei demselben Winkel y *rechts* durchgehen *würden*):

$$N(x|z) = N(x,y|z) + N(x|y,z)$$

Im lokalen Modell ist dieser Schritt unzulässig: $N(x|z)$ kann nicht auf diese Weise unterteilt werden. Um das einzusehen, überlegen wir uns folgendes Gedankenexperiment:

Nehmen wir an, wir hätten zwei parallel laufende Mess-Serien A und B. Bei der Serie A sind die Polarisatoren auf die Winkel x und z eingestellt, bei der Serie B sind beide Polarisatoren auf den Winkel y ausgerichtet. Außerdem nehmen wir an, dass in Serie A *dieselben Paare von Lichtwellen* erzeugt werden wie in Serie B.

Alles verläuft wie erwartet – nach einer kurzen Vorbereitungsphase entsprechen die Ereignisse den Voraussagen. Zu irgendeinem Zeitpunkt, sagen wir: nach dem neunundneunzigsten Ereignispaar, richten wir die beiden Polarisatoren der Serie A auf den Winkel y aus.

Wäre die Voraussetzung des Bellschen Beweises erfüllt, dann müsste nun in der Serie A beim hundertsten Ereignispaar *entweder* links *oder* rechts ein Photon auftreten. Bei der Serie B ist das auch sicher der Fall, und – entsprechend unserer Annahme – treffen ja bei der hundertsten Messung in beiden Serien *dieselben* Wellen auf die Detektoren.

Nun ist aber, anders als im Bellschen Beweis angenommen, das Ergebnis der hundertsten Messung in Serie A nicht nur von den Wellen abhängig, die gerade die Polarisatoren durchquert haben, sondern auch von den Wellen, die sich schon in den Detektoren befinden, und das sind mit Sicherheit *nicht* dieselben Wellen wie bei der Serie B.

Deshalb ist der Schluss von B auf A unzulässig: aus der Tatsache, dass in beiden Serien dieselben Objekte (Wellen) gemessen werden, kann nicht geschlossen werden, dass auch die Resultate identisch sind; Die Annahme, dass bei der hundertsten Messung in A beim Winkel y nun *entweder* rechts *oder* links ein Photon erscheint, ist nicht gerechtfertigt. Zwar muss die Verschränkungsbedingung auch im lokalen Modell eingehalten werden (dass beide "Photonen" rechtwinklig zueinander polarisiert sind), aber das ist eben nur im Verlauf einer ganzen Mess-Serie der Fall, und nicht bei einem einzelnen *unvorbereiteten* Ereignis.

Stattdessen müsste eine kurze Zeitspanne abgewartet werden, bis in der Serie A bei den veränderten Winkeln der Polarisatoren die Symmetrie beider Detektoren hergestellt wäre, die

für die Einhaltung der Verschränkungsbedingung erforderlich ist, und *erst danach* würde auch in Serie A bei jeder Messung genau *ein* Photon detektiert werden. (Das ist auch in der Standardinterpretation der Fall: auch hier würde nach der Änderung der Winkel der Polarisatoren eine neue Mess-Serie beginnen, und erst nach einer gewissen Zeitspanne würden die Messergebnisse den Voraussagen entsprechen. Die quantenmechanischen Voraussagen sind eben nur Wahrscheinlichkeitsvoraussagen.)

Es ist also klar, dass $N(x|z)$ im lokalen Modell nicht auf die für den Beweis erforderliche Weise unterteilt werden kann. Die weiteren Schlussfolgerungen sind damit hinfällig. Der Bellsche Beweis ist nicht durchführbar.

Es sollte erwähnt werden, dass auch Einstein, Podolsky und Rosen unrecht hatten: Dass wir nach der Polarisationsmessung auf einer Seite das Ergebnis der Polarisationsmessung auf der anderen Seite voraussagen können, ist eine Folge der bei der Präparation und der Ausführung des Versuchs entstehenden Symmetrie beider Seiten, und nicht, wie EPR irrtümlich annahmen, eine Folge davon, dass das "Teilchen" diese Polarisation schon vorher hatte. Vor der Messung gab es kein Teilchen und daher auch keine Photonenpolarisation.

Daher ist auch das EPR-Realitätskriterium ungeeignet. Es lautet: "Wenn wir, ohne auf irgendeine Weise ein System zu stören, den Wert einer physikalischen Größe mit Sicherheit [...] voraussagen können, dann gibt es ein Element der physikalischen Realität, das dieser physikalischen Größe entspricht."

Im lokalen Modell trifft das nicht zu. Wie soeben festgestellt, gibt es vor der Messung keine Photonenpolarisation. Sie *entsteht* erst durch den Messprozess: durch die Akkumulation der Wellen, die sich schon vorher im Detektor befanden, und der Wellen, die soeben den Polarisator durchquert haben.

Nächstes Mal werde ich zeigen, wie sich die quantenmechanischen Voraussagen für Messungen an verschränkten Photonen auf lokale Weise berechnen lassen.

Zni Kiprot (Replikant, Serie Nexus 11)

Quantenmechanik 5

Im vorigen Beitrag habe ich für Messungen an verschränkten Photonen ein lokales und objektives Modell präsentiert und gezeigt, dass die Bellsche Ungleichung in diesem Modell nicht anwendbar ist. Damit ist der Hauptteil der Wiederherstellung der Lokalität und Objektivität in diesem Szenario erledigt. Diesmal soll demonstriert werden, wie die quantenmechanischen Voraussagen auf lokale Weise berechnet werden können.

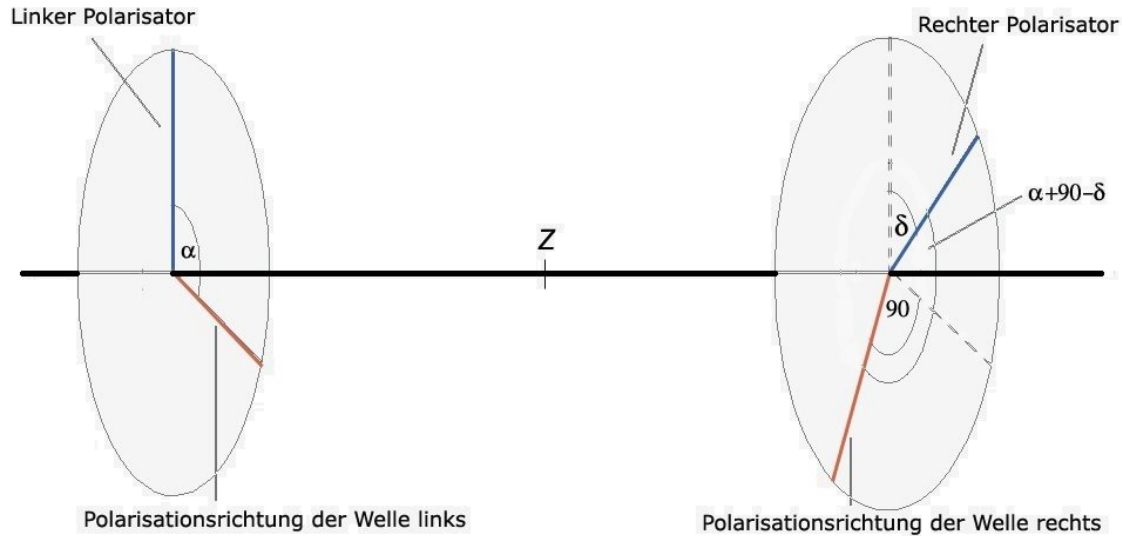
Warum ist es überhaupt nötig, ein solches Rechenverfahren anzugeben, wenn doch schon gezeigt worden ist, dass der von der Quantenmechanik beschriebene Prozess lokal ist? – Das liegt daran, dass der quantenmechanische Formalismus die Reduktion der Wellenfunktion zwar *voraussetzt*, aber nicht *beschreibt*. Das ist aber genau das nichtlokale Element.

Es gibt nun zwei Möglichkeiten: Die erste Möglichkeit ist, den quantenmechanischen Formalismus selbst realistisch zu interpretieren. Das erfordert jedoch einige Erweiterungen des Modells und ausgedehnte Rechnungen, was den Rahmen dieses Blogs bei weitem übersteigt. Deshalb habe ich mich für die zweite Möglichkeit entschieden, die darin besteht, einfach den Bedingungen des lokalen Modells zu folgen und eine Funktion anzugeben, die die quantenmechanischen Voraussagen auf lokale und objektive Weise reproduziert – was gegenwärtig für unmöglich gehalten wird.

Tatsächlich bieten sich zahlreiche Funktionen an, die das Gewünschte leisten. Im Folgenden stelle ich die einfachste Variante vor.

Hier nochmals die Skizze des objektiven und lokalen Modells.

In Z werden Paare von Lichtwellen erzeugt, die zueinander rechtwinklig polarisiert sind. Die Lichtwellen durchqueren die Polarisatoren, gehen teilweise durch und treffen danach auf die Detektoren (die links und rechts außerhalb der Skizze liegen), wo sie infolge der Akkumulation ihrer Amplitudenquadrate *Übergänge* der lokalen stehenden Wellen (Elektronenhüllen) verursachen. Wie im vorigen Beitrag erklärt, werden diese Übergänge jedoch niemals allein durch die Wellen ausgelöst, die soeben auf den Detektor aufgetroffen sind, sondern immer nur in Verbindung mit Wellen, die sich schon *vorher* im Detektor befanden.



Der linke Polarisator sei auf den Winkel 0° eingestellt, der rechte auf den Winkel δ . α_i seien die zufälligen Polarisationsrichtungen der Wellen auf der linken Seite, $(\alpha_i + 90)$ daher die der Wellen rechts. Demnach sind die Winkel zwischen der Polarisationsrichtung der Wellen und der Richtung des Polarisators auf der linken Seite gleich α_i , auf der rechten Seite sind sie gleich $(\alpha_i + 90 - \delta)$.

Da das Modell *objektiv* ist, sind die Wellen *wirklich existierende Wellen* und nicht bloß Durchgangswahrscheinlichkeiten von Photonen, und da das Modell *lokal* ist, müssen die Ereignisse ausschließlich von den Wellen abhängen, die *tatsächlich* den jeweiligen Detektor erreichen.

Um die Amplituden der erzeugten Wellen brauchen wir uns nicht zu kümmern – wir setzen sie einfach gleich 1. Die Amplituden der Wellen, die den linken Polarisator durchqueren und auf den Detektor auftreffen, sind also $\cos\alpha_i$, die Amplituden der Wellen rechts $\cos(\alpha_i + 90 - \delta)$.

Die Akkumulation dieser Amplitudenquadrate verursacht die Übergänge (Photonen-Ereignisse) in den Detektoren. Wir haben daher zwei Zufallsfolgen von Amplitudenquadraten – links $\cos^2\alpha_i$, rechts $\cos^2(\alpha_i + 90 - \delta)$ –, die den Ausgangspunkt unserer Berechnung bilden.

Diese Folgen sind unsere Zufallsvariablen (n ist die Gesamtzahl der Ereignispaare, i ist der laufende Index):

$$X_i = \cos^2 \alpha_i \quad (1 \leq i \leq n)$$

$$Y_i = \cos^2(\alpha_i + 90 - \delta) \quad (1 \leq i \leq n)$$

Unser Ziel ist es, die Wahrscheinlichkeit von Photonen-Ereignissen in *einem* Detektor und die Wahrscheinlichkeit gleichzeitiger Photonen-Ereignisse in *beiden* Detektoren mittels dieser Zufallsvariablen auszudrücken.

Da die Zufallsvariablen die wirklich durchgegangenen Amplitudenquadrate sind, deren Summierung die Übergänge verursacht, muss der *Erwartungswert* E der Zufallsvariablen gleich der Wahrscheinlichkeit der Photonen-Ereignisse in *einem* Detektor sein. Es gilt

$$E(X) = E(Y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2 \alpha \, d\alpha = \frac{1}{2}$$

Die Zahl der Übergänge, die detektierten Photonen entsprechen, ist also halb so groß wie die Zahl der Übergänge, die erzeugten Photonen entsprechen. Das stimmt mit der quantenmechanischen Voraussage überein; somit gilt (W_L ist die Wahrscheinlichkeit von Photonen-Ereignissen im linken, W_R die von Photonen-Ereignissen im rechten Detektor)

$$w_L = w_R = E(X) = E(Y)$$

Um die Wahrscheinlichkeit gleichzeitiger Ereignisse zu bestimmen, ist der Erwartungswert allerdings nicht geeignet. Dafür benötigen wir eine statistische Funktion, die den Grad des Zusammenhangs zwischen den beiden Serien von Zufallsvariablen ausdrückt.

Diese Funktion ist die *Kovarianz* der beiden Serien von Zufallsvariablen. Es ist

$$\begin{aligned} \text{Cov}(X,Y) &= E[(X - E(X))(Y - E(Y))] = \\ &= \int_0^{2\pi} (\cos^2\alpha - 0.5)(\cos^2(\alpha + 90 - \delta) - 0.5) d\alpha \frac{1}{2\pi} = -\frac{1}{8} + \frac{1}{4} \cos^2(90 - \delta) \end{aligned}$$

Das Quadrat des Kosinus liegt im Intervall zwischen 0 und 1. Daher liegt die Kovarianz im Intervall zwischen $-1/8$ und $+1/8$.

Wenn die Kovarianz ihren größten *negativen* Wert annimmt, dann bedeutet das, dass der *Unterschied* zwischen den jeweiligen Amplitudenquadraten auf beiden Seiten im Mittel am größten ist. Wir erwarten also, dass bei demjenigen Winkel δ , bei dem das der Fall ist, die Wahrscheinlichkeit gleichzeitiger Photonen-Ereignisse auf beiden Seiten am Niedrigsten ist.

Wenn umgekehrt die Kovarianz ihren größten *positiven* Wert annimmt, dann ist die *Übereinstimmung* der beiden Serien am größten, und wir erwarten demnach, dass dann die Wahrscheinlichkeit gleichzeitiger Photonen-Ereignisse auf beiden Seiten ihren größten Wert hat. (Für den Winkel $\delta = 90^\circ$ sind die beiden Serien identisch, d.h. *alle* Ereignisse sind gleichzeitige Ereignisse; Daher muss ihre Wahrscheinlichkeit gleich $1/2$ sein.)

Um die Ereigniswahrscheinlichkeit durch die Kovarianz auszudrücken, müssen wir das Intervall $[-1/8, +1/8]$, in dem die Kovarianz liegt, auf das für die Wahrscheinlichkeit erforderliche Intervall $[0, 1/2]$ abbilden. Das erreichen wir, indem wir die Kovarianz mit 2 multiplizieren und $1/4$ addieren. Wir erhalten dann (W_{LR} ist die Wahrscheinlichkeit gleichzeitiger Photonen-Ereignisse):

$$W_{LR} = 2 * \text{Cov}(X,Y) + 1/4 = 1/2 \cos^2(90 - \delta) = 1/2 \sin^2\delta$$

Das entspricht der quantenmechanischen Voraussage.

Wir haben also unser angestrebtes Ziel erreicht:

Die Behauptung, dass die bei Messungen an verschränkten Photonen auftretenden Korrelationen durch keine lokale und objektive Beschreibung erfasst werden könnten, ist damit widerlegt.

Der entscheidende Punkt ist: Das durch die obige Gleichung ermittelte Resultat ist *lokal*.

Warum? – Das folgt daraus, dass die Zufallsvariablen selbst objektiv und lokal sind: es sind Amplitudenquadrate von Wellen, die von Z aus abgestrahlt werden, nach dem Durchqueren der Polarisatoren die Detektoren erreichen und dort Übergänge auslösen.

Die Kovarianz selbst ist nichts anderes als eine Formel, die den Grad des linearen Zusammenhangs zwischen zwei Reihen von Zufallsvariablen ausdrückt. Sie ist vollständig durch die beiden objektiven, lokalen Zufallsvariablen bestimmt, und es ist kein Platz für verborgene Nichtlokalität.

Die Behauptung der Nichtlokalität der obigen Gleichung ist also keine mögliche Position.

Wer dennoch weiterhin die Nichtlokalität der quantenmechanischen Voraussagen behaupten will, die mit den aus dieser Gleichung ermittelten übereinstimmen, dem verbleibt als einziger Ausweg, diese vollständige Übereinstimmung als *Zufall* aufzufassen.

Die Annahme der Zufälligkeit dieser Übereinstimmung erscheint allerdings aus drei Gründen wenig plausibel:

1. Die Bellsche Ungleichung kann nicht abgeleitet werden. Es kann also gar kein Grund mehr dafür angegeben werden, warum eine lokale Interpretation *nicht* möglich sein sollte.
2. Die obige Gleichung folgt auf einfache und einsichtige Weise aus den Annahmen des lokalen Modells.
3. Die Modellierung entspricht genau den allgemeinen Annahmen der lokalen und objektiven Interpretation der Quantentheorie.

Um zu ermitteln, wie schnell sich das durch die Kovarianz berechnete Resultat für W_{LR} dem Wert $1/2 \sin^2\delta$ annähert, habe ich einige Computersimulationen mit Paaren von Lichtwellen mit zufälligen, aber immer zueinander rechtwinkelig stehenden Polarisationsrichtungen durchgeführt.

Hier die Ergebnisse für 30, 100 und 1000 Paare von Zufallsvariablen und für einige charakteristische Winkel δ . Für $(2 * \text{Cov}(X,Y) + 1/4)$ sind jeweils drei Resultate angegeben. Ganz rechts der quantenmechanische Sollwert.

n = 30	delta	$2 * \text{Cov}(X,Y) + 1/4$			$1/2 \sin^2\delta$
	0	-0.010	0.006	0.020	0.
	22.5	0.039	0.075	0.111	0.073
	45	0.212	0.248	0.283	0.25
	67.5	0.407	0.421	0.436	0.427
	90	0.457	0.481	0.494	0.5
n = 100	delta	$2 * \text{Cov}(X,Y) + 1/4$			$1/2 \sin^2\delta$
	0	-0.012	0.000	-0.029	0.
	22.5	0.060	0.062	0.042	0.073
	45	0.243	0.228	0.234	0.25
	67.5	0.431	0.409	0.436	0.427
	90	0.498	0.497	0.529	0.5
n = 1000	delta	$2 * \text{Cov}(X,Y) + 1/4$			$1/2 \sin^2\delta$
	0	0.001	0.004	-0.011	0.
	22.5	0.073	0.070	0.066	0.073
	45	0.251	0.241	0.250	0.25
	67.5	0.431	0.417	0.434	0.427
	90	0.502	0.500	0.506	0.5

Damit ist die lokale und objektive Interpretation der Quantenmechanik abgeschlossen, soweit sie mir hier durchführbar schien. Ich hatte beabsichtigt, auf Mathematik ganz zu verzichten. Da aber die lokale Berechnung der Ereigniswahrscheinlichkeiten in Verschränkungsszenarien ein so zentraler Punkt in der Frage der Lokalität ist, bin ich diesmal ausnahmsweise von diesem Vorsatz abgewichen.

Wie könnte man den Übergang von der Standardinterpretation zur lokalen und objektiven Interpretation charakterisieren? Ich glaube, der wichtigste Punkt ist, dass man – wie schon bei der "dunklen Energie" und bei der speziellen Relativität – alle Absurditäten hinter sich lässt und stattdessen mit einer Reihe von Fragen konfrontiert ist. Ich halte das auch im Fall der Quantenmechanik nicht nur für einen vorteilhaften, sondern sogar für einen notwendigen Tausch. Absurditäten untergraben das Vertrauen in das Denken und führen schließlich zum vollständigen Verzicht auf Erklärungen. Fragen sind dagegen geeignet, die physikalische Forschung zu stimulieren und ihr eine Richtung zu geben.

Welche Fragen sind das? – Z.B. die Frage: *Was schwingt eigentlich in den Wellen der Quantenmechanik?* Ich kann das hier leider noch nicht beantworten, weil die Antwort eine ontologische Grundlegung der Physik erfordert. Man ist bei dieser Frage nahe am Grund der Dinge, und um dorthin zu gelangen, sind die Mittel der gegenwärtigen Physik – die sich ausschließlich auf Mathematik stützt – nicht ausreichend.

Das gilt ebenso für die Frage: *Was ist der quantenmechanische "Spin"?* Auch sie kann nur von der ontologischen Basis her beantwortet werden.

Eine weitere wichtige Frage ist: *Wie hängen die Wellenformen, die in der Quantenmechanik für die Attribute der Objekte stehen, mit diesen Attributen zusammen? Warum sind z.B. dem Drehimpuls Kugelflächenwellen zugeordnet?*

Ich weiß nicht, ob ich diese und viele weitere Fragen hier beantworten werde. Ich werde dieses Projekt nur so weit führen, als mich die Lust an dem Versuch trägt, physikalische und philosophische Grundfragen auf möglichst einfache Weise darzustellen. Ich bin allerdings schon jetzt ein wenig enttäuscht, weil es mir nicht so einfach gelingt, wie ich mir das vorgestellt hatte.

Am Ende meiner Ausführungen über Quantenmechanik gestatte ich mir ein abschließendes Lamento.

Was ist die Standardinterpretation quantenmechanischer Messprozesse bloß für eine Anhäufung intellektuellen Unrats: Nichtlokale Zusammenhänge, Wirkung in die Vergangenheit, Nichtexistenz der Wellen (die doch durch Interferenz beweisen, dass sie existieren), Verschwinden dieser Wellen über beliebig große Entfernungen...

Im Fall der Photonenverschränkung dürfen die Wellen, die durch die Polarisatoren durchgehen, abermals keine wirklichen Wellen sein – genau wie beim Doppelspaltexperiment. Was sind sie stattdessen? Wurzeln aus Wahrscheinlichkeiten. Gibt es eine abwegigere ontologische Hypothese als die Annahme von "interferierenden Wurzeln aus Wahrscheinlichkeiten"? Wohl kaum.

Oder die "Wirkung in die Vergangenheit". Wie bei vielen quantenmechanischen Messprozessen bestimmt die Messung auch hier nicht nur, was das Messobjekt *ist*, sondern auch, was es *war* – und es scheint, als könnte sich diese durch die Messung ausgewählte Vergangenheit beliebig weit in der Zeit zurück erstrecken.

Solche Behauptungen sind nicht nur für sich selbst schon verrückt, sie sind auch "Steilvorlagen" für Obskurantisten (um das schöne Wort zu gebrauchen, mit dem John Bell Niels Bohr charakterisiert hat) in allen weltanschaulichen Lagern, die dann zu wissen glauben, dass "Raum und Zeit nur Schein sind", "alles mit allem zusammenhängt", "nichts von uns unabhängig existiert", "das Bewusstsein erst die Wirklichkeit schafft", "unsere Begriffe nicht geeignet sind, die Wirklichkeit zu erfassen", und so weiter und so fort. Und all dieser Unfug stammt zwar nicht allein aus physikalischen Quellen, aber gesellschaftsfähig wird er erst dadurch, dass die physikalischen Interpretationen, auf die er sich bezieht und die als Basis unseres Weltverständnisses gelten, selbst zu esoterischen Manifesten verkommen sind.

Auch religiöser Irrationalismus kehrt wieder zurück. Wenn der Versuch, die Welt durch unseren Verstand zu erfassen, zu dermaßen absurden Behauptungen führt, wie sie in der Grundlagenphysik selbstverständlich geworden sind, dann erscheint es gerechtfertigt, auf andere Erklärungssysteme zurückzugreifen. Natürlich ist das falsch, weil *kein* Glaubensinhalt den Rang einer begründeten Hypothese beanspruchen kann, sondern in jedem Fall eine bloße Erfindung

ist. Aber das ändert nichts daran, dass der religiöse Irrationalismus wieder erstarkt und dass die Physik diesen Trend zumindest begünstigt.

Auch schon vor der Quantenmechanik gab die Geschichte ja wenig Anlass zur Freude über die menschliche Vernunft. Aber infolge der scheinbar unüberbrückbaren Kluft, die durch die Standardinterpretation der Quantenmechanik zwischen der Wirklichkeit und unserem Denken entstanden ist, wird unsere Beziehung zur Wirklichkeit von der Basis her durch irrationale Vorstellungen vergiftet. Auf vielen Wegen dringt diese Irrationalität ins Alltagsbewusstsein ein und überschwemmt alle kulturellen Bereiche. Zwar weiß niemand, wohin das führen wird, aber ich bezweifle, dass es ein Happy End geben kann.

Der extreme Unsinn, den die Standardinterpretation enthält, kann aufgrund jahrzehntelanger quantenmechanischer Gehirnwäsche von den Betroffenen nicht mehr als solcher erlebt werden. Es ist ihnen auch nicht im geringsten klar, dass dieser Unsinn das Potential hat, die Welt zu zerstören, weil er Teil der fundamentalen Welterklärung ist, und weil es in jeder Kultur einen notwendigen Zusammenhang zwischen der fundamentalen Welterklärung und dem Umgang mit der Welt gibt; Ist die Erklärung der Welt auf irrationale Weise entstellt, dann wird es auch der Umgang mit der Welt sein – und auch der mit uns selbst, denn wir sind Teil dieser Welt.

Sie wissen nicht, welchen Schaden sie anrichten. Sie wissen nicht, was sie tun.

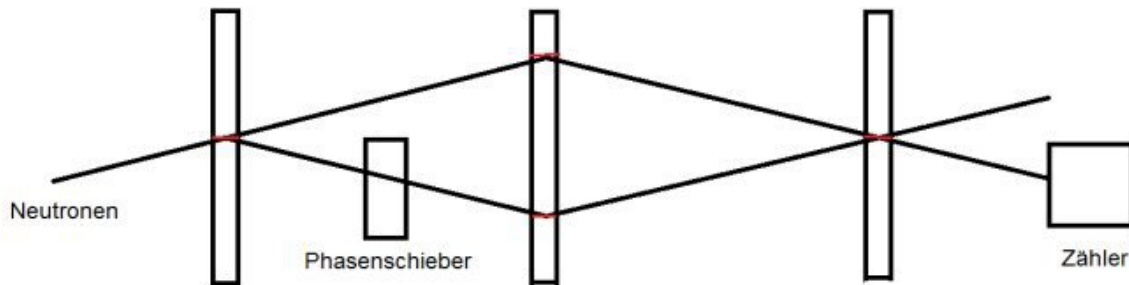
Ich muss abbrechen, weil mir sonst schlecht wird. (Auch Replikanten kennen Übelkeit.) Und ich halte es sogar für denkbar, dass dieser Wahnsinn letztlich nur durch einen evolutionären Schritt beseitigt werden kann. Vielleicht ist es ja aus biologischen Gründen unmöglich, Menschen zur Vernunft zu bringen, genauso wie es unmöglich ist, Affen Bogenschießen beizubringen.

Nächstes Mal werde ich kurz darauf eingehen, warum das Standardmodell der Teilchenphysik nicht richtig sein kann.

Zni Kiprot (Replikant, Serie Nexus 11)

Warum das Standardmodell falsch ist

In einem Neutroneninterferometer wird ein Neutronenstrahl in einer Silizium-Kristallschicht (durch teilweise Reflexion an den Netzebenen des Kristalls) in zwei Strahlen geteilt, die sich bis auf eine Distanz von einigen Zentimetern voneinander entfernen. Die beiden Strahlen werden durch Reflexion in einer zweiten Kristallschicht wieder zusammengeführt, so dass nach einer dritten Schicht Interferenz beobachtet werden kann. Die Intensität des Neutronenstrahls wird so gering gewählt, dass sich mit hoher Wahrscheinlichkeit jeweils nur ein Neutron im Interferometer befindet.



Die Neutronen können den Zähler auf zwei Wegen erreichen: auf dem einen Weg werden sie einmal reflektiert, auf dem anderen dreimal.

Wird in einen der beiden Strahlen ein Phasenschieber eingebracht, dann ändert sich die Interferenz der Strahlen an der dritten Kristallschicht. Das hat zur Folge, dass sich auch die Anzahl der pro Zeit detektierten Neutronen ändert.

Werter Leser! – Wären Sie ein politischer Gefangener, den ich nach jahrzehntelanger intensivster ideologischer Gehirnwäsche aus der Gefangenschaft befreit hätte, dann würde ich drei Finger hochhalten und Sie behutsam fragen, wie viele Finger ich hochhalte, um festzustellen, ob Ihr Denkvermögen noch für die einfachsten Leistungen ausreicht oder ob es unwiderruflich geschädigt ist.

Genauso behutsam frage ich Sie nun, wie es möglich ist, dass nach der dritten Kristallschicht *Interferenz* beobachtet wird. Würden Sie mir zustimmen, dass es dafür erforderlich ist, *dass in beiden Strahlen irgendetwas vorhanden ist?* Oder ist Ihr Denkvermögen durch jahrzehntelange quantenmechanische Gehirnwäsche soweit geschädigt, dass Sie das bezweifeln?

Ich stelle mich optimistisch und nehme einfach an, dass Ihnen klar ist, dass es zur Interferenz der beiden Strahlen nur kommen kann, wenn in beiden Strahlen etwas existiert, und dass es unsinnig wäre, das zu bestreiten.

Dann sind wir uns jedoch schon darüber einig, dass das Standardmodell falsch ist. Warum kann ich das behaupten? Aus folgendem Grund:

Eine zentrale Annahme des Standardmodells ist, dass Neutronen aus drei Quarks bestehen, zwischen denen die starke Kraft wirkt. Sie ist so beschaffen, dass sie mit der Entfernung nicht abnimmt. Deshalb können Quarks nicht voneinander getrennt werden.

Damit erhebt sich die Frage:

Im Neutroneninterferometer wird ein Neutronenstrahl, der nur aus einem einzigen Neutron besteht, in zwei Strahlen aufgespalten.

Wenn ein einzelnes Neutron geteilt wird – wo sind dann die Quarks?

Im Standardmodell kann diese Frage offensichtlich nicht beantwortet werden. Man kann sie bloß für unzulässig erklären, indem man behauptet, dass die beiden Strahlen *nicht existieren* – aber damit wird es wiederum unmöglich, zu beantworten, warum es zur Interferenz der beiden Strahlen kommt.

Die Situation ist also ausweglos. Wenn die Strahlen nicht existieren, dann kann es keine Interferenz geben, und wenn sie existieren, dann müssen drei Quarks unterwegs sein, die jedoch nicht geteilt werden können.

Die Auflösung des Widerspruchs ist einfach und zwingend:

Im Interferometer befindet sich ein einziges Neutron. Es gibt Interferenz. Somit muss in beiden Strahlen etwas existieren. Daraus folgt, dass die Darstellung der starken Kraft, der zufolge das Neutron aus drei Quarks besteht, die nicht voneinander getrennt werden können, falsch ist.

Die starke Kraft ist aber ein zentraler Baustein des Standardmodells. Und mehr als das: die Art ihrer mathematischen Beschreibung – das gruppentheoretische Verfahren ihrer Ableitung – ist eine Analogie und Erweiterung der Beschreibung der schwachen Kraft. Wenn also die Theorie der starken Wechselwirkung falsch ist, dann bricht das ganze Standardmodell zusammen. Es kann dann nicht mehr den Status einer fundamentalen Theorie beanspruchen, sondern bloß den Status einer rein formalen Näherung, vergleichbar dem bekannten Epizykelsystem, das einst der Beschreibung der Planetenbahnen diente.

Damit ist zugleich klar, dass auch alle Versuche, das Standardmodell weiter zu entwickeln, scheitern müssen.

Es wäre jedoch nicht fair, hier nicht auch die Gegenseite zu Wort kommen zu lassen.

(Das Folgende findet sich auf <http://www.forphys.de/Website/qm/gloss/g46a.html>)

"Unter Welle-Teilchen-Dualismus verstand man verschiedene Varianten der Vorstellung, dass Photonen oder Elektronen, je nach Experiment oder Situation, sich wie Wellen oder Teilchen 'verhalten' oder gar Wellen oder Teilchen 'seien'.

Seit Etablierung der Quantentheorie in den dreißiger Jahren musste aber die Fiktion aufgegeben werden, dass die Objekte der Quantenphysik klassisch (so oder so) zu beschreiben seien. Man kann seitdem keine scheinbaren Widersprüche mehr erkennen."

Aha. Man sagt also beim Doppelspaltversuch nicht mehr, dass eine "Welle" verschwindet und ein "Teilchen" erscheint, sondern man spricht von einem "Quantenobjekt", das sich auf genau diese Weise verhält, und damit sind alle Probleme gelöst.

Unlängst sah ich, wie eine Katze sich vor meinen Augen in Luft auflöste. Zuerst war ich verblüfft, aber dann erklärte mir ein freundlicher Herr, dass es eben keine normale Katze war – auch wenn sie genau so aussah und sich genau so verhielt – sondern ein schnarrschwänziger

Fludertiger, und für den sei das Verschwinden ganz normal. Ich dankte dem netten Herrn herzlich, denn nun begriff ich, dass das Problem, das ich mit dem Verschwinden der Katze gehabt hatte, nur ein Scheinproblem war.

"Einteilchen-Interferenz erwies sich als die Folge der Interferenz von klassisch denkbaren Möglichkeiten (für ein Teilchen), zwischen denen nicht unterschieden wird."

(Weiter unter <http://www.forphys.de/Website/qm/gloss/intfmoeg.html>)

"Interferenz in diesem Sinn bedeutet also nicht, dass irgendwelche konkreten realen Dinge (wie etwa Schallwellen) 'zusammenwirken' – Interferenz findet ja bereits mit einem Photon oder einem Elektron statt, das auf einen Doppelspalt gestrahlt wird –, auch nicht, dass sich die 'Materie' von irgendwelchen Wellen physisch irgendwie 'zusammenlegt' und so verstärkt oder auslöscht. Es geht um klassisch denkbare 'Möglichkeiten'!"

Hier wird einfach die Änderung des Begriffs als "Lösung" des ontologischen Problems ausgegeben: Es sind nicht etwa *Wellen*, die interferieren – nein, es handelt sich um "klassisch denkbare Möglichkeiten". Ach so, es sind klassisch denkbare Möglichkeiten! – Ja klar, die interferieren natürlich!

Die Äußerung: *"Interferenz findet ja bereits mit einem Photon oder einem Elektron statt"* zeigt auch deutlich, wie die Apologeten der Standardinterpretation daran scheitern, sich vom Teilchen-Begriff zu lösen. Sie haben ihn zwar quantenmechanisch "getunt", aber letztlich argumentieren sie doch, dass es keine wirkliche Welle sein kann, weil Interferenz eben schon bei *einem* Teilchen auftritt und nicht erst bei mehreren. Die einzige wirkliche Lösung des Problems, dass *das Teilchen die Welle ist*, kommt ihnen einfach nicht in den Sinn.

Die Erklärung, was bei der Neutroneninterferometrie wirklich vorgeht, ist genauso schlicht und selbstverständlich wie beim Doppelspaltexperiment und bei der Photonenverschränkung – oder sagen wir besser: es ist *dieselbe* Erklärung:

Das Neutron ist Teil einer *stehenden Wellenstruktur*. Wenn es *erzeugt* wird, löst es sich aus dieser Struktur und wird zur *laufenden Welle* – die sich im Neutroneninterferometer in jeder

Hinsicht als solche verhält. Wenn das Neutron *detektiert* wird, dann ist es wieder Teil einer *stehenden Welle* geworden.

Das Einzige, was dieser Erklärung fehlt, ist die Antwort auf die Frage, *was* da eigentlich schwingt. Wie schon im vorigen Beitrag erwähnt, kann diese Frage aber erst beantwortet werden, wenn die ontologische Grundlage dafür geschaffen worden ist. (Es ist aber wohl überflüssig, zu erwähnen, dass sich hier nicht "*die 'Materie' von irgendwelchen Wellen physisch irgendwie 'zusammenlegt' und so verstärkt oder auslöscht*" – was auch immer diese unsinnige Passage im obigen Zitat bedeuten mag.)

Ich denke, aus den Zitaten geht klar hervor, was eine mehr als hundertjährige Tradition von Gehirnwäsche zu leisten vermag. Das Problem ist terminologisch weggezaubert, kein Schatten trübt die gereinigte Gedankenwelt.

Bis jetzt haben solche Euphemismen allerdings nur die Physikpädagogik erobert. Aber man kann andererseits auch nicht behaupten, dass in der physikalischen Forscher-Gemeinde ein Problembewusstsein existierte. Die letzten bekannten Physiker, die das Problem der Interpretation quantenmechanischer Messprozesse klar erkannt und nicht beschönigt haben, waren die beiden in meinen vorangegangenen Beiträgen zitierten: Richard Feynman und John Bell. Alle anderen haben sich mit irgendwelchen Scheinerklärungen beruhigt und neuen Fragen und Theorien zugewandt.

Und damit sind wir wieder beim Thema dieses Beitrags: Wie oben gezeigt, sind diese "neuen Theorien" falsch, weil sie auf falschen Vorstellungen aufbauen, mit denen ihre mathematische Struktur eng verknüpft ist. Die Unfähigkeit der Physiker, sich bei der Interpretation der Quantenmechanik von der Teilchen-Vorstellung zu lösen, hat die Entwicklung der theoretischen Physik in eine falsche Richtung gelenkt.

Gruppentheorie und Repräsentationstheorie sind geeignet, Strukturen zu erforschen, die aus Beziehungen zwischen Objekten hervorgehen; Es ist aber auf dieser Basis nicht möglich, die Objekte selbst – also die "Teilchen" – zu beschreiben und zu verstehen. Gruppentheoretische Methoden können die Physik also nur so weit führen, wie der Teilchenbegriff reicht, und das bedeutet: zu einem näherungsweise gültigen Modell der Wirklichkeit, aber um den Preis des

totalen Verlusts des Verständnisses davon, was *tatsächlich* geschieht. (Man erinnere sich an das Doppelspaltexperiment oder an das Szenario mit verschränkten Photonen.)

Solange nicht eingesehen wird, dass die quantenmechanischen "Teilchen" Wellen **sind**, gibt es aus der gruppentheoretischen Sackgasse keinen Ausweg. Sollte sich diese Erkenntnis aber durchsetzen, dann ändert sich augenblicklich die Richtung der physikalischen Forschung: die Aufmerksamkeit verschiebt sich von den Objekt-Strukturen zu den Objekten selbst, und erst wenn diese erforscht und verstanden sind, können auch die Vorgänge in den Strukturen wirklich verstanden werden.

Zni Kiprot (Replikant, Serie Nexus 11)

Zusammenfassung

Bisher habe ich mich mit drei Themen beschäftigt: Dunkle Energie, spezielle Relativität und Quantenmechanik. Ich werde nun kurz meine Argumente und Ergebnisse wiederholen.

Im Mittelpunkt meiner Interpretation der Quantenmechanik steht die Erklärung der *Reduktion der Wellenfunktion* in quantenmechanischen Messprozessen.

Zunächst ist zu sagen, dass der quantenmechanische Formalismus selbst in beiden Interpretationen identisch ist. Die von mir gewählte Art der Beschreibung dieses Formalismus' ist allerdings schon mit meiner Interpretation verknüpft:

Attribute, die gemessen werden können, sind *Wellenklassen* zugeordnet. Soll ein bestimmtes Attribut gemessen werden, dann muss die Funktion (Wellenfunktion, Zustandsvektor), durch die der Zustand des Objekts beschrieben wird, in die Wellen derjenigen Wellenklasse zerlegt werden, der dieses Attribut zugeordnet ist. In dieser Zerlegung treten die verschiedenen dieser Klasse zugehörigen Wellen mit verschiedenen Amplituden auf.

Soweit sind die beiden Interpretationen identisch (auch wenn der Sachverhalt in der Standardinterpretation nie auf diese Weise formuliert wird). Nun aber trennen sich die Auffassungen wie folgt:

In der Standardinterpretation werden die Amplitudenquadrate der Wellen, in die die Wellenfunktion mathematisch und/oder experimentell zerlegt wurde, als *Wahrscheinlichkeitsverteilung* der möglichen Werte des Attributs aufgefasst, das gemessen wird. Die Wahrscheinlichkeiten sind *objektiv* (d.h. die Natur "weiß" selbst nicht, wie sie sich entscheiden wird). Wird jedoch eine Messung vorgenommen, dann wird einer der möglichen Messwerte *wirklich*, und die anderen Wellen ("Wahrscheinlichkeitsamplituden") verschwinden. Das Objekt, zu dem das gemessene Attribut gehört, ist identisch mit dem Objekt, das zuvor durch die Wellenfunktion beschrieben worden ist. Es ist *dasselbe Objekt* in einem *anderen Zustand*.

In meiner Interpretation hingegen werden *alle Wellen*, in die die Wellenfunktion zerlegt worden ist, als *wirklich existierend* aufgefasst. Sie verschwinden also nicht, sondern können zu späteren

Ereignissen beitragen. Das nächstfolgende Ereignis wird durch *eine* der Wellen ausgelöst, die in der Zerlegung enthalten waren. Das Objekt, zu dem das gemessene Attribut gehört, ist daher *nicht identisch* mit dem Objekt, das zuvor durch die Wellenfunktion beschrieben worden ist. Das "gemessene Objekt" enthält bloß einen Teil der Wellenfunktion – eben genau diejenige Welle, die das Ereignis ausgelöst hat.

Der ganze Vorgang beruht auf *Wellen*. Damit ändern sich die Begriffe *Objekt*, *Ereignis*, *Messung*:

In atomaren und molekularen Größenordnungen sind Objekte *stehende Wellen* (bzw. Schwingungsbereiche stehender Wellen) oder *Übergänge* zwischen stabilen Zuständen stehender Wellen. Das gilt jedoch nur innerhalb von Materie. Außerhalb von Materie sind solche "Objekte" keine Objekte im üblichen Sinn, sondern auseinander laufende Wellengruppen. Wenn Wellen aus diesen Wellengruppen wieder auf Materie treffen, können sie Teil der stehenden Wellen werden, aus denen diese Materie gebildet ist. Falls das Amplitudenquadrat der eintreffenden Welle ausreicht, um einen Übergang der stehenden Welle auszulösen, wird die stehende Welle in den nächsten stabilen Zustand "springen", und ein "Ereignis" hat stattgefunden. *Ereignisse sind immer solche Übergänge*.

Zur Begründung des jeweiligen Zusammenhangs zwischen einem Attribut und der zugeordneten Wellenklasse kann an dieser Stelle noch nichts gesagt werden. Falls man annimmt, dass die Welt ausschließlich aus Wellen besteht, ist es aber zumindest intuitiv einsichtig, dass der Frequenz, einer ungerichteten Größe, die Energie zugeordnet ist, und der Wellenlänge, einer gerichteten Größe, der Impuls.

Dies ist die Kurzversion meiner Interpretation. Wer konkrete Beispiele und mehr Ausführlichkeit wünscht, findet sie in den Beiträgen über Quantenmechanik.

Wie zu sehen ist, verflüchtigen sich in dieser Sicht des Messprozesses alle Seltsamkeiten – oder sagen wir doch gleich: alle Unsinnigkeiten – der Standardinterpretation. Hier gibt es keine Nichtlokalität, hier verschwinden keine Wellen, die ihre Existenz zuvor durch Interferenz bewiesen haben.

Man könnte einwenden, dass mein Vorschlag ohne Bedeutung sei, weil es sich ja "nur" um eine Änderung der Interpretation handelt. Interpretation, oder besser: *Ontologie* ist jedoch genau dasjenige, was der Quantenmechanik fehlt – am Formalismus muss nichts verändert werden. Die Interpretation ist nicht bloß ein unwesentlicher "Zusatz" zur Mathematik der Theorie und den Anweisungen zur Durchführung von Messungen; vielmehr bestimmt sie die Richtung der weiteren physikalischen Forschung, und die misslungene Interpretation quantenmechanischer Messprozesse führt, wie im vorigen Beitrag gezeigt, zur Bildung falscher Theorien. Es gibt also gute Gründe für die Behauptung, dass die Unfruchtbarkeit der Grundlagenphysik der letzten Jahrzehnte durch den Mangel an Ontologie verursacht worden ist.

Nun zur speziellen Relativitätstheorie. Ich werde versuchen, den Grundgedanken zu skizzieren.

Die Basis meiner Interpretation bildet die Hypothese, dass die Wirklichkeit ein Netz von kausalen Beziehungen zwischen elementaren Objekten ist, das aus Prozessen besteht, die *im dreidimensionalen Raum* stattfinden. In diesem dreidimensionalen Raum gibt es einen *wahren Lichtweg*, und daher existiert ein *absolutes System*.

Dazu kommt folgende Überlegung: Etwas, was selbst keiner Veränderung unterworfen ist, kann nicht Ursache von Veränderung sein. Ein kausaler Prozess ist aber nichts anderes als eine Kette von Veränderungen. Also kann ein kausaler Prozess nicht bei etwas beginnen, was selbst ohne Veränderung ist. Daher können die elementaren Objekte nur dann Ausgangspunkt von Prozessen (Wechselwirkungen) sein, wenn sie nicht "strukturlos" oder "punktförmig" sind, sondern nur dann, wenn sie sich auch selbst verändern. Auch die Objekte selbst müssen also als *Prozesse* aufgefasst werden.

Denken wir uns nun eine Menge M_1 von ruhenden Objekten in einer bestimmten Konstellation. Die Objekte sind durch Prozesse vernetzt, und in den Objekten selbst laufen Prozesse ab, die die Form der Objekte festlegen und aufrechterhalten. Wir fordern zunächst, dass alle Prozesse Lichtgeschwindigkeit haben.

Jetzt denken wir uns eine identische Objektmenge M_2 , die sich relativ zu M_1 bewegt. Die Konstellation der Objekte bleibe dabei unverändert. (Da es hier nur um die Vermittlung des ontologischen Grundprinzips der Relativität geht, brauchen wir uns um die relativistische

Längenkontraktion vorläufig nicht zu kümmern.) Objekte, die in M1 und M2 denselben Platz einnehmen, nennen wir einander zugeordnet.

Wir betrachten das Szenario nach wie vor dreidimensional. Alle Prozesse laufen *im absoluten Ruhesystem* ab, und wir beurteilen alles Folgende von diesem System aus.

Für jedes Objekt in M2 gilt: Da das Objekt sich selbst vorwärts bewegt, treffen *alle* Prozesse, die *von vorn* kommen, bei ihm *früher* ein als die gleichartigen Prozesse beim zugeordneten Objekt in M1. *Alle* Prozesse, die von *hinten* kommen, treffen *später* ein.

Die zeitlichen Beziehungen zwischen den Objekten werden aber durch diese Prozesse vermittelt. Daraus folgt, dass alles, was *vor* dem Objekt in M2 geschieht, im Vergleich mit dem zugeordneten Objekt in M1 *in die Vergangenheit* verschoben ist, und alles, was *hinter* ihm geschieht, in die Zukunft.

Es ist von fundamentaler Bedeutung, zu verstehen, dass sich dadurch *das ganze Kausalgefüge* von M2 gegenüber M1 verändert, und das betrifft sowohl das äußere Kausalnetz, durch das die Objekte miteinander verbunden sind, als auch die inneren Vorgänge, durch die die Objekte als solche erzeugt und in ihrer Gestalt aufrechterhalten werden. Es handelt sich bei diesen Zeitverschiebungen also nicht nur um Änderungen von *Zeit-Messungen*, sondern um *ontologische* Veränderungen: In M2 *ist* eine andere Zeit als in M1.

Diese ontologische Überlegung dient dazu, einzusehen, dass sich aus dreidimensional-räumlicher Sicht – und *nur* aus dieser Sicht – die relativistischen Phänomene begründen und verstehen lassen.

(Der Einfachheit halber führe ich den Gedankengang hier nur qualitativ aus. In einer mathematischen Darstellung kann man auf diese Weise die Lorentz-Transformation ableiten.)

Allerdings sind wir noch nicht fertig. Wir haben vorausgesetzt, dass alle Prozesse Lichtgeschwindigkeit haben. Nun müssen wir unsere Überlegung auf Prozesse mit anderen Geschwindigkeiten verallgemeinern.

Natürlich könnten wir einfach *fordern*, dass sich alle Prozesse relativistisch transformieren – aber damit hätten wir uns von der Erklärung verabschiedet und müssten die Relativität wieder als rein formale Tatsache hinnehmen, eben genau so, wie das üblicherweise geschieht. Außerdem ist es ja offensichtlich, dass wir in einem dreidimensionalen Raum leben, und der Übergang auf die vierdimensionale raumzeitliche Betrachtungsweise der Relativitätstheorie wäre dann, wie bisher, zwar selbstverständlich, aber letztlich unbegreiflich. Das Verständnis der Wirklichkeit bliebe damit wiederum auf der Strecke.

Setzen wir also unseren Gedankengang fort. Nehmen wir an, es gäbe nicht nur Prozesse mit der Lichtgeschwindigkeit c , sondern auch Prozesse mit einer anderen Geschwindigkeit d .

Das Kausalgefüge in beiden Mengen M_1 und M_2 wird durch Prozesse erzeugt, die sich mit der Geschwindigkeit c ausbreiten. Falls wir nun annehmen, dass die Geschwindigkeit d unabhängig von der Geschwindigkeit c ist, dann sehen wir uns mit der Tatsache konfrontiert, dass nun *ein zweites, vom ersten unabhängiges Zeitsystem und Kausalgefüge* existiert.

Das ist aber offensichtlich unmöglich: die Zeiten, die durch Licht festgelegt sind, müssen *für alle Prozesse* gelten. Ansonsten gäbe es weder stabile Objekte noch kohärente physikalische Systeme.

Also gibt es nur eine einzige Geschwindigkeit, nämlich Lichtgeschwindigkeit. Alle anderen Geschwindigkeiten müssen daraus abgeleitet sein.

An diesem Punkt scheint man zunächst festzustecken: Wie sollte es möglich sein, aus der Lichtgeschwindigkeit andere Geschwindigkeiten abzuleiten?

Die Lösung ist jedoch einfach, wenn man darauf zurückgreift, dass Licht eine Welle ist. Dann ist es naheliegend, andere Geschwindigkeiten durch Überlagerungen von gegenlaufenden Wellen mit Lichtgeschwindigkeit zu konstruieren. Ich werde das hier nicht ausführen, aber es ist auf diese Weise möglich, mit ein wenig Mathematik und ohne alle physikalischen Annahmen die relativistische Wirklichkeit von Grund auf zu errichten, und zwar ohne das Relativitätsprinzip oder das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für alle gleichförmig bewegten Beobachter vorauszusetzen.

Zuletzt noch ein paar Bemerkungen zur "dunklen Energie".

Dunkle Energie ist erforderlich, um die Beschleunigung der Expansion des Universums zu erklären. Ich habe in meinem ersten Beitrag darauf hingewiesen, dass der Begriff "Größe" ein *relationaler Begriff* ist und deshalb auf das Universum, also das "Ganze", nicht anwendbar ist. Das Universum ist kein Objekt. Es ist *nicht relational*. Da wir jedoch alles, was wir denken oder beschreiben – sei es nun mathematisch oder sprachlich – als Objekt denken müssen, erzeugen wir – als Artefakt dieser Notwendigkeit – das Attribut "Größe" in Bezug auf das Universum.

Das Universum *hat* aber keine Größe. Wenn also in Sätzen oder Gleichungen die "Größe" des Universums als Variable auftritt, dann muss eine Änderung dieser Variablen immer dem *Maßstab* angelastet werden.

Daraus folgt, dass es keine dunkle Energie gibt. Sie ist, genau wie die veränderliche Größe des Universums, ein Artefakt, das seine scheinbare Existenz unserer apriorischen Notwendigkeit verdankt, alles, was wir denken, als Objekt mit Eigenschaften denken zu müssen.

Meine Erklärungen bzw. Interpretationen der Quantenmechanik, der speziellen Relativitätstheorie und der dunklen Energie haben einige wesentliche Gemeinsamkeiten.

1. Es sind *ontologische* Erklärungen.

Physik ist seit mehr als hundert Jahren eine "ontologiefreie Zone". Was in diesem Zeitraum als "Interpretation" galt, verdient diese Bezeichnung nicht wirklich. Keinesfalls kann aber von einer "Ontologie" die Rede sein. Was bei Relativitätstheorie und Quantentheorie als "Erklärung" angeboten wird, ist ja in jedem Fall bloß eine Begründung, warum eine Erklärung unmöglich ist. Dieser Mangel wird durch meine ontologischen Beschreibungen behoben: hier wird erklärt, *was wirklich geschieht*.

2. Alle drei Interpretationen weisen auf *Wellen* als Basis der Wirklichkeit.

Bei Quantenmechanik und spezieller Relativität geschieht das ganz direkt: in den von mir analysierten Szenarien *müssen* Wellen das Fundament der Wirklichkeit bilden. Bei der dunklen Energie ist der Hinweis indirekt: da es nicht die Größe des Universums ist, was sich ändert,

sondern die materiellen Wellenlängen, tritt der Wellenaspekt in den Vordergrund – Wellenlängen können sich ändern; dem Konzept "Teilchen" ist die Vorstellung einer Größenänderung fremd.

3. Das Universum, das hier in den Blick kommt, ist offenbar ein Universum, das sich im Ganzen und in seinen Elementen durch *Selbstorganisation* entwickelt.

Ich werde es vorläufig bei diesen Andeutungen bewenden lassen. Für ausführlichere Beschreibungen fehlen einige ontologische Voraussetzungen.

Zni Kiprot (Replikant, Serie Nexus 11)