

# *Makropartikel und Quantenschleife*

*Philosophisch-naturwissenschaftliche Fragmente  
zur Struktur der Wirklichkeit*

*Robert Pliem*

Wien, Juni 2003

## Inhaltsverzeichnis

<u>Vorwort:</u>	<b>5</b>
<i>Eine kurze Darstellung der vorliegenden Arbeit .....</i>	<i>5</i>
<u>I. Makropartikel</u>	<b>8</b>
<i>1.1.: Paradoxa der Teilung und der Einheit .....</i>	<i>8</i>
<i>1.1.1: Ein Partikel Einheit und Wirklichkeit .....</i>	<i>8</i>
<i>1.1.2.: Ein Partikel zur Teilung und Entstehung des Raumes .....</i>	<i>9</i>
<i>1.2.: Zeit und die Wirklichkeit der Gegenwart.....</i>	<i>12</i>
<i>1.2.1: Zum Phänomen einer einheitlichen Lichtgeschwindigkeit.....</i>	<i>12</i>
<i>1.2.2: Zur zeitlichen Differenz der Beobachtung.....</i>	<i>14</i>
<i>1.2.3: Basisstruktur einer relativistischen Zeit .....</i>	<i>16</i>
<i>1. 2.3.1 Uhrensynchronisation im Raum.....</i>	<i>16</i>
<i>1.2.3.2: Beschleunigung und relativistische Zeitstruktur.....</i>	<i>18</i>
<i>1.3.: Philosophische Partikel über die Struktur der Gegenwart.....</i>	<i>21</i>
<i>1.3.1.: Kurt Gödel und das Paradox des Zeitverlaufes.....</i>	<i>21</i>
<i>1.3.2.: Ein Partikel zu Erwin Schrödinger´s Gegenwart des Bewußtseins...22</i>	
<i>1.4.: Ein Ausflug in die unmittelbare Wirklichkeit des Makrokosmos</i>	
<i>Größenverhältnisse im sichtbaren Universum.....</i>	<i>25</i>

<u>II. Quantenschleife</u>	31
2.1.: Die mikrokosmische Basis der physikalischen Wirklichkeit.....	31
2.2.: Quantensprung und Philosophie .....	36
2.3.: Die Zweiteilung von Welt oder die Dualität der Photonen .....	38
2.4.: Ein Partikel über die experimentellen Grundlagen der Quantenmechanik .....	42
2.4.1: Beam Splitter.....	42
2.4.2.: Polarisationsfilter.....	43
2.4.3.: Eine einfache Darstellung des Mach-Zehnder-Interferometers.....	44
2.4.4.: Geteilte Photonen? .....	48
2.4.5.: Mach-Zehnder-Interferometer mit verzögerter Auswahl.....	48
2.5.: Doppelspalt, Zustandsreduktion und "Quantenwirklichkeit ".....	51
2.5.1.: "Welcher Weg" Experiment von Richard P. Feynmann.....	54
2.5.2.: Weitere "Welcher-Weg" Experimente .....	56
2.5.3.: Intensitätsverteilungen am Doppelspalt .....	58
2.5.4.: Ein Partikel zur Superposition und Zustandsreduktion.....	59
2.6.: Quantum Cats ? .....	61
2.6.1.: Interferierende makroskopische Objekte und Dekohärenz.....	62
2.7.: Komplementarität und die Kopenhagener Deutung.....	66
2.8.: Einstein, Podolsky, Rosen und die Annahme der vollständigen Wirklichkeitsbeschreibung .....	71
2.9.: Korrelierte Zweiteilchensysteme, E.P.R.-Photonenpaare und die Lokalitätshypothese .....	74

<i>2.10.: Ein Partikel zur Bell'schen Ungleichung .....</i>	<i>78</i>
<i>2.10.1: Unabhängige Raumbereiche, verborgene Variablen .....</i>	<i>81</i>
<i>2.10.2: Ein Partikel zur experimentellen Situation .....</i>	<i>85</i>
<i>2.10.3: Eine Sequenz zur Quantenkryptographie.....</i>	<i>88</i>
<i>Ein Ausblick zur Struktur der Wirklichkeit .....</i>	<i>93</i>
<i>Literaturverzeichnis .....</i>	<i>95</i>
<i>Danksagung .....</i>	<i>98</i>

*Vorwort:*

*Eine kurze Darstellung der vorliegenden Arbeit*

Ausgehend vom vorsokratischen Parmenides, dessen Wirklichkeitsstruktur eine Einheit ausformt und die Komplementarität als "Doxa", als Täuschung der eigentlichen Wirklichkeit entgegengesetzt, trifft man auf eine Sequenz über die Peripherie von Raum und Körper und der "paradoxen" Metastruktur von Wirklichkeit und Singularität.

Das Wesen der Zeit entfaltet sich im Phänomen des Lichts.

Ausgehend vom Paradigma des Äthers im 18. und 19. Jahrhundert und den darauf folgenden, aufkeimenden Wechsel unserer Wirklichkeitsbetrachtung durch das Experiment von Michelson und Morley und der Relativitätstheorie von Albert Einstein zentriert sich die Betrachtung in Fragestellungen der zeitlichen Differenz und der Gleichzeitigkeit.

Im Rahmen des Phänomens der Lichtgeschwindigkeit bildet sich eine Relation der räumlichen Entfernung mit der zeitlichen Entfernung des Wahrgenommenen.

Eine solche Betrachtung der Zeit verlangt die Konstruktion einer Uhr.

Integrieren wir eine Uhr in ein lichtnah beschleunigtes Inertialsystem, so beobachten wir eine verzögerte zeitliche Ausformung des Beobachtungsgegenstandes. Beschleunigung bedeutet relativistische Zeitdehnung.

Anhand der Betrachtung der gleichberechtigten "Schichtung" der Inertialsysteme verunmöglicht sich jedoch die Darstellung der Gleichzeitigkeit des Wirklichen und damit die Beschreibung einer objektiven Wirklichkeitsstruktur.

Kurt Gödel und Erwin Schrödinger schließen daraus eine Wirklichkeit, welche sich in unserem Bewußtsein verankert.

Der letzte Teil des "Makropartikels" widmet sich einer einfachen Darstellung der Struktur und den Größenverhältnissen im Universum.

Die Struktur der beobachtbaren Wirklichkeit formt sich im Rahmen der Lichtgeschwindigkeit als Maximalübertragungsgeschwindigkeit von Information.

Der zweite Teil dieses Textes versucht als Resultat eine Annäherung an eine Integration und "Veranschaulichung" von Nichtlokalität als Komplementarität unserer Wirklichkeit; im Grunde ein philosophisches Fragment zur Quantenmechanik.

Die Entstehung der Quantenmechanik bewirkte eine grundlegende Veränderung unserer physikalischen Wirklichkeitsbetrachtung.

Seit Max Planck wird Energieaustausch in diskreten "Paketen", in Quanten beschrieben, deren Grundlage sich auf das Planck'sche Wirkungsquantum als Basis der Wechselwirkung stützt.

Im weiteren Verlauf der quantenmechanischen Entwicklung, wird das Licht als physikalischer Träger der Planck'schen Energiequanten definierbar.

Es formt sich eine Dualität von Teilchen und Welle.

Um nun das Quantenphänomen genauer betrachten zu können, folgt die vorliegende Arbeit einer einfachen Beschreibung der experimentellen Grundlagen von Quantenexperimenten. Die experimentellen Strukturen verdeutlichen die Komplementarität der Interferenz der Welle mit der Weginformation eines lokal existierenden Teilchens.

Ein dazu analoges Ergebnis ergibt die Betrachtung des Doppelspaltexperimentes. Beobachtungsgegenstände können demnach nicht unabhängig von ihrer Beobachtung beschrieben werden.

Auch den kniffligsten Experimenten gelingt es nicht, vollständige Weginformation bei Aufrechterhaltung der wellenspezifischen Interferenz zu gewährleisten.

Sich überlagernde Möglichkeiten verunmöglichen Weginformation und formen den Zustand der Superposition.

Ein "sich in Interferenz befinden" von physikalischen Gegenständen ist nicht einer mikrokosmischen Wirklichkeitsstruktur vorbehalten, sondern wird über den Begriff der Dekohärenz entwickelt, welcher besagt, daß jegliche Möglichkeit einer direkten Wechselwirkung, des sich in Interferenz befindlichen Gegenstandes mit seiner Umwelt, ein instantanes Verschwinden der Superposition auslöst.

Beliebig große Körper in Superposition zu bringen bedeutet, daß diese Körper keinerlei Wechselwirkung mit der beobachtbaren Wirklichkeit unseres Universums haben dürfen.

Die folgende Betrachtung bezieht sich auf die Entstehung des Komplementaritätsbegriffes, ausgehend von der 5. Konferenz des Solvay Institutes im Oktober 1927. Die von Werner Heisenberg definierte Unschärferelation, wodurch die Messung das Verhalten des Beobachtungsgegenstandes beeinflusst, wird von einer von Niels Bohr gestalteten Theorie, welche eine fundamentale Komplementarität der Wirklichkeitsstruktur (von Teilchen und Welle) als Grund der Unbestimmtheit beschreibt, überlagert.

Im Jahre 1935 folgte eine Arbeit von Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen über die Möglichkeit einer vollständigen Wirklichkeitsbeschreibung durch die Quantenmechanik, in der die Mikrokausalität der Relativitätstheorie vollständig aufrechterhalten bleiben sollte.

Zusammenhänge unabhängig von Raum und Zeit, welche von Einstein als "Spooky Actions" bezeichnet wurden, sollten aus der Beschreibung der Wirklichkeit ausgeschlossen werden, sogesehen sollte die Lokalitätshypothese die Basis der Beschreibungsstruktur bilden.

Auf Grundlage einer "Verletzung", der von J.S.Bell im Jahre 1964 aufgestellten Bell'schen Ungleichung, konnte jedoch ein zufälliges Zustandsverhalten einer Verschränkung, einer Superposition unabhängig von Raum und Zeit erklärbar gemacht werden.

Die ersten experimentellen Untersuchungen dieser Zusammenhänge unabhängig von Raum und Zeit, wurden bereits in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts durchgeführt. Experimente der Gegenwart bestätigen den Nichtlokalitätseffekt einer quantenmechanischen Verschränkung bereits über Distanzen, beginnend von mehreren hundert Metern bis hin zu mehreren Kilometern.

Die nichtlokalen Zustandskorrelationen verschränkter Zweiteilchenstrukturen legen die Basis zukünftiger und gegenwärtiger quantentechnischer Entwicklungen, wie die, des Quantencomputers oder die, der Quantenkryptographie.

Am Ende dieser Arbeit befindet sich eine quantenphilosophische Betrachtung unserer Wirklichkeitsstruktur, in der Information der Wirklichkeit gleichgesetzt ist. Über eine nichtlokale "Brücke" instantan transportierte Zustandserzeugung, wird jedoch erst dann ein Teil der Wirklichkeit, wird erst dann Information, wenn sie mittels eines physikalischen Trägers, dessen Ausbreitungsgeschwindigkeit sich innerhalb der Lichtgeschwindigkeit befindet, in die "Zusammenhänge" unserer Wirklichkeit "eintaucht".

## *I. Makropartikel*

### *1.1.: Paradoxa der Teilung und der Einheit*

#### *1.1.1: Ein Partikel Einheit und Wirklichkeit*

Parmenides, seinerseits Vorsokratiker (um 540-470 v.Chr) reflektiert über das "Seiende"; für ihn ist es eine Einheit, ein Monolith einer zeitlosen Ewigkeit. Vollständigkeit ist Grundlage des Wirklichen.

Alles = Ist.

*"Man soll es aussagen und erkennen, daß es Seiendes ist; denn es ist [der Fall], daß es ist, nicht aber, daß Nichts [ist].." <sup>1</sup>*

Einzig und allein das Seiende ist.

In der Parmenidischen Wirklichkeitsauffassung gibt es keinen Platz für Unvollständigkeit.

*"Ich halte dich ... zurück von dem Weg, über den die nichtwissenden Menschen irren, die Doppelköpfigen. Denn Machtlosigkeit lenkt in ihrer Brust den irrenden Verstand; sie treiben dahin, gleichermaßen taub wie blind, verblüfft, Völkerschaften, die nicht zu urteilen verstehen, denen das Sein und Nichtsein als dasselbe und auch wieder nicht dasselbe gilt und für die es von allem eine sich verkehrende Bahn gibt."<sup>2</sup>*

Sind wir in Wirklichkeit Bewahrer der Einheit?

Perfektion einer allumfassenden Einheit, als monotones Sein.

Ist es nicht auch die verkehrende Bahn, die zwar Sein und Nichtsein gleichsetzt und dennoch auch gleichzeitig differenziert?

Unsere klassische Wirklichkeitsauffassung kann die Komplementarität nicht erklären, in einer tragischen Weise reflektiert sie darin ihr Unvermögen die Vollständigkeit der Unvollständigkeit gleichzusetzen.

---

<sup>1</sup> Parmenides, Über das Sein, Philipp Reclam jun., Stuttgart 1985, Seite 9 Fragment 6

<sup>2</sup> ebd.



Komplementäre Bilder von Einheit – in sich verkehrende Bahnen.

Komplementäre Welten.

Zwei in sich zueinander verkehrende Pole einer dipolaren Wirklichkeit.

Die Wechselwirkung der verkehrenden Bahnen tauscht Parmenides gegen eine zeitlose Ewigkeit.

*"Auf diesem Weg gibt es sehr viele Zeichen: daß Seiendes nicht hervorgebracht und unzerstörbar ist, einzig, aus einem Glied, unerschütterlich, und nicht zu vollenden; weder war noch wird es einmal sein, da es jetzt zugleich ganz ist, eins, zusammengeschlossen."*<sup>3</sup>

Eine vollständige Einheit hat keine Entwicklung und ist kein Teil der Wirklichkeit, es ist eine Welt zeitloser Tatsachen, ein Ideal einer Wirklichkeit, die nur in unserer Vorstellung existieren kann.

Weder die Einheit noch das Nichts und auch nicht die Unendlichkeit sind in unserer Wirklichkeit vollständig darstellbar.

Ist Wirklichkeit komplementär zur Einheit?

Sind Einheit und Komplementarität begrifflich "fusionierbar"?

Macht es dann noch Sinn von Wirklichkeit zu sprechen,

oder könnte man erst dann von Wirklichkeit sprechen?

### *1.1.2.: Ein Partikel zur Teilung und Entstehung des Raumes*

Der Begriff Raum steht in enger Relation zum Begriff Körper.

Die Struktur eines Körpers bildet die Grenze zu anderen Körpern, oder die Grenze dem Raum gegenüber.

Definiert man den Raum als strukturierten Körper, so muß man sich die Frage stellen, in welchem Raum dieser strukturierte Körper eingebettet ist.

Schon nach wenigen Denkschritten beendet man das Zählen und weiß, daß sich eine Metaschleife gebildet hat, ein unendlicher Regress in sich eingebetteter Räume.

---

<sup>3</sup> ebd., Seite 11, Fragment 8

*"Demnach wäre der Raum ein großes Gefäß, in dem sich alle Körper befinden. Allerdings muß dieses große Gefäß eigentlich wandlos und unbegrenzt sein, da sich sonst sofort die Frage erhebt: was ist hinter der Wand, der Grenze des Raumes?"*<sup>4</sup>

Die Frage nach dem Raum zu stellen bedeutet auf Paradoxa zu stoßen und zu lernen damit umzugehen. Die Frage "auf dem Punkt zu bringen", bedeutet ein Paradoxon zu denken. Ein Argument zur Struktur von Raum wird von einem Komplementärargument gesplittet.

Dieses Splitting in der Erklärung von Raum ist die eigentliche Präsenz der Theorie.

*"Ein Körper darf also kein Punkt sein, damit er den Raum erfüllen kann; er muß ausgedehnt und begrenzt sein. Ein ausgedehnter Körper ist aber eine Vielheit von Körpern, denn er ist teilbar. Ist er nicht teilbar, so ist er auch nicht ausgedehnt."*<sup>5</sup>

Ist der "Körper" aber ausgedehnt so ist er durch seine Teilbarkeit ein Ineinander und Auseinander von Körpern.

Bringt uns eine Teilung von "Körper" zu einer Einheit?

Kann ein unendlich teilbarer "Körper" eine Zusammensetzung aufweisen?

Eine unendliche Teilung, die nie zu einem "Punkt" kommt, bedeutet lediglich ein unvollständiges Bild der Wirklichkeit zu betrachten.

Unvollständigkeit bedeutet nicht die Unmöglichkeit von Wirklichkeit, sie ist vielmehr eine ihrer Voraussetzungen.

Raumkörper, welche letztendlich nicht mehr teilbar wären, müssen durch ein Auseinander definiert werden, welches wiederum einen Überraum voraussetzen würde.

Zwischen Teilbarkeit und Einheit hat sich eine paradoxe Rückkopplungsschleife etabliert.

Betrachtet man "Räume" so wird man an ihrer Ausformung erkennen, daß sich eine komplementäre Form bilden läßt; die Möglichkeit eines exakten Gegenteils.

---

<sup>4</sup> Gerhard Schwarz, Raum und Zeit, WUV-Universitätsverlag Wien, 1992, S 19

<sup>5</sup> ebd. S21

Der Ursprung als Entstehung in einer linearen Endlosschleife im Steady State, oder ein komplementärer Zwilling der Gleichzeitigkeit?

*"Der Gedanke der Erschaffung aus dem Nichts ist ja keine Theorie des Raumes in der Weise, daß etwas plötzlich im Raum ist und vorher nicht im Raum war. Etwas in den Raum hineingeraten lassen, heißt aber immer, es in einen bestimmten Raum aus einem anderen bestimmten Raum hineinkommen zu lassen. Damit setzt man aber immer schon Räumlichkeit als Bedingung des Körpers voraus "*<sup>6</sup>

Dieses Problem gilt es jedoch zu umgehen.

Der Gedanke der Erschaffung aus dem Nichts bildet bei der Betrachtung der Urknalltheorie durchaus eine Theorie der plötzlichen, instantanen Emergenz von Raumzeit.

Doch sollte darin nicht nur der Raumkörper aus dem Nichts erschaffen werden, sondern das Nichts sollte darin mit dem Raumkörper gemeinsam, der Unvollständigkeit des Raumkörpers, erschaffen werden.

Der Urknall ist die Zeit ohne Vergangenheit, vor dem Urknall gab es nicht einmal ein Nichts im Sinne eines Nichtvorhandenseins, dessen Gegenteil ein Vorhandensein bedeutet.

Sein und Nichts setzen einander voraus.

---

<sup>6</sup> Gerhard Schwarz, Raum und Zeit, WUV-Universitätsverlag Wien, 1992, S23

## 1.2.: Zeit und die Wirklichkeit der Gegenwart

*"Eine Summe von Empfindungen muß aufgehört haben, gegenwärtig zu sein, um eine Erinnerung werden zu können, die geeignet ist in die Zeit eingeordnet zu werden; wir müssen das Gefühl ihrer unendlichen Verknüpfung verloren haben, sonst wäre sie gegenwärtig geblieben.*

*Sie muß sich um einen Mittelpunkt von Ideenverbindungen sozusagen kristallisiert haben, der gleichsam eine Überschrift ist."*<sup>7</sup>

Henri Poincare, Das Maß der Zeit

Es sind Kristalle einer zeitlosen Zeit, doch das Zustandekommen von Erinnerung benötigt wiederum Zeit. Unsere Sehnsucht nach Vollständigkeit spiegelt sich in unseren Fragmenten der Erinnerung.

Auf der Suche nach geeigneten Strategien geraten wir in ein logisches Spiel, in dem die Paradoxa die Metaebenen verbinden, die Dimensionen bilden.

*"Was ist also "Zeit"? Wenn mich niemand danach fragt, weiß ich es; will ich es einen Fragenden erklären, weiß ich es nicht mehr"*

: in Aurelius Augustinus, Confessiones, XI, 14

Objektive Gleichzeitigkeit verunmöglicht sich ebenso wie objektive Einheit. Einheit und Gleichzeitigkeit waren lange Zeit innerhalb einer absolut gedachten Wirklichkeit vorgestellt.

### 1.2.1: Zum Phänomen einer einheitlichen Lichtgeschwindigkeit

*"Die Physik des Aristoteles ging von einem kugelförmigen Universum aus, in dessen Mittelpunkt die Erde ruhte. Das Universum sollte völlig von Materie erfüllt sein, wobei Aristoteles zwischen den vier Elementen der irdischen Welt und dem kristallinen Äther der Himmelsphären unterschied."*<sup>8</sup>

---

<sup>7</sup> Henri Poincare, Der Wert der Wissenschaft, Übersetzt von E.Weber, Teubner, Leipzig 1906  
in: Zeit im Wandel der Zeit, (Hrsg.) Peter C. Aichelburg, Vieweg, Braunschweig – Wiesbaden, 1988,  
S 86-87

<sup>8</sup> Roman Sexl, Herbert Kurt Schmidt, Raum – Zeit – Relativität, Vieweg, Braunschweig 1990, S2

Im 18. und 19 Jahrhundert wurde die Vorstellung eines Äthers ein fundamentales Paradigma der physikalischen Wirklichkeitsinterpretation.

*"Genau wie Schall eine Luftschwingung ist, so sollte Licht eine Schwingung des Äthers sein. Da Licht ja selbst von den entferntesten Sternen zu uns gelangt, konnte es nur eine Schwingung eines überall vorhandenen Mediums, also des Äthers, sein."*<sup>9</sup>

Eine omnipräsente Wirklichkeitsform, eine "Negativform" der eigentlichen wahrgenommenen Wirklichkeit.

Eine "Antiwelt", welche unsere Wirklichkeit vervollständigen sollte.

Die Materie durchdrang den Äther und gleichzeitig diente der Äther als Grundlage jeglicher "Signalausbreitung".

Es galt daher als vordringliches Ziel die Eigenschaften des Äthers zu erforschen.

*"Alle Experimente ergaben negative Ergebnisse.... Jedes dieser Experimente konnte man schließlich mit einiger Mühe erklären. Man änderte einfach die unbekanntes Eigenschaften des Äthers solange ab, bis man für den jeweils vorliegenden Versuch eigentlich keinen Effekt mehr erwarten durfte."*<sup>10</sup>

Die Theorie des Äthers wurde demnach adaptiv organisiert, eine fehlgeschlagene Annäherung konnte somit ebenso als Erfolg gewertet werden.

Im Zugang zum Äther befand sich der Schlüssel zur Newton'schen Uhr des Universums; man glaubte einem möglichen Zugang zur Vollständigkeit der Wirklichkeit nahe zu sein.

*"Licht ist – nach damaliger Ansicht – eine Welle, die sich im Äther in allen Richtungen mit der Geschwindigkeit  $c \approx 300.000 \text{ km/s}$  ausbreitet, Bewegt sich die Erde mit der Geschwindigkeit  $v$  durch den Äther, so sollte das Licht in einer Richtung der Erdbewegung entgegenseilen, während es in der Gegenrichtung mit der Erde mitläuft.*

*Die auf der Erde gemessenen Werte der Lichtgeschwindigkeit betragen daher in diesen beiden Richtungen  $c+v$  bzw.  $c-v$ ."*<sup>11</sup>

Die Erdgeschwindigkeit im Äther ergäbe eine klare Meßbarkeit von Überlichtgeschwindigkeit und ebenso eine klare Meßbarkeit von Unterlichtgeschwindigkeit von Licht.

---

<sup>9</sup> Roman Söxl, Herbert Kurt Schmidt, Raum – Zeit – Relativität, Vieweg, Braunschweig 1990, S6

<sup>10</sup> ebd., S8

<sup>11</sup> ebd.

Das Experiment von Michelson – Morley von 1886, welches zur Zielsetzung hatte, die Differenz der Lichtgeschwindigkeit in einer Messung zu verifizieren, konnte jedoch keinerlei Abweichungen einer einheitlichen Lichtgeschwindigkeit feststellen.

*" In der Folge wurde das Michelson – Morley Experiment mehrfach wiederholt. Mit Lasern ist es heute sogar möglich, Versuchsanordnung aufzubauen, die selbst eine Erdgeschwindigkeit von nur 3 cm/s im Äther registrieren würden. Mit keiner derartigen Anordnung ist es jemals gelungen, die Bewegung der Erde im Äther zu messen. "*<sup>12</sup>

Bereits im Jahre 1905, längst vor der Erfindung des Lasers, behauptete Albert Einstein in seiner Arbeit "Zur Elektrodynamik bewegter Körper" die "Nicht Existenz" eines Äthers.

Nun mußte eine Physik aufgebaut werden, die ohne das Äthermodell auskommt; somit wurde ein Modell erforderlich, welches auf die Vorstellung eines absoluten Raumes verzichtete.

Durch den Verzicht auf einen absoluten Raum ist es nicht mehr möglich ein bestimmtes Inertialsystem auszuzeichnen. Durch diese Bedingung der speziellen Relativitätstheorie von Albert Einstein, ebenfalls aus dem Jahre 1905, stellt sich nun die Frage nach der Gleichzeitigkeit von Ereignissen.

### *1.2.2: Zur zeitlichen Differenz der Beobachtung*

Kann etwas gleichzeitig stattfinden, wenn alle Inertialsysteme als gleichberechtigt definiert sind?

Gleichzeitigkeit wird eine Frage der Relation ihrer Bezugssysteme.

Ein absoluter Zeitpunkt existiert darin ebensowenig wie ein absoluter Raum.

Dinge, die in der Zeit ablaufen interpretieren wir gewöhnlich dennoch als gleichzeitig.

Wir können nur über Dinge sprechen, wenn wir diese Dinge mit etwas vergleichen können, im Grunde ist dieser Vergleich eine Uhr.

---

<sup>12</sup> Roman Sexl, Herbert Kurt Schmidt, Raum – Zeit – Relativität, Vieweg, Braunschweig 1990, S10-11

Die Phänomene, die in der Relativitätstheorie von Albert Einstein auftauchen, nehmen wir in unserer Wahrnehmung der Alltagswelt nicht wahr, weil die Geschwindigkeiten zu klein sind, um den Relativitätseffekt sinnlich zu erfassen. Wenn wir unsere Wahrnehmung im Sinne der Relativitätstheorie betrachten, so werden wir erkennen, daß wir innerhalb jeder Beobachtung in die Vergangenheit blicken, da jegliche beobachtbare Wahrnehmung eine Zeitspanne benötigt um wahrgenommen werden zu können.

Auf große Entfernungen bezogen ist es für uns wesentlich einfacher dieses Phänomen zu erkennen.

Betrachten wir das Licht der Sonne, so benötigte es etwa 8 Minuten um auf der Erde anzukommen, unsere beobachtbare Sonne befindet sich 8 Minuten in der Vergangenheit der tatsächlichen Sonne.

Jegliche Beobachtung ist ein Blick in die Vergangenheit der Dinge.  
Entfernung ist zeitliche Differenz.

Gleichzeitigkeit existiert nur in einem unendlich kleinen Universum, in dem keinerlei Entfernung existiert.

Dieses Areal ist die "andere Seite" der Wirklichkeit, der Bereich der Singularität, "der Zeit und Raumlosigkeit".

Unser Universum entsprang einer solchen Singularität, einen Bereich tief in der Quantenfluktuation an der Grenzlinie von Existenz, von Wirklichkeit und gleichzeitig entsprang die Singularität dem Universum.

Singularität beschränkt sich jedoch nicht nur auf den Ursprung unseres Universums, sie bildet auch den "Kern" sogenannter Schwarzen Löcher, welche man vor allem in den Zentren großer Galaxien vorfindet.

Die Ausdehnung von Zeit und Raum, von Wirklichkeit gelangt darin an die Grenze ihrer Existenz.

Singularität beschreibt eine komplementäre Form der Wirklichkeit.

Betrachten wir wiederum unsere unmittelbare Wirklichkeit und die in ihr wirkenden relativistischen Prinzipien so erkennen wir also, daß jede Distanz, jedes Auseinander einer Entfernung entspricht, welche wiederum einer wie oben erwähnten zeitlichen Differenz entspricht.

### *1.2.3: Basisstruktur einer relativistischen Zeit*

#### *1.2.3.1 Uhrensynchronisation im Raum*

Würde man in ein Gewitter verwickelt sein und bemerken, daß in sicherer Entfernung zwei Blitze gleichzeitig einschlagen, würde man daraus schließen, sich in der entfernungsmaßigen Mitte zwischen diesen Einschlägen zu befinden. Würde ich mich hingegen näher an einen der beiden Einschlagsorte befinden, so würde ich jenen Blitz eher bemerken können.

An verschiedenen Beobachtungspunkten erhalte ich also verschiedene Informationen über die Zeitpunkte der Blitzeinschläge.

Betrachtet man nun Gegenstände, die im Raum aneinander vorbeifliegen, so verhalten sich diese relativ zueinander. Es kann nicht festgestellt werden, inwieweit sich ein Gegenstand schneller, langsamer oder gar nicht in Relation zur Gesamtgeschwindigkeit der Gegenstände bewegt.

Die Ausbreitung vollständiger Information findet immer innerhalb der Lichtgeschwindigkeit statt.

Um das Phänomen der Relativität jedoch genauer betrachten zu können, benötigt man die Konstruktion einer Uhr.

Eine Atomuhr verwendet Atome als schwingungsfähige Gebilde, so Roman Sexl<sup>13</sup>, welche durch elektromagnetische Wellen (z.B. Radiowellen oder Licht) zu Schwingungen angeregt werden.

Die Frequenz der elektromagnetischen Welle muß mit der Eigenfrequenz des Atoms übereinstimmen, um den Resonanzeffekt nutzen zu können.

Bei 9 192 631 770 Hertz werden in einem Behälter befindliche Cäsiumatome zur Schwingung angeregt; doch schon bei äußerst geringen Veränderungen dieser Frequenz bricht die Resonanz zusammen, sodaß die Gleichmäßigkeit der gesendeten elektromagnetischen Welle über eine Mittelung sichergestellt werden kann. Eine solche Atomuhr weicht erst nach 150.000 Jahren im Mittel um eine Sekunde ab.

---

<sup>13</sup> ebd., S21 ff



Ebenso wie am oben erwähnten Beispiel, welches das Problem der Gleichzeitigkeit anhand von zwei "gleichzeitig" einschlagenden Blitzen demonstriert, sehen wir das Problem der Gleichzeitigkeit bei der Synchronisation von Atomuhren im Weltuhrensystem.

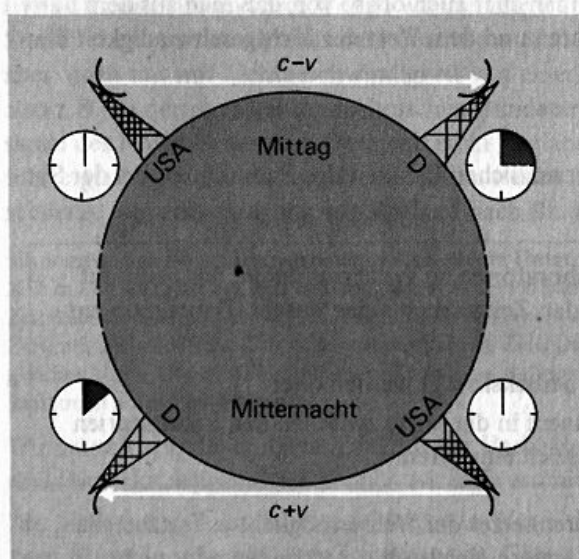
*"Die internationale Atomzeitskala TAI (Temps atomique international) entsteht durch Mittelung der Angaben von etwa sechzig Atomuhren, die sich in sieben verschiedenen Laboratorien befinden."* <sup>14</sup>

Um diese Uhren zu synchronisieren, muß man berücksichtigen, daß jedes Signal sich nur mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten kann und somit eine endliche Zeit benötigt, um einen Empfänger zu erreichen.

Nun wurden die Abstände zwischen den Atomuhren genau vermessen, sodaß man imstande war die Signallaufzeit zwischen den Uhren zu ermitteln.

Die gesendeten Zeitzeichen wurden aufgrund der bekannten Signallaufzeiten gemittelt. Dem im Empfänger dedektierten Zeitzeichen wird die Signallaufzeit abgezogen und dieser Wert für die Synchronisation der Uhr am Empfängerstandort herangezogen. Abstrakte Gleichzeitigkeit errechnet durch Signallaufzeit.

Befinden sich Sender und Empfänger auf der Erde, zum Beispiel auf einer angenommenen Distanz von 10.000 Kilometer so würde man, wie oben bereits beschrieben, unter der Annahme der Existenz eines Äthers die Laufzeit der Erddrehung berücksichtigen müssen, da sich die Erde im Äther bewegen würde.



**Bild 4.5** Gemäß der Äthertheorie sollten sich Radiosignale auf der Erde mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ausbreiten. Das Zeitsignal aus USA sollte z. B. mittags in Deutschland mit größerer Verzögerung eintreffen, als um Mitternacht.

Bild: Laufzeit und Erddrehung <sup>15</sup>

<sup>14</sup> Roman Sexl, Herbert Kurt Schmidt, Raum – Zeit – Relativität, Vieweg, Braunschweig 1990, S24

<sup>15</sup> ebd., Bild 4.5, Seite 26

Die von der Äthertheorie geforderte Abweichung des Zeitsignals konnte, wie bereits erwähnt, niemals gemessen werden.

Da kein Äther vorhanden ist, bildet die Erde somit ein eigenständiges Inertialsystem, in dem sich die maximale Signalausbreitung ohne Abweichung immer auf dem konstanten Niveau der Lichtgeschwindigkeit befindet.

Würde ein absolutes Inertialsystem unsere Wirklichkeit bestimmen, würden diese Abweichungen meßbar sein und es wären ständig wechselnde Abweichungen der Laufzeit der Zeitzeichen zu erwarten.

### *1.2.3.2: Beschleunigung und relativistische Zeitstruktur*

Betrachten wir sich bewegende Inertialsysteme in Relation zueinander, so erhält man den Effekt der Zeitdilatation, den Effekt der relativistischen Zeitdehnung innerhalb der speziellen Relativitätstheorie.

In einem Experiment, dessen Vorbereitungen im Europäischen Kernforschungszentrum CERN 1959 begannen <sup>16</sup> beschleunigte man Myonen in einem eigens dafür gebauten Speicherring von 14m Durchmesser.

Myonen sind den Elektronen ähnlich, nur daß ihre Masse das 207 fache von Elektronen beträgt. Die Zerfallszeit der Myonen beträgt in einem nicht beschleunigten Inertialsystem nur wenige millionstel Sekunden, sodaß von 10.000 erzeugten Myonen nach einer millionstel Sekunde nur mehr 6347 überbleiben.

Die Halbwertszeit der Myonen in diesem ruhenden Inertialsystem beträgt demnach 1,52  $\mu$  Sekunden

Im oben erwähnten CERN Experiment beobachtete man den Zerfall der Myonen im Beschleuniger. Man brachte die Myonen auf eine Geschwindigkeit, die bis auf 0,06% an die Lichtgeschwindigkeit heranreichte.

Die gemessene Halbwertszeit der beschleunigten Myonen dehnte sich auf 44,6  $\mu$  Sekunden.

Die Uhren beschleunigter Inertialsysteme verlangsamen sich mit dem Grad ihrer Beschleunigung.

---

<sup>16</sup> ebd., S43 ff

Betrachten wir einen hypothetischen Weltraumreisenden, der sich mithilfe zukünftiger Technologien mit  $v=12/13$  Lichtgeschwindigkeit fortbewegt und seine Weltraumreise im Alter von 20 Jahren beginnt. Eine weitere Annahme besteht darin, daß der Weltraumreisende einen Zwillingenbruder hat, welcher auf der Erde verblieben ist.

Die Uhr des Raumschiffes bestätigt dem Weltraumreisenden eine 20 jährige Reise durch den Weltraum, als er zur Erde zurückkehrte.

Durch die Geschwindigkeit seines Raumschiffes unterlag er erkennbar dem Effekt relativistischer Zeitdehnung, die Zeit verfloß im Raumschiff wesentlich langsamer, da sich Uhren bei lichtnahen Geschwindigkeiten deutlich verlangsamen.

Als der Weltraumreisende nun seinen Bruder wiedersah, war sein Bruder um 32 Jahre älter. [Zwillingsparadoxon der Relativitätstheorie]

Wäre uns diese Hochgeschwindigkeitstechnologie für Raumschiffe verfügbar, so könnte sich jeder darin Reisende auf eine Reise in die Zukunft der Erde begeben.

Würden diese Raumschiffe sich wesentlich näher als mit  $12/13$

Lichtgeschwindigkeit an der Lichtschränke befinden, so könnte ein Reisender in wenigen Monaten Jahrtausende in die Zukunft der Erde reisen.

Ob diese Reisenden in der Zukunft erfahren würden, wie sie in der Zeit zurückreisen können, bleibt jedoch ungewiß.

Der russische Physiker Georg Gamow <sup>17</sup> beschreibt in "Mr. Tompkins seltsame Reisen durch Kosmos und Mikrokosmos" einen schlafenden Mr. Tompkins, der bei einer öffentlichen Vorlesung über die Relativitätstheorie einschlieft und eine Stadt erträumte, deren alltägliche Geschwindigkeit sich nahe an der Lichtschränke befindet.

In seinem Traum fuhr er auf einem Fahrrad und ihm fiel auf, daß die Straßen kürzer geworden sind und der Polizist an der Ecke der dünnste Mann war, den er jemals sah.

*"Mein Gott!", rief Mr. Tompkins aufgeregt. "Jetzt verstehe ich, was dahinter steckt! Deshalb verwendet man also das Wort Relativität: Alles was sich relativ zu mir bewegt erscheint mir verkürzt..."<sup>18</sup>*

---

<sup>17</sup> Georg Gamow, Mr. Tompkins seltsame Reisen durch Kosmos und Mikrokosmos, Vieweg, Braunschweig, 1980, s3 ff

<sup>18</sup> ebd., S6

Als Mr. Tompkins vom Fahrrad abstieg, traf er einen Mann in einer Eisenbahneruniform und er stellte ihm eine Frage:

*"Würden Sie so liebenswürdig sein mein Herr", begann er zögernd, "und die Güte haben, mir zu sagen, wer dafür verantwortlich ist, daß die Fahrgäste im Zug soviel langsamer altern, als die Menschen die sich immer am selben Ort aufhalten?"*<sup>19</sup>

*"Ich bin dafür verantwortlich, sagte der Mann schlicht",  
... "ich bin nur ein einfacher Bremsen bei der Eisenbahn"  
... "...und jedesmal wenn der Zug seine Fahrt verlangsamt, altern die Fahrgäste des Zuges im Vergleich zu den übrigen Menschen langsamer."  
"Natürlich hat", fügte er bescheiden hinzu, "auch der Lokomotivführer, der den Zug beschleunigt, seinen Anteil an dem Unternehmen.""*<sup>20</sup>  
...seinen Anteil an der relativistischen Zeitdehnung.

---

<sup>19</sup> Georg Gamow, Mr. Tompkins seltsame Reisen durch Kosmos und Mikrokosmos, Vieweg, Braunschweig, 1980, S9

<sup>20</sup> ebd.

### 1.3.: Philosophische Partikel über die Struktur der Gegenwart

#### 1.3.1.: Kurt Gödel und das Paradox des Zeitverlaufes

Als philosophische Konsequenz gerät die Relativitätstheorie immer wieder in die "Umlaufbahn" der Parmenidischen Weltsicht, in der Bewegung nur als Schein verwirklicht ist.

Kurt Gödel gibt dafür folgende Argumente an:

*"Es scheint kurz gesagt, daß man [aus der Relativitätstheorie] einen eindeutigen Beweis für die Ansicht jener Philosophen erhält, die, wie Parmenides, Kant und die modernen Idealisten, die Objektivität des Wechsels leugnen und diesen als eine Illusion oder als eine Erscheinung betrachten, die wir unserer besonderen Art der Wahrnehmung verdanken. Die Argumentation ist folgende: Veränderung wird nur durch das Vergehender Zeit möglich. Die Existenz eines objektiven Zeitverlaufes aber bedeutet (oder ist zumindest äquivalent damit), daß die Realität aus unendlich vielen Schichten des "jetzt vorhandenen" besteht, die nacheinander zur Existenz gelangen. Wenn aber die Gleichzeitigkeit in dem oben geschilderten Sinne etwas Relatives ist, kann die Realität auf eine objektiv bestimmte Weise nicht in solche Schichten aufgespaltet werden. Jeder Beobachter hat seine eigene Reihe von solchen Schichten des "jetzt vorhandenen", und keines dieser verschiedenen Schichtensysteme kann das Vorrecht beanspruchen, den objektiven Zeitverlauf darzustellen." <sup>21</sup>*

Wirklichkeit immaterialisiert sich, wird idealistisch.

Eine Gegenüberstellung der beiden großen Wirklichkeitsinterpretationen erscheint wie eine Grenzlinie, an der auf einer der beiden Seiten der Idealismus steht und sich auf der anderen Seite die empirische Interpretation der Wirklichkeit befindet, wobei beide Seiten in ihrer Ergänzung grundsätzlich keine Vollständigkeit bilden können, sich einander ausschließen.

Kurt Gödel's Ansatz beschreibt eine Schleife, in der das Relative das Objektive ausschließt.

Relativität und vollständige, kausale Objektivität stehen demnach komplementär zueinander.

---

<sup>21</sup> Kurt Gödel, in Roman Sexl, Herbert Kurt Schmidt, Raum – Zeit – Relativität, Vieweg, Braunschweig, 1990, S186 [zitiert aus: Albert Einstein, Autobiographisches, in Schilpp 1949]

### 1.3.2.: Ein Partikel zu Erwin Schrödinger's Gegenwart des Bewußtseins

In Geist und Materie beschreibt Erwin Schrödinger die Struktur der Wirklichkeit, in dem er die empirischen Wissenschaften insofern kritisiert, daß das Subjekt der Erkenntnis innerhalb einer empiristisch verobjektivierbaren Weltsicht ausgeklammert wird.

*"Wir treten mit unserer Person zurück in die Rolle eines Zuschauers, der nicht zur Welt gehört, welche letztere eben dadurch zu einer objektiven Welt wird."* <sup>22</sup>

Schrödinger zentrierte seine Beschreibung und Interpretation der Wirklichkeit auf das Vorhandensein eines Subjektes.

*"Das Manifestwerden der Welt ist an sehr spezielle Vorgänge in sehr speziellen Teilen eben dieser Welt gebunden, nämlich an gewisse Vorgänge in einem Gehirn."* <sup>23</sup>

Es stellt sich natürlich die Frage, durch welche spezifischen Vorgänge innerhalb des Gehirns sich die Wirklichkeit manifestieren sollte.

*"Der Grund dafür, daß unser fühlendes, wahrnehmendes und denkendes Ich in unserem naturwissenschaftlichen Weltbild nirgends auftritt, kann leicht in fünf Worten ausgedrückt werden: Es ist selbst dieses Weltbild.*

*Es ist mit dem Ganzen identisch, und kann deshalb nicht als Teil darin enthalten sein."* <sup>24</sup>

Sogesehen kann Naturwissenschaft die eigentliche Wirklichkeit nicht beschreiben, es ist einzig und allein das Bewußtsein, welches dies vermöge, wenn es sich selbst beschreiben könnte.

Beschriebe das Bewußtsein die Wirklichkeit vollständig und könnte es sich transformieren, so läge alles Wirkliche in unseren Gedanken verborgen.

Gedanken und Information.

---

<sup>22</sup> Erwin Schrödinger, Geist und Materie, Zsolnay, Wien – Hamburg, 1986, S58

<sup>23</sup> ebd.; S9

<sup>24</sup> ebd.; S77

Die Vielheit der Bewußtseinssubjekte war für Schrödinger bloßer Schein, da es in Wahrheit nur ein Bewußtsein gäbe.

*"Ich wage, den Geist unzerstörbar zu nennen, denn er hat sein eigenes und besonderes Zeitmaß; nämlich er ist jederzeit jetzt.*

*Für ihn gibt es in Wahrheit weder früher noch später, sondern nur ein Jetzt, in das die Erinnerungen und die Erwartungen eingeschlossen sind."* <sup>25</sup>

Es ist als ob unser eigentliches empirisches Verständnis wiederum gespiegelt wird und in eine Weltsicht fließt, welche unserer alltäglichen Wirklichkeitsauffassung exakt widerspricht; wiederum treffen wir auf die komplementäre Form der Wirklichkeit.

Es sei angemerkt, daß Erwin Schrödinger einer komplementären Wirklichkeitsform wohl nicht zustimmen würde. Der ursprüngliche Grund für diese Auffassung findet sich im "strategischen" Ansatz innerhalb der Suche nach einer verobjektivierbaren Form der Wirklichkeit.

Die Subjektwirklichkeit von Erwin Schrödinger erkennt nur eine einmal gegebene Welt.

*"Urbild und Spiegelbild sind eins. Die in Raum und Zeit ausgedehnte Welt existiert nur in unserer Vorstellung."* <sup>26</sup>

Warum ist die Materie wie wir sie rezipieren dann dennoch von unserer Vorstellung unabhängig?

Warum können wir die Wirklichkeit nicht aus der Vorstellung heraus formen?

Sind wir die Einheit des Bewußtseins, würden wir die Wirklichkeit doch als zeitlose Einheit wahrnehmen, als "Bewußtseinsuniversum" in dem eine hyperdimensionale Einheit alle Wirklichkeit bildet.

Warum bildet sich der Schein der in ihrer Anzahl unendlichen zeitlichen Abläufe?

Doch wenn die Einheit diese Projektion benötigt, scheint diese Projektion der Einheit gleichwertig zu sein.

---

<sup>25</sup> Erwin Schrödinger, Geist und Materie, Zsolnay, Wien – Hamburg, 1986, S90/91

<sup>26</sup> ebd.; S92

Die Einheit des Bewußtseins kennt keine Komplexitätsgrade, die Operationalität aller physikalischen Vorgänge durch eine "Einheitsstruktur" wäre gleichermaßen komplex wie jeglicher Zusammenhang.

Einfache Ereignisse wären gleichbedeutend mit der raumzeitlichen Verankerung des Universums oder der Struktur eines allumfassenden Bewußtseins.

Lokale Erlebnisse des Subjektes entsprechen darin der Zusammensetzung der gesamten Wirklichkeit.

Ob es wohl eine Zeitmaschine der Einheit gibt, welche Zeit komplementär zur zeitlosen Einheit erzeugt?

Die Erzeugung der Zeit, um Zeitlosigkeit zu erhalten.

Die idealistische Weltdeutungen von Kurt Gödel und Erwin Schrödinger beschreiben die Wirklichkeit als die Wirklichkeit des Bewußtseins.

Tolerieren wir jedoch eine eine Wirklichkeit der Materie und eine Wirklichkeit des Bewußtseins, bilden sich demnach komplementäre, sich einander ausschließende Wirklichkeitsstrukturen.

Würden wir beide Wirklichkeitsbilder als wirklich definieren, so stellt sich die Frage nach der Möglichkeit der Übergänge, der Fluktationen und den hypothetischen Zusammenhängen.

Existieren wir isoliert in einer der beiden möglichen Wirklichkeiten oder löst sich die Komplementarität anhand einer Wirklichkeitsform, in der ein Ursprung der Wirklichkeit aus der Materie einem Ursprung der Wirklichkeit aus dem Bewußtsein gleichgesetzt ist?



*1.4.: Ein Ausflug in die unmittelbare Wirklichkeit des Makrokosmos.  
Größenverhältnisse im sichtbaren Universum*

Eine weitere Möglichkeit den Makrokosmos zu veranschaulichen ist die Größenordnung seiner räumlichen Dimensionierung darzustellen.

Unser vertrautes Bezugssystem bildet der Mesokosmos, ein Raumsystem, in der das mittlere Größenmaß ca. einen Meter beträgt, gleichgültig ob Millimeter oder Kilometer. Innerhalb dieses Bereiches vermögen wir mit den Raumgrößen zu kalkulieren, sie begegnen uns alltäglich.

Setzen wir den Sprung zum Makrokosmos, so ist es sinnvoll die Lichtgeschwindigkeit als "Maß der Dinge" zu etablieren.

Die Strecke einer Lichtsekunde beläuft sich auf etwa 299700 Kilometer.

Das ist im Mesokosmos eine beachtliche Strecke, welche etwa in 7,5 Erdumrundungen ausdrückbar ist, oder auch einer 400 stündigen Flugreise entspricht.

Eine Strecke, die ein Mensch in seiner Lebensspanne nur mit Mühe ohne technische Hilfsmittel bewältigen könnte.

Die "schnellsten Menschen", welche im Orbit die Erde umkreisen, schaffen die Lichtsekunde in immerhin etwa 10 Stunden.

Unser wissenschaftlich-technischer Fortschritt kann auch innerhalb der Metapher der Beschleunigung betrachtet werden, die Beschleunigung einer Schnecke; unsere Möglichkeiten im Makrokosmos betreffend.

Der kleinste von uns aus betrachtete Rahmen des Makroraums bildet unser Solarsystem.

Das erste stellare Nachbarobjekt ist unser synchronisierter Trabant, der Mond. Seine Entfernung liegt in etwa bei 400.000 Kilometer und damit wird die Lichtsekunde bereits übersprungen.

Das Zentralgestirn unseres solaren "Systems" , die Sonne, liegt je nach Bahnlage der Erde, im Mittel schon bei etwa 8 Lichtminuten Entfernung. Der Durchmesser unseres gesamten Solarsystems beträgt einige Lichtstunden.

Der Abstand zum nächsten Stern, zur nächsten Sonne, namens Proxima Centauri beträgt bereits 4,2 Lichtjahre. In dieser Entfernung läßt sich gegenwärtig empirisch knapp nicht mehr feststellen, ob ein Stern, wie z.B. Alpha Centauri A (1,09 Sonnenmassen) auch ein solares System beherbergt wie unsere Sonne. Eine herkömmliche "Mondrakete" würde mit ihren 11 Kilometer/Sekunden bereits über 100.000 Jahre benötigen, um einen Centauri Stern zu erreichen.

Der nächste weite Sprung in die Weiten des makrodimensionalen Zusammenhanges bringt uns auf die Ebenen der Galaxien und ihren Größenordnungen.

Der Durchmesser unserer spiralförmigen Galaxie der Milchstraße beträgt bereits 100.000 Lichtjahre, eine Strecke wofür eine "Mondrakete" bereits rund 2,7 Milliarden Jahre benötigen würde.

*"Die Sternbevölkerung unserer Galaxies wird auf etwas über 200 Milliarden geschätzt." <sup>27</sup>*

Zweihunderttausend Millionen Sterne, welche den "galaktischen Milchstraßen Event" bilden. Gäbe es einen "Nachrichtenkanal", der uns über die wichtigsten Ereignisse unserer Galaxie, bis "hinunter" zur Auflösung des Mesokosmos, täglich informieren könnte, welche "News" wären die Wichtigsten? <sup>28</sup>

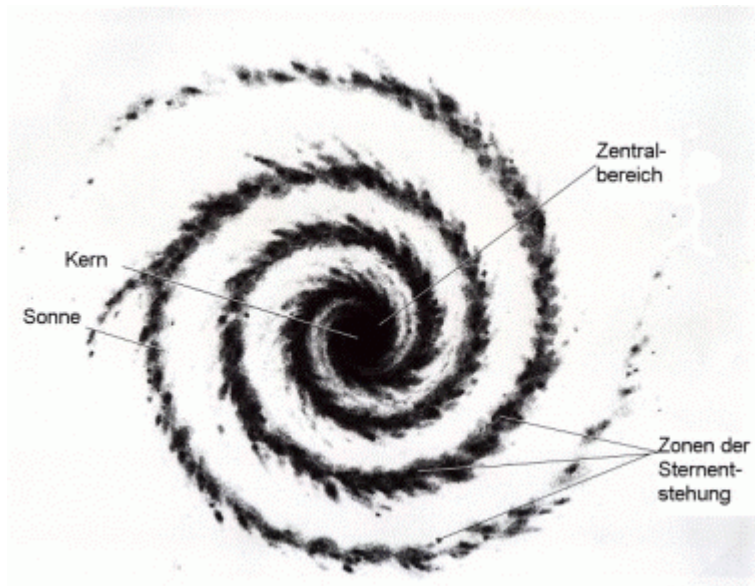
Betrachtet man unsere Galaxie in unserer alltäglichen Größenordnung, so bildet sie eine eigene Form der Unendlichkeit.

Wieviele Planeten wohl in einem für Leben geeigneten Abstand, der sogenannten vegetativen Zone, ihre Sterne umkreisen?

---

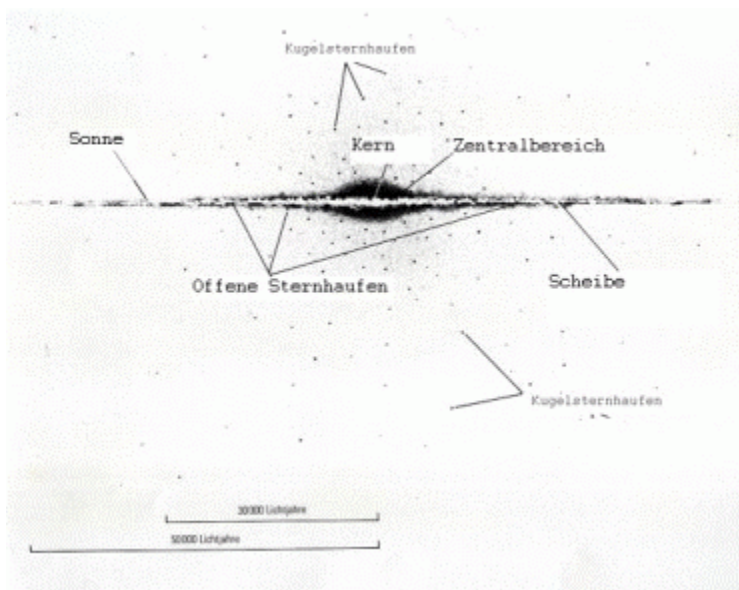
<sup>27</sup> Thimoty Ferris, Galaxien, Birkhäuser, Basel, 1996, S24

<sup>28</sup> (Abgesehen von den Scherzen über jene welchen diesen Kanal nicht empfangen können.)

Bild: Milchstraße I <sup>29</sup>

Betrachten wir wiederum unser Solarsystem, so befindet sich unsere Sonne an einem unspektakulären Ort in der "Nähe" eines der großen Spiralarme unserer Galaxie, dem sogenannten "Orion Arm", etwa 30.000 Lichtjahre vom galaktischen Zentrum entfernt.

Unsere Galaxie dreht sich wie ein Windrad um sich selbst, für eine Umrundung um den Zentralbereich der Milchstraße benötigt die Sonne etwa 220 Millionen Jahre.

Bild: Milchstraße 2 <sup>30</sup>

<sup>29</sup> Abb. aus Timothy Ferris, Galaxien, Birkhäuser, Basel, 1996, S 22

<sup>30</sup> ebd, S 23

Erweitern wir unsere Betrachtungsebene auf mehrere hunderttausend Lichtjahre, so erkennen wir zahlreiche kleinere Galaxien in der Nähe der Milchstraße.

Die uns nächsten Galaxien sind die Magellanschen Wolken.

LMC (Large Magellanic Cloud) und SMC (Small Magellanic Cloud).

Die Große Magellansche Wolke ist etwa 150.000 Lichtjahre von uns entfernt und beherbergt etwa 15 Milliarden Sterne, während die Kleine Magellansche Wolke etwa 5 Milliarden Sterne zählt.

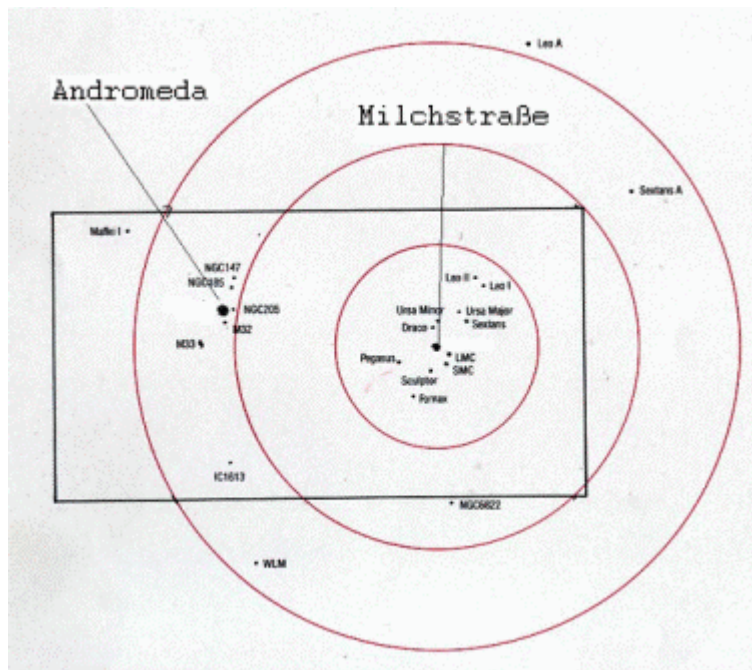
Der folgende makroskopische Sprung bezieht sich auf die Größenordnung von einigen Millionen Lichtjahren rund um die "Milky Way".

Dieser Zusammenhang wird als **Lokale Gruppe** beschrieben.

Die größten darin enthaltenen Objekte sind die Milchstraße selbst und ihre "Schwesterngalaxie" die Andromeda, welche wiederum kleinere Galaxien in ihrer Nachbarschaft sammelt.

Andromeda ist mit ca. 150.000 Lichtjahren Durchmesser etwas größer als die Milchstraße; ihre Entfernung zu uns beträgt bereits 2,25 Millionen Lichtjahre.

Bild: Lokale Gruppe <sup>31</sup>



<sup>31</sup> Abb. aus Timothy Ferris, Galaxien, Birkhäuser, Basel, 1996, S84

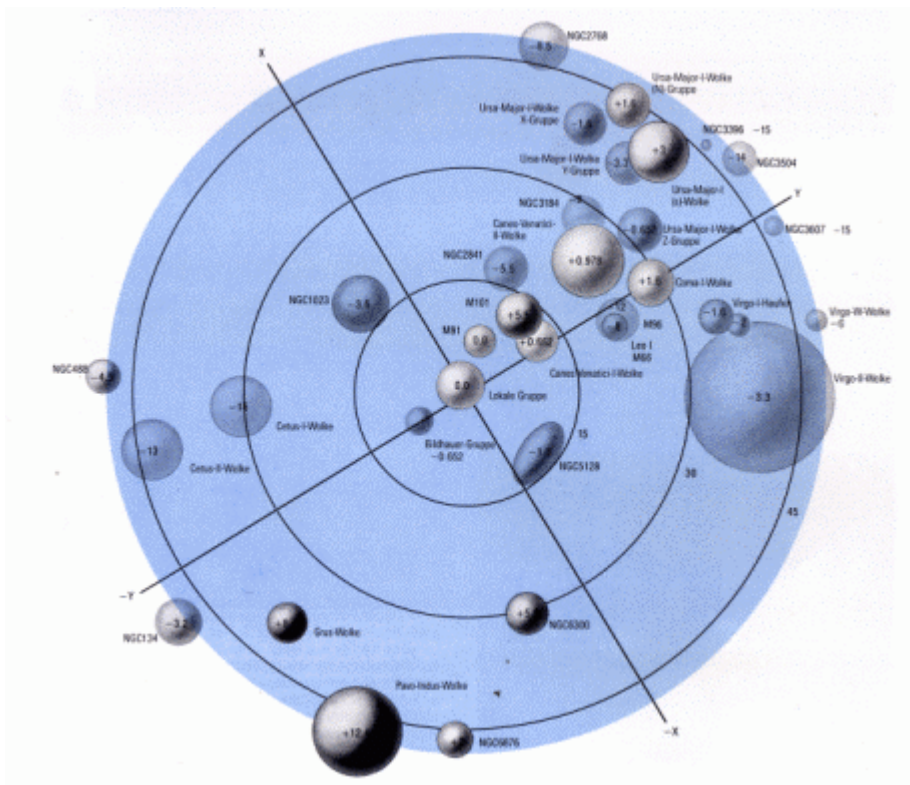
Die lokale Gruppe bildet einen Galaxienhaufen mit einigen dutzend Galaxien. Galaxienhaufen besitzen durchschnittliche Durchmesser von etwa 30 – 40 Millionen Lichtjahren.

Innerhalb dieser Vorstellungsebene bleibt uns nur mehr das Zusammenfassen von Galaxien, die Größe des Rahmens verwischt längst einzelne Sternsysteme.

Die mächtigen Galaxien unseres Haufens sind also unsere Milchstraße und die Andromeda.

Angesichts dieser Größenordnungen erscheint unsere Erde mikroskopisch klein und es scheint verwunderlich, daß unser Aufenthaltsort tatsächlich in diese "unüberblickbare" Riesenhaftigkeit eingebettet sein soll.

Bild: Galaxienhaufen <sup>32</sup>



<sup>32</sup> Abb. aus Timothy Ferris, Galaxien, Birkhäuser, Basel, 1996, S153

Galixienhaufen werden wiederum in Superhaufen zusammengefaßt, deren Struktur sich über hunderte (300-400) Millionen Lichtjahre erstreckt.

*"Die lokale Gruppe ist ein kleiner Galixienhaufen am Rande des lokalen Superhaufens. (...) Der Superhaufen besteht aus einem konzentrierten Kern, der als Virgohaufen bezeichnet wird, und einer ausgedehnten Korona, zu der die lokale Gruppe und ihre benachbarten Gruppen gehören."* <sup>33</sup>

Der oben erwähnte "milchstraßeninterne Nachrichtenkanal" ist im Superhaufengefüge zum unbedeutenden "Lokalsender" geschrumpft. "Lokalnachrichten" für bloß 200 Milliarden Stern- und Solarsysteme verglichen mit den dutzenden Billionen Sternen der Superhaufen.

Superhaufen sind die größten im Universum bekannten Gebilde, zwischen ihnen bilden sich große Leerräume, sogenannte "voids".

Die Anordnung der Superhaufen formt eine "wabenartige Struktur" aus.

Einige dieser Superhaufen werden wiederum von etwas angezogen, was in der Astronomie als "großer Attraktor" bekannt ist.

Um die Größenverhältnisse im Universum wirklich modellieren zu können müßten wir wissen ob es sich um einen großen Attraktor handelt oder ob es, wenn auch mit geringer Wahrscheinlichkeit, weitere große Attraktoren gibt.

Unser Universum wird auf eine Größe von 10 - 15 Milliarden Lichtjahre geschätzt, selbst ein Superhaufen erscheint darin noch klein.

Natürlich hat diese Geschichte hiemit kein Ende, wenn man berücksichtigt, daß es Theorien von "Multiversen" gibt, in denen ein Universum eine "Einzelstruktur" in einem "Strukturgefüge" bildet.

Dehnt sich unser Universum mit Lichtgeschwindigkeit aus, so könnte man sich dem "Rand" des Universums nicht annähern.

Lichtgeschwindigkeit "vernetzt" unsere Wirklichkeit.

---

<sup>33</sup> Thimoty Ferris, Galaxien, Birkhäuser, Basel, 1996, S 151

## 2. Quantenschleife

### 2.1.: Die mikrokosmische Basis der physikalischen Wirklichkeit

*" In der Newton´schen Mechanik, in welcher der Zustand eines Systems materieller Körper durch ihre augenblicklichen Lagen und Geschwindigkeiten bestimmt ist, war es möglich, mit Hilfe der bekannten einfachen Grundsätze, ausgehend von der Kenntnis des Zustandes eines Systems zu einer gegebenen Zeit und der auf die Körper einwirkenden Kräfte, den Zustand des Systems zu jeder anderen Zeit eindeutig zu bestimmen.*

*Es zeigte sich, daß eine derartige Beschreibung, die offensichtlich eine ideale Form kausaler Beziehungen darstellt, ausgedrückt durch den Begriff Determinismus, eine noch größere Reichweite hat." <sup>34</sup>*

Eine Theorie welche eine perfekte Bestimmung der Wirklichkeit ermöglichen sollte. Wirklichkeit wird in der deterministischen Interpretation zur kausalen Eindeutigkeit aller Ereignisse.

Eine perfekt deterministische Struktur, ein perfekt deterministisches Uhrwerk, eine "Einheitsschleife" von Wirkung und Ursache.

Das deterministische Konzept bildet, in welcher Form auch immer, eine eindeutig kausale Verknüpfung von Zuständen.

Diese Form der Kausalität sollte die Wirklichkeit als vollständig beschreiben.

Am Ende des 19. Jahrhunderts glaubte man deshalb, sich kurz vor der Vollendung der Physik zu befinden; nur mehr das Regelwerk präzisieren zu müssen.

*Als Max Planck, der Begründer der Quantentheorie... " noch nicht recht wußte, ob er Physik studieren sollte oder nicht, wandte er sich an den Münchner Physikprofessor Phillip von Jolly. Dieser teilte ihm mit, dass in der Physik alles Wesentliche bereits erforscht sei und es nur noch darum ginge einige wenige Details zu klären." <sup>35</sup>*

---

<sup>34</sup> Niels Bohr, Atomphysik und menschliche Erkenntnis, Vieweg, Braunschweig 1985, S104-105

<sup>35</sup> Anton Zeilinger, Einsteins Schleier – Die neue Welt der Quantenphysik, Verlag C.H.Beck, München 2003, S15

Das Blatt begann sich jedoch gegen die klassische Physik zu wenden.

Durch die im Grunde dennoch weitgehend deterministische Relativitätstheorie von Albert Einstein verlor die klassische Physik bereits den absoluten Raum und damit die Grundlage eines vereinheitlichbaren physikalischen Inertialsystems.

Die Beibehaltung dieser Kausalität beschrieb Niels Bohr in folgender Weise.

*"Obgleich bei dieser Formulierung mathematische Abstraktionen wie eine vierdimensionale nicht-euklidische Metrik verwendet werden, beruht die physikalische Deutung für jeden Beobachter auf der üblichen Trennung zwischen Raum und Zeit und hält den deterministischen Charakter der Beschreibung aufrecht"* <sup>36</sup>

Obwohl in Einsteins Theorie ein vereinheitlichbares Inertialsystem wegfällt, ist die Struktur des Raum–Zeitgefüges in einer Lokalisierbarkeit vereinzelbarer, vollständiger Geschehnisse, der "Events" eingebunden.

Gilt in der Newton'schen Physik für einen vereinheitlichbaren Beobachter die Trennung zwischen Raum und Zeit, so gilt diese Trennung in der Relativitätstheorie von Einstein nur mehr für einen spezifischen Beobachter.

Bereits am 14.12.1900, noch vor der Veröffentlichung der speziellen Relativitätstheorie, erfolgte ein Vortrag von Max Planck vor der deutschen physikalischen Gesellschaft, in dem er seine Strahlungsformel darstellte.

Es folgte ein Aufbrechen deterministischer Physik.

Schwingung und Energie gerieten in Asymmetrie.

Bei der Erforschung der Wärmestrahlung erhoffte man, auf ein einfaches Phänomen zu treffen, auf eine kausal lineare Verbindung zwischen Wärme und Strahlungsmenge.

*"Um die Jahrhundertwende war das Problem aufgetaucht, die Strahlung eines schwarzen Körpers zu beschreiben. Zwei Theorien existierten bereits, das Wien'sche Verschiebungsgesetz, das nur im Bereich hoher Frequenzen richtige Ergebnisse liefert, und das Rayleigh Jeans Gesetz, das wiederum nur im Bereich niedriger Frequenzen gültig ist. Es war nicht gelungen eine einheitliche Beschreibung für den gesamten Frequenzbereich zu formulieren."* <sup>37</sup>

---

<sup>36</sup> Niels Bohr, Atomphysik und menschliche Erkenntnis, Vieweg, Braunschweig 1985, S105

<sup>37</sup> Birgit Dopfer, Zwei Experimente zur Interferenz von Zwei-Photonen Zuständen, Ein Heisenbergmikroskop und Pendellösung, Universität Innsbruck, Diss., 1998



Max Planck wollte eine einheitliche, eine deterministische Beschreibung zur Lösung dieses Problems erstellen; eine Erklärung, welche in einer vereinheitlichten Form den gesamten Frequenzbereich der Wärmestrahlung abdeckt.

*" Was mich in der Physik von jeher vor allem interessiert, waren die großen allgemeinen Gesetze, die für sämtliche Naturvorgänge Bedeutung besitzen, unabhängig von den Eigenschaften der an den Vorgängen beteiligten Körper. "* <sup>38</sup>

Um sein Vorhaben zu verwirklichen, versuchte Planck, das Strahlungsproblem auf eine atomare Betrachtungsweise zu reduzieren.<sup>39</sup>

Aufgrund sehr genauer Messungen des Spektrums der Wärmestrahlung, die von Curlbaum und Rubens durchgeführt worden sind, versuchte Planck diese Ergebnisse in eine theoretische Beschreibung zu fassen.

Er stieß auf eine Formel, in der er die Strahlung für den kurz- und langwelligen Bereich erklären konnte, dies jedoch nur unter der Annahme, daß zu jeder Frequenz von Schwingung nur diskrete Energiewerte zugeordnet werden konnten.

Die Sprunghaftigkeit resultiert aus der Tatsache, daß Emission und Absorption auf ein kleinstes "Energiepaket" beruhen, welches das Planck'sche Wirkungsquantum darstellt.

Jeglicher Energieaustausch, jegliche Dynamik beruht auf einem Vielfachen von  $h = 6.6 \cdot 10^{-34}$  Js.

Die Planck'sche Formel lautet demnach  $E=h \cdot \nu$

[E = Energie, h = das Wirkungsquantum und  $\nu$  = die Frequenz des Lichtes.]

Energie ist ein Vielfaches des Wirkungsquantums multipliziert mit der Frequenz der Strahlung.

Planck mußte erkennen, daß seine Beschreibung von der Thermodynamik der Strahlung sich innerhalb der klassischen Mechanik als unerklärbar erwies.

Energieaustausch kann darin nur in Quanten, in diskreten "Paketen" ausdrückbar sein.

---

<sup>38</sup> Max Planck "Zur Geschichte der Auffindung des physikalischen Wirkungsquantums" Bd.3, S.255.  
Zitiert aus: "...ich dachte mir nicht viel dabei...", Plancks ungerader Weg zur Strahlungsformel, Domenico Giulini und Norbert Straumann, Oktober 2000, arXiv:quant-ph/0010008

<sup>39</sup> Werner Heisenberg: Quantentheorie und Philosophie, Reclam, Stuttgart, 2000, S2-5

Max Planck war sich seiner Entdeckung lange Zeit unsicher, was er auch in seiner vielfach zitierten Nobelpreisrede zum Ausdruck brachte.

*"[...] entweder war das Wirkungsquantum nur eine fiktive Größe; dann war die ganze Deduktion des Strahlungsgesetzes prinzipiell illusorisch und stellte weiter nichts vor als eine inhaltsleere Formelspielerei, oder aber der Ableitung des Strahlungsgesetzes lag ein wirklich physikalischer Gedanke zugrunde; dann müßte das Wirkungsquantum in der Physik eine fundamentale Rolle spielen, dann kündigte sich mit ihm etwas ganz Neues, bis dahin Unerhörtes an, das berufen schien, unser physikalisches Denken, welches seit der Begründung der Infinitesimalrechnung durch Leibnitz und Newton sich auf der Annahme der Stetigkeit aller ursächlichen Zusammenhänge aufbaut, von Grund auf umzugestalten."* <sup>40</sup>

Max Planck gelang es, die Basis der Wechselwirkung zu bestimmen, er fand die Wechselwirkungskonstante, welche die Interaktionsbasis des "Energie-Materie-Ausstausches" bildet.

Da die Wechselwirkung zwischen Energie und Materie in einem zeitlichen Rahmen eingebunden ist, konnte man die daraus resultierende "Planck-Zeit" errechnen. Aufgrund des Wirkungsquantums macht es keinen Sinn, von Zeiträumen kleiner der "Planck-Zeit" zu sprechen, demnach stellt eine Zeitspanne von  $10^{-43}$  Sekunden den kleinstmöglichen Zeitpartikel der Wirklichkeit dar.

Diese kleinste "Zeitspanne" ist als "Planck Ära" benannt, in ihr formt sich die "frühe Wirklichkeit", der Beginn der Zeit ist nun in einem allumfassenden Sinne festgelegt. Die Planckzeit ist der elementare Baustein des Maßes zeitlicher Wirklichkeit, der Basispuls der Zeit.

Die Zeitspanne der Planck Zeit ermöglicht wiederum die Berechnung einer kleinsten räumliche Ausdehnung von  $10^{-35}$  Meter, welche der Quantenfluktation im Vakuum entspricht.

Aufgrund der Planck'schen Maße finden wir uns auf einer neuartigen Grundlage der Wirklichkeitsbetrachtung wieder. Die Struktur des kleinstmöglichen Events, der kleinstmöglichen Ausformung von Wirklichkeit.

---

<sup>40</sup> Max Planck: Die Entstehung der bisherigen Entwicklung der Quantentheorie. In: Vorträge und Erinnerungen. 5. Aufl. der "Wege zur physikalischen Erkenntnis". Volksausgabe. Stuttgart 1949, S125-138. Zitiert aus: Elisabeth Emter: Literatur und Quantentheorie, Die Rezeption der modernen Physik in Schriften zur Literatur und Philosophie deutschsprachiger Autoren (1925-1970), de Gruyter, Berlin – New York, 1995. Zugl.: Berlin, Univ. Diss., 1994

Durch die Verunmöglichung der Unterschreitung dieser kleinstmöglichen Struktur wird die Grenze des Mikrokosmos erreicht, somit kann die Form der minimalsten Struktur des Weltalls abstrahiert werden

In Relation zur klassischen Interpretation der Physik schreibt Niels Bohr:

*" Eine neue Epoche der physikalischen Wissenschaft wurde mit Plancks Entdeckung des elementaren Wirkungsquantums eingeleitet, das einen neuen, den atomaren Prozessen innewohnenden Ganzheitszug enthüllte, der weit über die alte Vorstellung von der begrenzten Teilbarkeit der Materie hinausgeht. Es wurde damit klar, daß die anschauliche Darstellung der klassischen physikalischen Theorien eine Idealisierung ist, die nur für Phänomene gilt, bei deren Analyse alle in Betracht kommenden Wirkungen genügend groß sind, um die Vernachlässigung des Wirkungsquantums zu gestatten." <sup>41</sup>*

Die Quantenmechanik wird somit zentral in der Deutungsdebatte des Weltmodelles darstellbarer Wirklichkeit.

---

<sup>41</sup> Niels Bohr, Atomphysik und menschliche Erkenntnis, Vieweg, Braunschweig 1985, S105

## 2.2.: *Quantensprung und Philosophie*

Die Philosophie wurde lange Zeit als "erste Wissenschaft" interpretiert; eine Wissenschaft deren eigentliches Ziel es ist, die Struktur der Welt darzulegen. Die durch die Quantenmechanik entstehenden erkenntnistheoretischen Folgen, erweist es sich als äußerst subtil, eine Quantenphilosophie oder gar eine "Kant'sche Philosophie der Quantenmechanik" zu etablieren.

Carl Friedrich von Weizsäcker meint daher, daß die tradierten philosophischen Modelle Tribut an die moderne Physik zollen müßten.

*„Nicht die Quantentheorie hat sich nach dieser Überzeugung vor dem Gerichtshof überlieferter Philosophien zu verantworten, sondern diese Philosophien haben sich in einem selbst philosophischen Prozeß zu verantworten, in dem die Quantentheorie als Zeuge auftritt.“*<sup>42</sup>

Quantentheorie und Philosophie formen nun eine Korrelation, eine gegenseitige Wechselwirkung, sie sind an bestimmten Punkten miteinander verbunden. Maßgeblich wird die Quantentheorie in der Philosophie, wenn die philosophische Abhandlung sich mit "philosophischer Grundlagenforschung" beschäftigt, sich mit den erkenntnistheoretischen Grundlagen raumzeitlicher Wirklichkeit auseinandersetzt; sich mit der Wirklichkeit der Dinge beschäftigt. Die bestehenden Erkenntnisse über die "Quantenwirklichkeit" müssen und können nicht auf alle Bereiche der Philosophie angewendet werden; so wäre es aufgrund heutiger Kenntnisse, inklusive die der Physik, nicht möglich oder sinnvoll, eine "quantentheoretische Ethik", eine "quantentheoretische Geschichtsphilosophie" usw. aufzubauen.

Die Philosophie muß jedoch an der Erforschung der Grundlagen der Wirklichkeit einen Anteil haben; diese Intention kann für die Philosophie am besten verwirklicht werden, wenn sie die besten wissenschaftlichen Strategien reflektiert und selbst Strategien ausformt, die zu den besten wissenschaftlichen Strategien zählen.

---

<sup>42</sup> Carl Friedrich von Weizsäcker, Aufbau der Physik, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co.KG, München, 1994, S490

Erkenntnis und physikalische Wirklichkeit formen demnach ein Modell der Kooperation. Die philosophische Reflexion der Quantentheorie formt eine "Quantenphilosophie" der Wirklichkeitsbetrachtung; ein kooperatives Modell der "Wechselwirkung" von Geistes- und Naturwissenschaft, welche einen reduktiv vereinheitlichbaren Kausalitätszusammenhang einer metaphysischen Einheit überwindet.

So ist letztendlich auch die Quantentheorie nicht vollständig vereinheitlichbar. Dies spricht jedoch in paradoxer Weise für die Quantentheorie. Das Zeugnis der Quantentheorie ist die notwendige Unvollständigkeit lokalisierbarer Wirklichkeit.

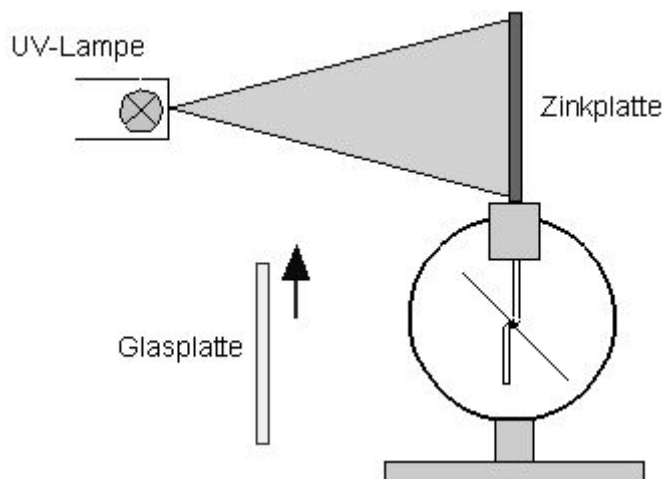
### 2.3.: Die Zweiteilung von Welt oder die Dualität der Photonen

Die Planck'sche Hypothese wurde von Albert Einstein auf das Licht angewandt, indem er das Licht als aus Lichtquanten bestehend interpretierte, daraus entstand seine Lichtquantenhypothese von 1905.

*„Die Energie des einzelnen Lichtquantums sollte, in Übereinstimmung mit Planks Annahmen, gleich sein dem Produkt aus der Frequenz des Lichtes und der Planck'schen Konstante.“*<sup>43</sup>

Am Anfang dieser Entwicklung stand der 1887/88 von Heinrich Hertz und W. Hallwachs entdeckte äußere photoelektrische Effekt, welcher zu jener Zeit der allgemein anerkannten Interpretation des Lichtes als Welle widersprach.

Dieser Effekt beschreibt die Freisetzung von Elektronen aus Metall, sofern eine Bestrahlung mit hochenergetischen Licht (z.B. aus einer UV Lampe stammend) erfolgt.



Um die oben abgebildete Versuchsanordnung<sup>44</sup> genauer zu betrachten zu können, sollte erklärt sein, daß sich unterhalb der Zinkplatte ein Elektroskop befindet, mit welchem die Platte elektrisch negativ aufgeladen wird.

Mit Einschalten der UV – Lampe wird die Zinkplatte rasch entladen; die Elektronen werden aus der Metalloberfläche herausgeschleudert.

Wird hingegen eine Glasplatte zwischen UV – Strahl und Zinkplatte eingebracht, so entlädt sich die Platte nicht, da das UV Licht vom Glas absorbiert wurde.

<sup>43</sup> Werner Heisenberg, Quantentheorie und Philosophie, Philipp Reclam jun. GmbH&Co, Stuttgart, 1979, S6

<sup>44</sup> Abb. aus Rainer Müller und Hartmut Wiesner: Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik, Qualitativer Basiskurs, S1, e-mail: rainer.mueller@physik.uni-muenchen.de

Der Wellentheorie des Lichts zufolge würde das Herausschleudern der Elektronen durch die elektrische Feldstärke bedingt sein, sodaß bei einer Erhöhung der Lichtintensität auch die elektrische Feldstärke dementsprechend erhöht und somit in der Lage sein müßte, Elektronen auch unter der Einwirkung sichtbaren Lichtes aus der Zinkplatte herauszuschleudern.

Im Experiment bestätigte sich jedoch, daß unter der Einwirkung sichtbaren Lichtes auch unter hoher Intensität keine Elektronen aus der Metallplatte gelöst werden können, wobei unter hochfrequentem UV – Licht schon bei niedrigen Intensitäten Elektronen freigesetzt werden.

Um den Photoeffekt erklären zu können, muß die Vorstellung der Wellennatur des Lichtes in die Vorstellung einer Teilchennatur des Lichtes transformiert werden.

Albert Einstein betrachtete die wellentheoretische Auffassung des Lichtes, als auf zeitliche Mittelwerte rückbezogen, sodaß die :

*"...Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahls die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als ganze absorbiert oder erzeugt werden können."* <sup>45</sup>

Einstein gelang es in weiterer Folge, monochromatische Strahlung von geringer Dichte in Beziehung mit dem Planck'schen Wirkungsquantum zu bringen. Die von ihm postulierten Lichtquanten sind darin (wie oben zitiert) in Übereinstimmung mit Planck's Annahme, als Produkt aus der Frequenz des Lichtes und der Planck'schen Konstante.

*"Er wagte dann den Begriff des Lichtquants, eines physischen Trägers der Planck'schen Energiequanten, einzuführen."* <sup>46</sup>

Das Lichtquantteilchen existierte nun in einer Dualität zu den Welleneigenschaften des Lichts.

---

<sup>45</sup> Roman Sexl, Baumann Kurt: Die Deutungen der Quantentheorie, Braunschweig – Wiesbaden, 1984, S5

<sup>46</sup> Carl Friedrich von Weizsäcker, Aufbau der Physik, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co.KG, München, 1994, S277

Die Teilcheneigenschaft des Lichts betrachtete Einstein als Träger der Energie, welche von einem ausgedehnten Wellenfeld umgeben schien.

Die Radikalität dieses Dualismus war Einstein durchaus bewußt, doch er hoffte bei grundlegender Erforschung des "Dualismus – Phänomens" auf eine kausal erklärbare Grundstruktur zu stoßen.

*"All meine Versuche, das theoretische Fundament der Physik diesen Erkenntnissen anzupassen, scheiterten aber völlig. Es war, wie wenn einem der Boden unter den Füßen weggezogen worden wäre, ohne daß sich irgendwo fester Grund zeigte, auf dem man hätte bauen können."* <sup>47</sup>

Einstein erzeugte eine Paradoxie, die sich in der klassischen Mechanik als unerklärbar erwies.

*„...die Einsteinsche Fassung der Quantentheorie hatte zu einer Beschreibung des Lichtes geführt, die völlig verschieden war von der seitens Huyghens üblichen Wellenvorstellung. Licht konnte also entweder als eine elektromagnetische Wellenbewegung gedeutet werden, so wie es seit Maxwells Arbeiten und Hertz' Experimenten angenommen wurde, oder als bestehend aus einzelnen >>Lichtquanten<< oder >>Energiepacketen<<, ...“* <sup>48</sup>

In den Worten von Georg Gamov:

*„Um diese Krise zu meistern, mußten die Physiker die eigenartige Vorstellung akzeptieren, daß das Licht zu ein und demselben Zeitpunkt, sowohl Wellen als auch Teilcheneigenschaften hat.“* <sup>49</sup>

---

<sup>47</sup> Albert Einstein, Autobiographisches, in Schilpp 1949, S44  
zitiert aus: Carl Friedrich von Weizsäcker: Aufbau der Physik, Carl Hanser Verlag, München, 1994, S277

<sup>48</sup> Werner Heisenberg, Quantentheorie und Philosophie, Philipp Reclam jun. GmbH&Co, Stuttgart, 1979, S7

<sup>49</sup> George Gamov, Die Unbestimmtheitsrelation, in Quantenphilosophie, Spektrum, Akad. Verlag, Heidelberg, 1996, S34



Der Welle – Teilchen Dualismus, wie Einstein ihn interpretierte, war die Vorstellung, daß Teilchen exakt lokalisierbare Objekte darstellen und Wellen prinzipiell den ganzen Raum erfüllen.

*"Hierbei wurde die Räumlichkeit aller physikalischen Objekte noch als selbstverständlich vorausgesetzt." <sup>50</sup>*

"Welle" und "Teilchen" begannen sich innerhalb unserer Wirklichkeitsbetrachtung bereits voneinander auszuschließen.

In sich verkehrende Bahnen.

---

<sup>50</sup> Carl Friedrich von Weizsäcker: Aufbau der Physik, Carl Hanser Verlag, München, 1994, S491

## 2.4.: Ein Partikel über die experimentelle Grundlagen der Quantenmechanik

Um einfachste Grundlagen der experimentellen Quantenmechanik verstehen zu können, benötigen wir vorerst ein wenig Einblick über die Funktionsweise der einzelnen Teile einer quantenexperimentellen Meßanordnung.

### 2.4.1: Beam Splitter

Einer der grundlegenden Bestandteile eines Photonenexperiments ist ein halbdurchlässiger Spiegel, auch Strahlteiler oder Beam Splitter genannt.

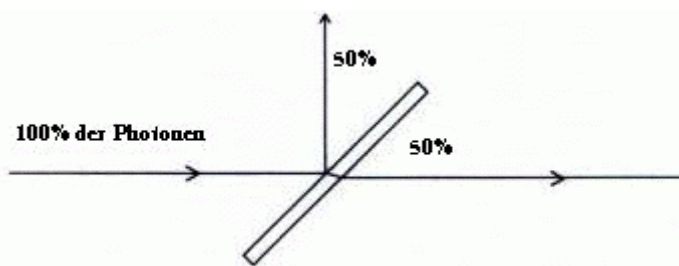


Bild: Verhalten des Lichtes am Strahlteiler <sup>51</sup>

Senden wir Licht unter einen Winkel von  $45^\circ$  auf einen solchen Strahlteiler, so wird das Licht zu 50% durchgelassen und zu 50% reflektiert.

Ordnet man nun 2 Strahlteiler in einer Linie, so kann man feststellen ob, das Licht, welches durch den ersten Strahlteiler nicht reflektiert wird eine besondere Eigenschaft besitzt.

Würde es eine solche Eigenschaft besitzen; z.B. die Eigenschaft: "Lichttyp A wird vom Strahlteiler durchgelassen", so müßte dieses Licht den 2. identischen Strahlteiler zu 100% durchlaufen können.

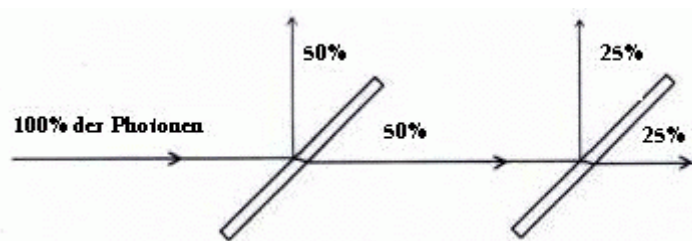


Bild: Verhalten des Lichtes am Strahlteiler (in doppelter Anordnung) <sup>52</sup>

<sup>51</sup> Von mir modifizierte Abb. aus Rainer Müller und Hartmut Wiesner: Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik, Qualitativer Basiskurs, S9, e-mail: rainer.mueller@physik.uni-muenchen.de

<sup>52</sup> Ebenfalls modifizierte Abb., ebd., S10

Das Versuchsergebnis zeigt uns jedoch, daß Licht welches von einem Strahlteiler nicht reflektiert wird, keine besonderen Eigenschaften aufweist, da es vom 2. Strahlteiler ebenso gesplittet beziehungsweise reflektiert wird.

Andererseits sehen wir in der Vorbereitung zur Erklärung einfacher Schemata von Quantenexperimenten, daß bestimmte Photoneneigenschaften "gefiltert" und dadurch bestimmt werden können.

#### 2.4.2.: Polarisationsfilter

Ein Polarisationsfilter ist ein Werkzeug wodurch die Schwingungsebene der Photonen feststellbar wird.

Wir unterscheiden 2 Schwingungsebenen von Photonen; wie im Bild unten ersichtlich schwingt das Licht entweder auf der Ebene einer Fläche, oder vertikal zu einer Fläche.

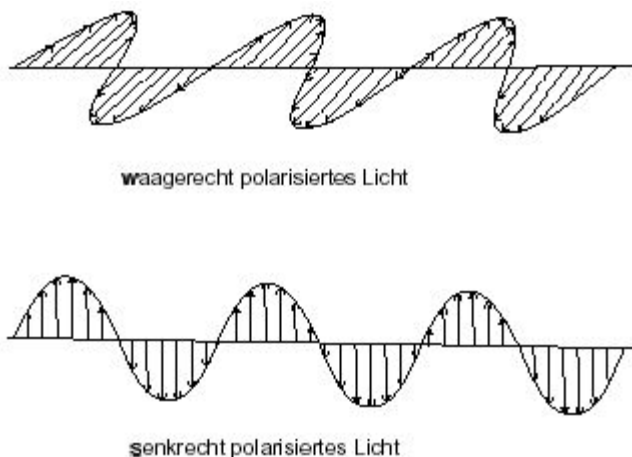


Bild: Formen der Polarisation <sup>53</sup>

Ein Polarisationsfilter versetzt uns demnach in die Lage, je nach Einstellung der Winkel eine bestimmte Polarisation des Lichtes "durchzulassen".

(siehe Bild unten)

<sup>53</sup> Abb. aus Rainer Müller und Hartmut Wiesner: Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik, Qualitativer Basiskurs, S12, e-mail: rainer.mueller@physik.uni-muenchen.de

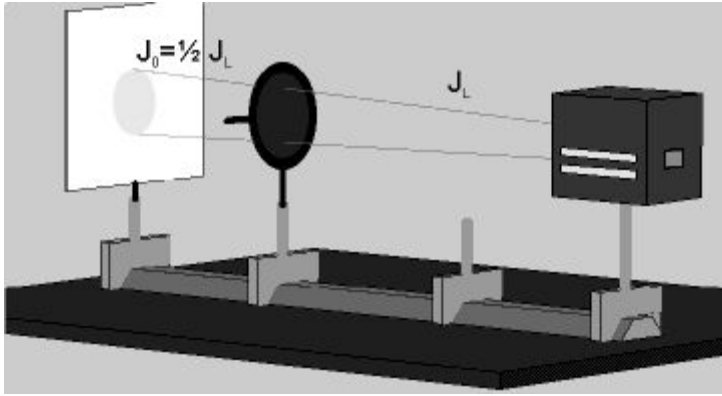


Bild: Polarisationsfilter und Schirm <sup>54</sup>

Ist der Polarisationsfilter auf  $0^\circ$  eingestellt, wird nur horizontal polarisiertes Licht durch den Filter fließen (wie oben im Bild zu sehen); d.h. vertikal polarisiertes Licht kann den Filter nicht passieren.

Wird nur vertikal polarisiertes Licht durch den Filter dringen, so ist der Polarisationsfilter auf  $90^\circ$  eingestellt.

Wird ein Filter auf  $0^\circ$  oder  $90^\circ$  eingestellt, so werden analog zum Modell der Strahlteiler nur 50% des Lichtes durchgelassen.

Würden 2 Polarisationsfilter in die Lichtlinie gebracht, wobei ein Filter auf  $0^\circ$  eingestellt ist und der andere auf  $90^\circ$  würde dies, wiederum analog zum Strahteiler, bedeuten, daß 25% der Photonen auf den Schirm treffen würden.

Da die Polarisationsausrichtung jedoch eine Eigenschaft des Lichtes darstellt, wird bei diametraler Einstellung der Filter kein Photon auf den Schirm auftreffen.

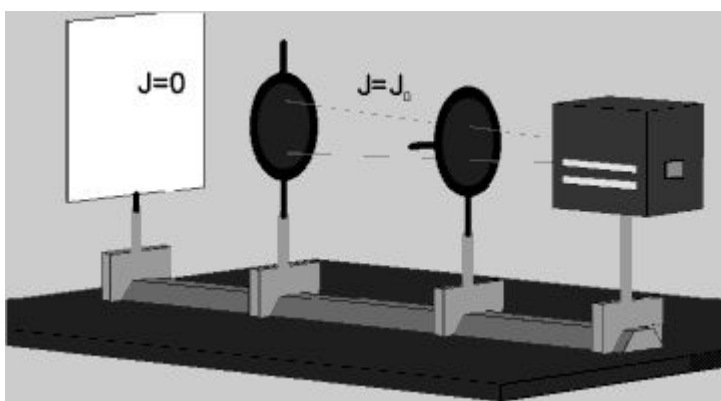


Bild: Zwei Polarisationsfilter mit entgegengesetzter Ausrichtung <sup>55</sup>

<sup>54</sup> Abb. aus Rainer Müller und Hartmut Wiesner: Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik, Qualitativer Basiskurs, S10, e-mail: rainer.mueller@physik.uni-muenchen.de

<sup>55</sup> ebd, S11

Mit Schirm, Quelle, Strahlteiler und Polarisationsfilter "ausgerüstet" kann man nun die "seltsamen Eigenschaften" der Quanten im Experiment darstellen.

### 2.4.3.: Eine einfache Darstellung des Mach-Zehnder-Interferometers

Die wohl markanteste Eigenschaft von Wellen ist die Interferenz.

Zu den wichtigsten optischen Systemen, die Interferenzen erzeugen, zählen Interferometer.

Mit den unten dargestellten Schema eines Mach - Zehnder - Interferometers ist es in einer einfachen Weise möglich zu erklären, warum im Zusammenhang mit der Quantenmechanik oft von "seltsamen" Phänomenen gesprochen wird. Die Objekte der Quantenmechanik verhalten sich entsprechend der Information des Beobachters über das Quantenobjekt.

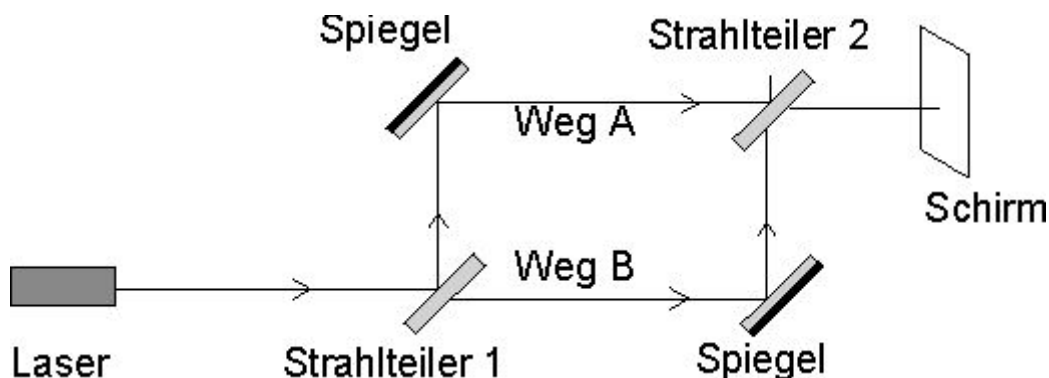


Bild: Schema des Mach-Zehnder-Interferometers <sup>56</sup>

Der Lichtstrahl aus dem Laser trifft auf Strahlteiler 1, dh. 50% des Lichtes werden Weg A "durchlaufen", 50% Weg B.

Um die beiden Wege wieder zusammenzuführen, wird als letztes Element vor dem Schirm ein zweiter Strahlteiler eingesetzt.

Wenn die Laserquelle aktiviert wird, stellt man ein Welleverhalten des Lichtes fest. Der am Schirm auftreffende Lichtstrahl formt ein Interferenzmuster aus.

Anm: Siehe Bild unten.

<sup>56</sup> Abb. aus Rainer Müller und Hartmut Wiesner: Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik, Qualitativer Basiskurs, S13, e-mail: rainer.mueller@physik.uni-muenchen.de

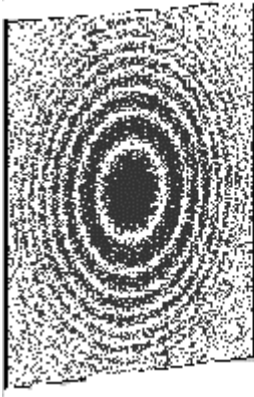


Bild: Interferenzmuster am Schirm <sup>57</sup>

In weiterer Folge setzen wir nun die uns in ihrer Funktionsweise bereits bekannten Polarisationsfilter in die beiden Strahlengänge des Mach-Zehnder Experiments ein. Ein Polarisationsfilter wird am Weg A eingesetzt, der andere am Weg B.

Anm: Siehe Bild unten.

Nun besteht die Möglichkeit die Winkel der jeweiligen Filter diametral zueinander einzustellen, daraus ergibt sich die Möglichkeit die Wegstrecke der einzelnen Photonen zu bestimmen; denn wenn z.B. auf der Wegstrecke A nur vertikal polarisierte Photonen den Schirm erreichen können, so sind es auf der Wegstrecke B nur horizontal polarisierte Photonen.

Die Wegstrecken der einzelnen Photonen werden dadurch bestimmbar; als Konsequenz der Wegstreckenbestimmbarkeit, zeigt sich ein Teilchenverhalten des Lichtes am Schirm. Es bildet sich kein Interferenzmuster.

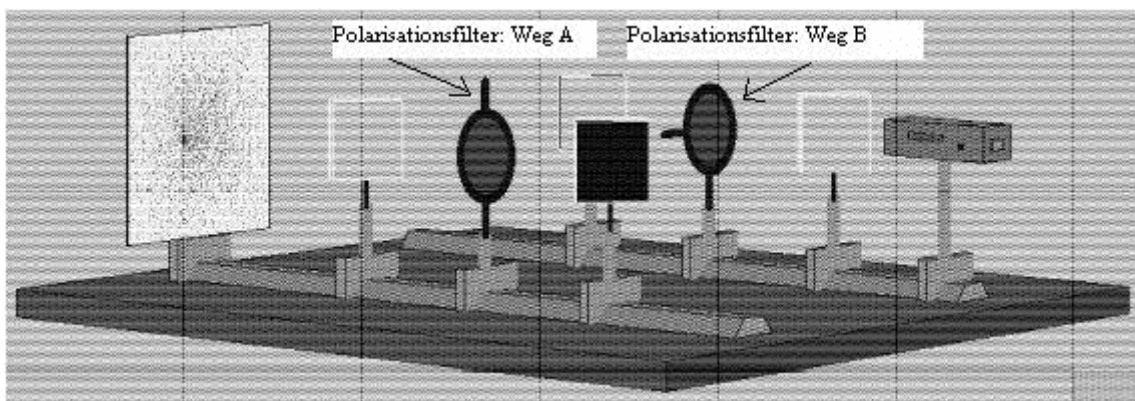


Bild: Mach-Zehnder Interferometer mit entgegengesetzt ausgerichteten Polarisationsfiltern <sup>58</sup>

<sup>57</sup> Bildausschnitt aus Abb.: Rainer Müller und Hartmut Wiesner: Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik, Qualitativer Basiskurs, S16 , e-mail: rainer.mueller@physik.uni-muenchen.de

<sup>58</sup> Modifizierte Abb., ebd., S18

Damit das **Interferenzmuster am Schirm** wiederhergestellt werden kann, muß die **Weginformation** der Photonen aus der experimentellen Anordnung "**gelöscht**" werden.

Das kann erreicht werden, wenn beide Polarisationsfilter den gleichen Winkel einnehmen, also wie im Bild unten, nur horizontale oder ausschließlich vertikal polarisierte Photonen auf den Schirm treffen können.

Die am Schirm ankommenden Photonen besitzen nun alle die selbe Polarisation, sodaß es nicht mehr möglich ist den Weg eines einzelnen Photons zu bestimmen.

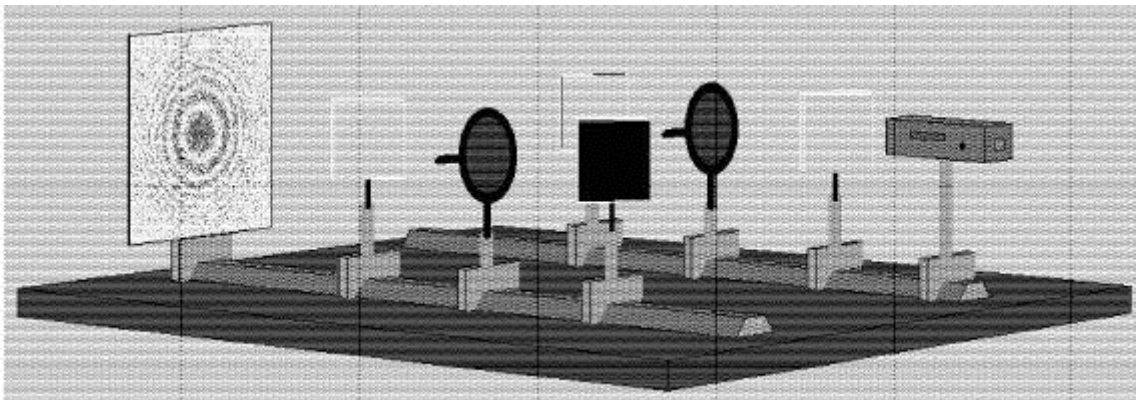


Bild: Mach-Zehnder Interferometer mit gleichgerichteten Polarisationsfiltern <sup>59</sup>

*" Wäre nun ein Photon tatsächlich ein lokalisiertes Gebilde, das auf genau einem der beiden Wege durch das Interferometer läuft, müsste es auf wundersame Weise "wissen" wie das Polarisationsfilter im anderen Weg eingestellt ist, um sich am Schirm "korrekt zu verhalten." "* <sup>60</sup>

Der Gegensatz zwischen der klassischen Struktur der Wirklichkeitsauffassung und einer "quantenphänomenalen" Struktur der Wirklichkeitsauffassung wird ersichtlich.

Das grundlegende "Verhalten der Wirklichkeit" verläßt innerhalb dieser quantenmechanischen Interpretation die Möglichkeit deterministisch-kausaler Erklärungsstrukturen.

Es ist eine grundlegende Veränderung gegenüber der Betrachtung einer raumzeitlich-kausalen Wirklichkeitsbeschaffenheit eingetreten.

<sup>59</sup> Abb. aus Rainer Müller und Hartmut Wiesner: Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik, Qualitativer Basiskurs, S18 , e-mail: rainer.mueller@physik.uni-muenchen.de

<sup>60</sup> ebd., S20

#### *2.4.4.: Geteilte Photonen?*

Andererseits könnte man nun annehmen, daß keine vollständigen Photonen jeweils einen Strahlengang durchlaufen. Um den Sachverhalt zu klären, setzt man anstatt der Polarisationsfilter Photonendetektoren in die Strahlengänge ein.

Sobald auf den Wegstrecken A und B des Mach Zehnder Interferometers Photonendetektoren eingesetzt werden, wird jedoch jedes von der Quelle ausgesendete Photon auf einem der beiden Wege detektiert.

Die Wegmessung von Photonen durch Detektoren "erzeugt" das vollständige Auffinden eines Teilchens auf einer der beiden Wegstrecken.

Das Auffinden eines Teilchens bedeutet Weginformation zu besitzen, die Trajektorie des Teilchens zu kennen und damit jedoch gleichzeitig keine Interferenz mehr feststellen zu können.

Interferenz und Weginformation schließen sich gegenseitig aus.

#### *2.4.5.: Mach-Zehnder-Interferometer mit verzögerter Auswahl*

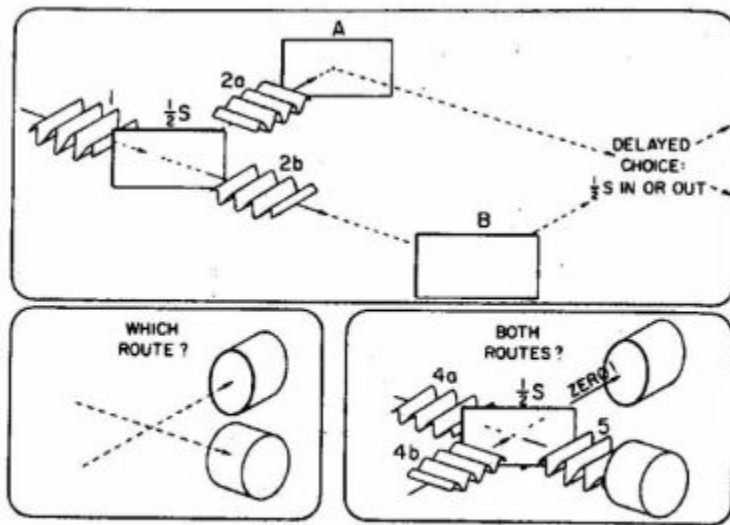
Um eines der modernsten Experimente der Quantentheorie kennenzulernen, betrachtet man wiederum die Struktur des Mach Zehnder Interferometers, jedoch unter Miteinbeziehung einer Methode, welche von der modernen experimentellen Quantentheorie entwickelt worden ist und in der es möglich wird, den 2. Strahlteiler zu entfernen, nachdem das Photon bereits den 1. Strahlteiler durchlaufen hat.

Das von J.A. Wheeler im Jahre 1988 dargestellte "Delayed Choice" Experiment (siehe Bild unten) veranschaulicht eben diesen Versuchsaufbau.

Ist der 2. Strahlteiler im Versuchsaufbau integriert, kann keine Weginformation einzelner Photonen erhalten werden; als Ergebnis zeigt sich das uns bekannte Interferenzmuster.

Fehlt der 2. Strahlteiler so kann das am Schirm beobachtete Photon nur Weg A durchlaufen haben; eine eindeutige Weginformation kann dem jeweiligen Photon zugeordnet werden. Diese eindeutige Weginformation zu beobachten, bedeutet den Teilchencharakter zu messen, es kommt keine Interferenz zustande.





Schemo von Wheeler's „Delayed-Choice Experiment“. (Nach J.A. Wheeler 1988).

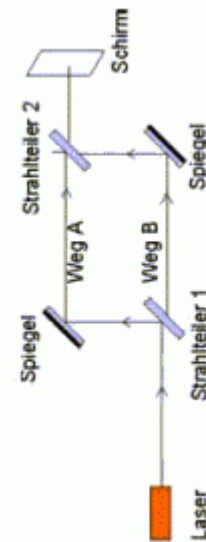


Bild: Mach-Zehnder-Interferometer mit verzögerter Auswahl nach J.A. Wheeler<sup>61</sup> und rechts davon die zum Vergleich bereits bekannte schematische Darstellung des Mach-Zehnder-Interferometers (Bild aus Platzgründen um 90° verdreht)

Der Strahlteiler 2 kann im Wheeler Experiment mittels modernster Schalter bereits nach Eintritt des Photons in die Versuchsanordnung eingesetzt oder entfernt werden. Die Entscheidung über das Messergebnis obliegt letztendlich dem Beobachter.

Die eigentliche, fragile Paradoxie besteht darin, daß das Photon Strahlteiler 1 bereits durchschritten hat und dem Beobachter noch immer die Entscheidung zufällt, ob dem am Schirm auftreffenden Photon Welleneigenschaft oder Teilcheneigenschaft zugeschrieben werden soll.

Kausale Denklöge wird übersprungen; ein "Split" in der Struktur verhindert die kausale Formung zur Vollständigkeit.

Woher "weiß" das Photon wie es sich zu verhalten hat?

Entfernt man den 2. Strahlteiler, treffen nur Photonen auf den Schirm, welche Weg A durchliefen; doch woher "weiß" das jeweilige Photon, daß durch das Fehlen der Wegmöglichkeit B einem Beobachter ermöglicht wird Weginformation zu erhalten?

<sup>61</sup> Gerhard Grössing, Die Beobachtung von Quantensystemen, in: Hrsg.: Albert Müller, Karl H. Müller und Friedrich Stadler, Konstruktivismus und Kognitionswissenschaft – Kulturelle Wurzeln und Ergebnisse [Heinz von Förster gewidmet], Springer-Verlag, Wien, 1997, S59

Auch bei einer Möglichkeit der "Informationsbeschaffung" im "letzten Moment" tritt die dem Quantenphänomen entsprechende Zustandsänderung auf; welche später als Zustandserzeugung interpretiert werden wird.

Der "Split" ermöglicht ein Überspringen kausaler Zusammenhänge; eine "Metaschleife" überlagert komplementär die klassische Erwartung des experimentellen Ausganges.

## 2.5.: Doppelspalt, Zustandsreduktion und "Quantenwirklichkeit"

Ein weiteres Experiment zur Veranschaulichung des Quantenphänomens ist der Doppelspalt.<sup>62</sup>

Die Funktionsweise der doppelspaltigen Blende ist analog dem 2-Wege Aufbau des Mach-Zehnder Interferometers abstrahierbar.

Sind beide Spalten geöffnet, so ist die Weginformation des Elektrons gelöscht und ein streifenartiges Interferenzmuster wird am "Schirm" detektiert.

Am Mach-Zehnder Interferometer entspricht dies der Integration beider Strahlteiler im experimentellen Versuchsaufbau, ohne in irgendeiner Form an einem oder beiden Strahlwege zu messen.

Bild: Doppelspalt 1 <sup>63</sup>

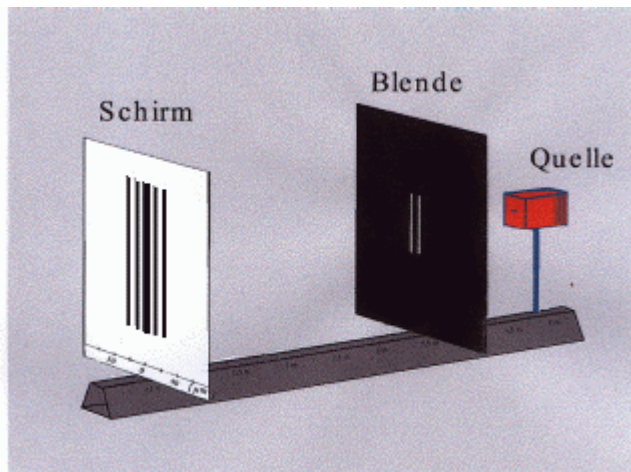
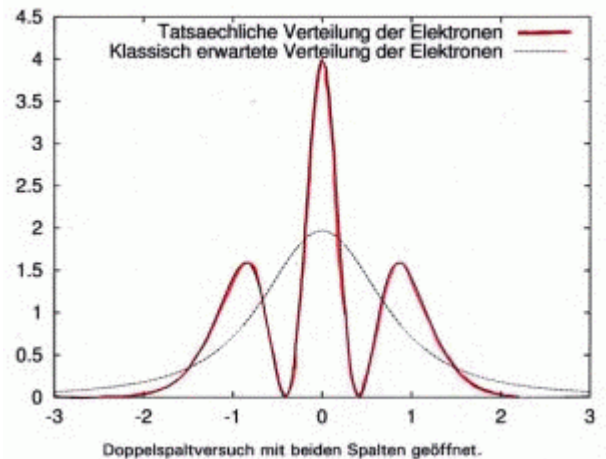


Bild: Doppelspalt 2 <sup>64</sup>



Sendet die Quelle einzelne Elektronen, deren Wirklichkeitsstruktur im klassischen Sinne als "Teilchenform" beschrieben werden kann, so wird eine signifikante Abweichung von der klassischen Vorhersage beobachtet. Wie in den oberen Bildern zu erkennen, entspricht die tatsächliche Verteilungskurve nicht der Trajektorie von Makromaterie mit kausal erklärbarer Teilchennatur.

Das ursprüngliche Doppelspaltexperiment bezieht sich auf das von Thomas Young, im Jahre 1802 durchgeführte Experiment, welches bis heute als Nachweis der Wellennatur von Licht gilt.

<sup>62</sup> Entspricht hier einem Doppelspaltversuch mit einer Elektronenquelle

<sup>63</sup> Bildausschnitt aus dem Computerprogramm "Doppelspalt.exe" von Klaus Muthsam, 1999  
e-mail: Doppelspalt@gmx.de

<sup>64</sup> Abb. aus Stefan Bauberger, Naturphilosophie - Grenzfragen der Physik - Aufbau der Materie, Kosmologie, Quantentheorie, Hochschule für Philosophie, München, Skriptum Sommersemester 1999, S71  
e-mail: stefan@bauberger.net

"Ansonsten stieß die Wellentheorie allerdings auf allgemeinen und erbitterten Widerstand, in England wurde sogar von einem Frevel gegen die wahre Newton'sche Lehre gesprochen." <sup>65</sup>

Die erste große Fusion der Wellentheorie wurde jedoch von James Clerk Maxwell 1862 initiiert. Lichtwellenausbreitung korrespondierte nun mit der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen mittels der Lichtgeschwindigkeit.

*"Um die Fortpflanzung der elektromagnetischen Wellen beschreiben zu können erschien es nur als natürlich, weiterhin an der klassischen Mechanik als gesicherte Basis festzuhalten, zu sehr war dieses Denken in den Köpfen der Physiker verwurzelt."* <sup>66</sup>

Als einziger Weg erschien demnach der Fortgang der Mechanik als "dreidimensionaler Zustand" zu einer gegebenen Zeit, in direkter Beziehung von Ursache und Wirkung.

Nun wiederum beim Doppelspaltexperiment angelangt, sollte zur genaueren Betrachtung der Begriff "Schirm" etwas erweitert werden.

Im unteren Bild sehen wir den Schirm als "Detektorenfläche"; um diese Fläche mit Detektoren "abdecken" zu können, sind entwicklungsbedingt verschiedene experimentelle Konstruktionen realisiert worden. Grundsätzlich kann eine Detektion wahrgenommen werden, z.B. als scharfes Klicken des Detektors.

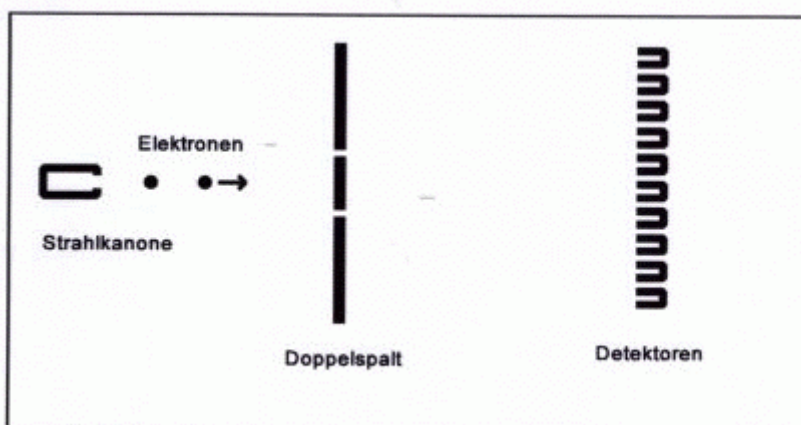


Bild: Doppelspalt und Detektoren <sup>67</sup>

<sup>65</sup> Birgit Dopfer, Zwei Experimente zur Interferenz von Zwei-Photonen Zuständen – Ein Heisenbergmikroskop und Pendellösung; Diss., Innsbruck, 1998, S1

<sup>66</sup> ebd.

<sup>67</sup> Stefan Bauberger, Naturphilosophie - Grenzfragen der Physik - Aufbau der Materie, Kosmologie, Quantentheorie, Hochschule für Philosophie, München, Skriptum Sommersemester 1999, S69  
e-mail: stefan@bauberger.net

*"Niemand jedoch erhalten wir halbe (bzw. kontinuierlich veränderte) Klicks, wie wir das zum Beispiel von Wasserwellen erhalten würden. Ganz im Gegenteil erinnert uns dieses Verhalten an die Detektion von massiven Teilchen!"*<sup>68</sup>

*Natürlich stellt sich jetzt sofort die Frage nach dem einen oder anderen Weg, den das Elektron nach dieser neuen Erkenntnis doch genommen haben mußte; denn da die Elektronen nur als ganze, gleichbleibende Klicks detektiert werden, müssen sie wohl durch den einen oder anderen Spalt gegangen sein."*<sup>69</sup>

Die tatsächliche Verteilung der Elektronen entspricht jedoch nicht dem Gesamtbild einer Reihe von "nur oberer Spalt geöffnet" und "nur unterer Spalt geöffnet".<sup>70</sup>

*"Einerseits detektieren wir massive, nicht teilbare Teilchen, andererseits zeigen genau diese Teilchen Interferenz, als ob sie wie eine Wasserwelle durch beide Spalten gehen würden."*<sup>71</sup>

Wird ein Spalt geschlossen, bekommen wir Weginformation und die Interferenz verschwindet.

---

<sup>68</sup> vgl. Kap. 2.4.4

<sup>69</sup> Birgit Dopfer, Zwei Experimente zur Interferenz von Zwei-Photonen Zuständen, Ein Heisenbergmikroskop und Pendellösung, Universität Innsbruck, Diss., 1998, S19

<sup>70</sup> Vgl. Bild: Doppelspalt 2

<sup>71</sup> Birgit Dopfer, S19

### 2.5.1.: "Welcher Weg" Experiment von Richard P. Feynmann

Ein Experiment von Richard P. Feynmann beschreibt, daß auch noch so ausgeklügelte Konstruktionen eine Weginformation über das Elektron und die gleichzeitige Aufrechterhaltung der Interferenz verunmöglichen.

Im Bild Doppelspalt 4 und 5<sup>72</sup> sehen wir den Versuch von Feynmann, wobei eine Lichtquelle ein Elektron nach Passieren einer der beiden Spalte sichtbar macht.

Bild: Doppelspalt 4<sup>73</sup>

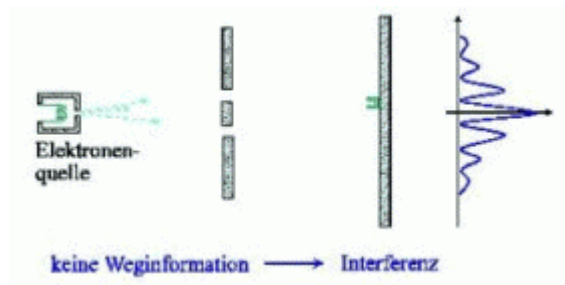
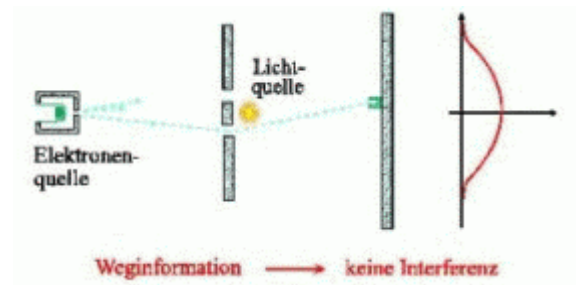


Bild: Doppelspalt 5<sup>74</sup>



*"... mit erhalten der Wegfunktion ist das Interferenzmuster verschwunden und taucht auch nur für ein Subensemble von Elektronen wieder auf, bei deren Detektion kein Lichtblitz (keine Weginformation) beobachtet werden konnte."*<sup>75</sup>

Es bestätigt sich wiederum die Komplementarität von Weginformation und Interferenz.

Worum handelt es sich beim Wegfall der Weginformation für ein Subensemble von interferierenden Elektronen?

Das Elektron wird von der Lampe nicht lokalisierbar gemacht, folglich trifft kein Photon auf ein durchfließendes Elektron, kein Lichtblitz entsteht, welcher die Position des Elektrons empirisch verifiziert.

<sup>72</sup> Birgit Dopfer, Zwei Experimente zur Interferenz von Zwei-Photonen Zuständen, Ein Heisenbergmikroskop und Pendellösung, Universität Innsbruck, Diss., 1998, S19

<sup>73</sup> ebd.

<sup>74</sup> ebd.

<sup>75</sup> ebd., S20

In diesem Fall waren die Photonen der Lampe kein Teil des experimentellen Zusammenhanges.

Die Photonen aus der Lampe im Feynmann Experiment interferieren nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit mit dem eigentlichen Experiment.

Diese Wahrscheinlichkeit bildet das Subensemble interferierender Elektronen, welche beide Strahlengänge durchliefen als wäre die Lampe ausgeschaltet und da die Photonen der Lampe in diesen Fällen keine Wechselwirkung mit der experimentellen Struktur aufweisen, ist die Lampe in diesen Fällen tatsächlich für das Experiment als ausgeschaltet zu betrachten.

Ein "interferierendes" Elektron fließt durch beide Spalten wie eine Welle, während ein detektiertes Elektron die Struktur eines Teilchens, mit Eigenschaften wie Masse und Ladung hervorbringt.

Wiederum bestätigt sich, daß das Verhalten physikalischer Gegenstände nicht unabhängig von einem Meßvorgang, einer Beobachtung, von zugänglicher Information beschrieben werden kann.

### 2.5.2.: Weitere "Welcher-Weg" Experimente

Stefan Bauberger erklärt in seinem Unterrichtskonzept: "Naturphilosophie, Grenzfragen der Physik – Aufbau der Materie, Kosmologie und Quantentheorie" einen weiteren Versuch, die Interferenz bei gleichzeitiger Ortsbestimmung des Elektrons aufrecht zu erhalten.

*"Man kann z.B. in diesem Doppelspaltversuch mit Elektronen unmittelbar vor oder hinter einem Spalt einen Detektor aufstellen, der das Elektron nicht verschluckt. Es kommen also auch mit dem Detektor immer noch alle Elektronen, die durch die zweite Spalte laufen, auf dem Schirm an. Damit kann man registrieren, durch welchen der Spalte ein Elektron läuft. In der Konsequenz verschwindet das Interferenzmuster." <sup>76</sup>*

Der im Zitat beschriebene Detektor wird hinter einem der beiden Spalten aufgestellt, der wie beschrieben die Elektronen nicht verschluckt, jedoch beobachtet, beziehungsweise Weginformation gewinnen kann.

Wäre nun dieser Detektor hinter der oberen Spalte in die experimentelle Form eingefügt, so würde ein Klicken des Detektors uns einen Durchgang des Elektrons am oberen Spalt anzeigen; würde der Detektor, im Falle einer Elektronenpassage durch den unteren Spalt, nicht klicken, so wüßten wir aufgrund der Integration des Detektors hinter dem oberen Spalt, daß das Elektron nur den unteren Spalt passieren konnte.

*"In diesem Fall findet aber eine Wechselwirkung mit dem Elektron durch die Messung nur dann statt, wenn das Elektron durch genau diesen Spalt läuft, wo der Detektor steht. In der Hälfte aller Fälle findet eine solche Wechselwirkung gar nicht statt.*

*Aber auch dann hat man im quantenmechanischen Sinn eine Messung vorgenommen und der Zustandsvektor macht seinen Sprung, bzw. die Wellenfunktion kollabiert." <sup>77</sup>*

Die Wellenform des Elektrons, welche durch beide Spalten fließt, wird durch einen mit Sicherheit vorhandenen Detektor entlang einen der beiden Strahlengänge aufgelöst; das Interferenzmuster, welches die Wellenform definiert, verschwindet.

---

<sup>76</sup> Stefan Bauberger, Naturphilosophie - Grenzfragen der Physik - Aufbau der Materie, Kosmologie, Quantentheorie, Hochschule für Philosophie, München, Skriptum Sommersemester 1999, S72  
e-mail: stefan@bauberger.net

<sup>77</sup> ebd., S76



Betrachtet man eine experimentelle Struktur, in der der Schirm ausgeschaltet wird, sobald ein Elektron den "nicht Elektronen verschluckenden und Weginformation erbringenden" Detektor durchläuft und somit ausschließlich Elektronen den Schirm erreichen, welchen den Strahlengang ohne Detektor durchliefen, so würde man meinen, das "Welcher Weg" Problem gelöst zu haben.

*"(...) Dann registriert man nur noch Elektronen, die nicht durch die Messung gestört wurden."* <sup>78</sup>

Für den aufmerksamen Leser dieser Arbeit nicht überraschend, ist auch hier ein Verschwinden der Interferenz zu beobachten.

Ich bin mir absolut sicher, daß der Zustandswechsel auch dann eintreten würde, würde man den Detektor nicht nur hinter den oberen Spalt plazieren, sondern könnte mittels einer sehr schnellen Schaltung innerhalb kurzer Zeitspannen den Detektor hinter einen beliebigen Spalt setzen, um wiederum bei jedem Klicken des Detektors den Schirm auszuschalten.

Setzt man keinen Detektor hinter eine Spalte, werden wir ein Photon für Photon aufbauenden Interferenzmuster erkennen, gleichgültig in welchen zeitlichen Abständen die Photonen von der Quelle emittiert wurden.

Spezifiziert man die experimentelle Anordnung in dem Sinne, daß sie, gleichgültig in welcher Form, eine Möglichkeit des Erkennens einer Weginformation bietet, so wird sich, unabhängig von der Anzahl der emittierten Photonen, kein Interferenzmuster bilden.

---

<sup>78</sup> Stefan Bauberger, Naturphilosophie - Grenzfragen der Physik - Aufbau der Materie, Kosmologie, Quantentheorie, Hochschule für Philosophie, München, Skriptum Sommersemester 1999, S76  
e-mail: stefan@bauberger.net

### 2.5.3.: Intensitätsverteilungen am Doppelspalt

Im Bild Doppelspalt 2 (siehe 2.5) sehen wir zwei Kurven, wobei eine Kurve der klassischen Erwartung der Verteilung der Teilchen entspricht und die andere Kurve die tatsächliche Verteilung der Teilchen beschreibt.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen klassischer Teilchen lassen sich addieren, d.h. würde man beispielweise den oberen Spalt schließen, die erste Teilchensequenz [Ensemble 1] durch den unteren Spalt laufen lassen und in Folge die zweite Teilchensequenz [Ensemble 2] durch den oberen, bei geschlossenem unteren Spalt, laufen lassen, so ergeben sich zwei Kurven, welche sich im klassischen Sinne addierbar verhalten.

Intensitätsverteilung klassischer Teilchen:  $P(x) = P_1(x) + P_2(x)$

(wobei:  $P_1(x)$ : Intensitätsverteilung der Teilchen durch Spalt 1  
und  $P_2(x)$ : Intensitätsverteilung der Teilchen durch Spalt 2.)

Betrachtet man "quantenphänomenale Partikel", so betrachtet man die Natur nicht gemäß der klassischen Auffassung, es besteht eine Gegensätzlichkeit, eine Komplementarität entsteht aus der Tatsache ob ein Spalt geschlossen oder beide geöffnet sind.

Würde die Quantenmechanik sich entsprechend der klassischen Darstellung zeigen, so müßten sich beide Kurven ebenso addierbar verhalten. Im quantenmechanischen Experiment zeigt sich jedoch, daß keine Möglichkeit einer solchen Addition besteht:

$$P(x) \neq P_1(x) + P_2(x)$$

Die Symmetrie, welche die klassische Addition der Intensitätsverteilungen ermöglichte und somit innerhalb der Theorie eine Vereinheitlichbarkeit gewährleistet hat, ist nun nicht mehr vorhanden.

Die Eigenschaft "Ort" ist nur mehr vorhanden, wenn man sie durch eine Beobachtung erzeugt.

Ortseigenschaft und Interferenzmuster können nicht gleichzeitig beobachtet werden, sie schließen sich durch das Prinzip der Komplementarität nach Niels Bohr komplementär zueinander aus.

Die Ergebnisse können nur innerhalb des Welle-Teilchen Dualismus "erklärbar" gemacht werden. Einerseits eine Welle, deren "Lokalisierungsraum" sich theoretisch über das ganze Universum ausbreitet, andererseits ein Teilchen mit einem in der Wirklichkeitsstruktur klar ausgeformten Ort.

Zwischen dem exakten Nachweis des Events als Welle oder als Teilchen gibt es keine Alternativen, um ein exaktes Ergebnis für beide Zustände, für beide "Wirklichkeiten" gleichzeitig zu erlangen.

#### 2.5.4.: Ein Partikel zur Superposition und Zustandsreduktion

Der Begriff der Intensitätsverteilung wird quantenmechanisch als Wahrscheinlichkeitsdichte erklärt.

Die Wahrscheinlichkeitsdichte  $P(x)$  kann auch als Wellenfunktion erklärt werden.

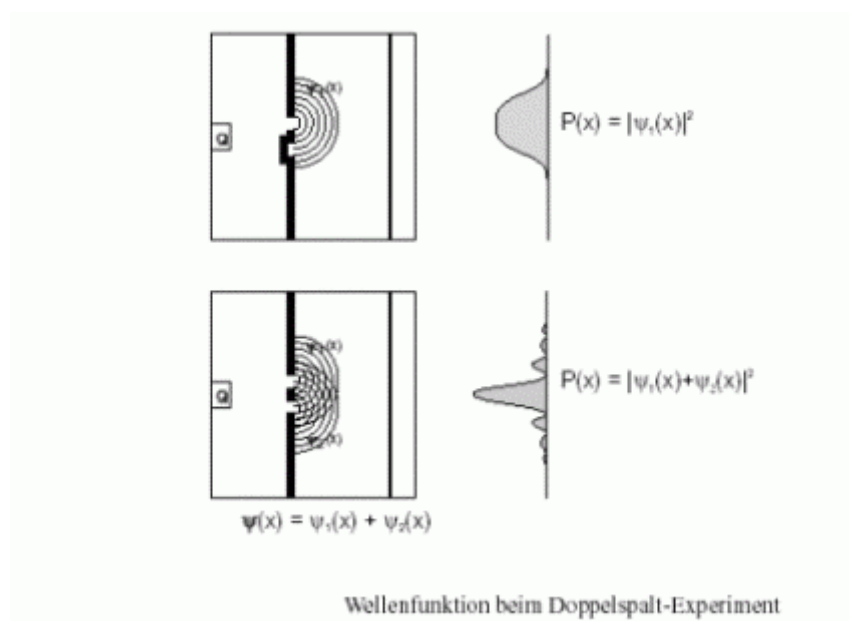
*"Born'sche Wahrscheinlichkeitsinterpretation: Quantenobjekte werden durch eine Wellenfunktion beschrieben. Sie breiten sich nach Wellengesetzen aus. Die*

*Wellenfunktion bestimmt die Wahrscheinlichkeit, ein Quantenobjekt im*

*Volumenelement  $\Delta V$  um den Ort  $x$  nachzuzuweisen:  $P(x) * \Delta V = |\Psi(x)|^2 * \Delta V$ "* <sup>79</sup>

Daraus ergibt sich:  $P(x) = |\Psi(x)|^2$

Bild: Doppelspalt 6 <sup>80</sup>



<sup>79</sup> Rainer Müller, Hartmut Wiesner: Das Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik, Qualitativer Basiskurs, S35, e-mail: rainer.mueller@physik.uni-muenchen.de

<sup>80</sup> ebd. S37

Die Wellenfunktion wird als Ensemble, der von der Quelle emittierten Quantenobjekte dargestellt; sie entwickelt die für ein Wellenphänomen charakteristischen Eigenschaften wie Interferenz oder Beugung.

Übersetzt auf eine experimentelle Anordnung wie das im Mach-Zehnder Experiment beschriebene Prinzip der Strahlteiler, welche den Strahlengang in Wegstrecke A bzw.  $|a\rangle$  und B bzw.  $|b\rangle$  splitten, beschreibt die Wellenfunktion die Überlagerung beider möglichen Wegstrecken. Weginformation verunmöglicht sich.

$$|\Psi\rangle = 1/\sqrt{2} (|a\rangle + |b\rangle)$$

Oder anhand der Wahrscheinlichkeitsdichte im Doppelspaltexperiment:

$$P(x) = |\Psi_1(x) + \Psi_2(x)|^2$$

Diese Form der Überlagerung wird als Superposition beschrieben.

In der klassischen Physik ist die Einwirkung der Messung auf das zu messende Objekt vernachlässigbar, in der Quantentheorie hingegen verändert beziehungsweise erzeugt die Messung den Zustand des gemessenen Objektes.

Wie oben beschrieben, beträgt die Wellenfunktion eines ungestörten Systems

$$P(x) = |\Psi_1(x) + \Psi_2(x)|^2, \text{ ein Überlagerungszustand aus } \Psi_1(x) \text{ und } \Psi_2(x).$$

Bestimmt eine Messung die Weginformation, wird die Wellenfunktion nur durch die jeweilige Einzelspaltverteilung beschrieben.

Die Zustandsänderung der Wellenfunktion erklärt nun das Ausbleiben der Superposition, der Interferenz.

Dieser Übergang des Zustandes wird als Zustandsreduktion, beziehungsweise als Kollaps der Wellenfunktion beschrieben.<sup>81</sup>

---

<sup>81</sup> vgl. Kap. 2.10.1

## 2.6.: *Quantum Cats* ?

Eine Kritik an diesem seltsamen Verhalten konstruiert Erwin Schrödinger mit dem Beispiel einer armen Katze, welche sich in einer abgeschlossenen Box befindetet, an die ein "atomarer" Mechanismus gekoppelt ist.

Dieser Mechanismus besteht aus einer radioaktiven Substanz die beispielsweise mit 50% Wahrscheinlichkeit einen radioaktiven Zerfall pro Stunde hervorbringt; wird ein solcher Zerfall detektiert, wird in "Schrödingers Katze" in Folge ein für die Katze tödliches Gift freigesetzt und die arme Katze würde sterben.

Verglichen mit der Wellenfunktion eines ungestörten Systems, tritt nun die Paradoxie zu Tage, daß die Katze nach einer Stunde in der "uneinsichtigen" Box aus einer Überlagerung einer toten Katze und einer lebendigen Katze beschrieben werden muß.

Erst durch das Öffnen der Box, dem Meßvorgang gleich, tritt die Zustandsreduktion ein; verglichen mit der Einzelspaltverteilung entsprechend dem Erhalt der Weginformation, weiß man welchen "Weg" die Katze gegangen ist.

Erwin Schrödinger entwarf ein Bild, in dem die Katze mit 50% Wahrscheinlichkeit gestorben ist, wenn man nach einer Stunde die Box öffnet. Erst das Öffnen der Box entscheidet in diesem Beispiel, nicht der mit 50% Wahrscheinlichkeit eingetretene radioaktive Zerfall.

Öffnet man die Box nicht, weiß man nicht, welchen Weg die Katze gegangen ist, und man müßte analog zur Wellenfunktion eines ungestörten Systems annehmen, daß sich die Katze in einer Superposition von lebender und toter Katze befindet.

Quantenmechanischer Zustand wird nun in ein makroskopisches System transformiert und eben darin befindet sich der Widerspruch in Erwin Schrödingers Rätsel.

Am Beispiel der Katze bedeutet dies, daß die Katze als ein offenes biologisches Wesen beschrieben werden muß, welches in vielfältiger Weise durch ihren Stoffwechsel in Wechselwirkung mit der Umwelt steht.

Diese Wechselwirkung kann jedoch als ein Meßprozeß angesehen werden, der zur Folge hat, daß keine Superposition, keine Interferenz im Gesamtzusammenhang von makroskopischer Katze und atomarer Wahrscheinlichkeit erfolgen kann.

Die Katze selbst wirkt folgend wie ein Detektor und verhindert, daß sich die Katze in einem Überlagerungszustand von lebendig und tot befinden kann.

Weginformation, welche Interferenz verunmöglicht, tritt auch auf, wenn das Meßergebnis vom Subjekt, dem Experimentator, nicht abgelesen wird, beziehungsweise die Box nicht geöffnet wird.

Die Katze in der Box wird nun zur eindeutig lebenden oder zur eindeutig toten Katze.

*"Schrödingers Frage, warum keine Überlagerungszustände bei makroskopischen Körpern auftreten, wird somit durch die Theorie der Dekohärenz beantwortet: Makroskopische Körper erscheinen klassisch, weil man sie nicht von ihrer Umgebung isolieren kann. Die Wechselwirkung mit der Umgebung zerstört die Interferenzfähigkeit. Es gibt jedoch auch besondere Fälle, wo die Isolierung von der Umgebung möglich ist. Dann findet keine Dekohärenz statt und es kommt zu makroskopischen Quantenphänomenen, wie Supraleitung, Suprafluidität und Bose-Einstein-Kondensation."*<sup>82</sup>

### *2.6.1.: Interferierende makroskopische Objekte und Dekohärenz*

Makroskopische Objekte in Quanteninterferenz zu bringen, ist also grundsätzlich möglich, sofern keine Wechselwirkung zwischen dem physikalischen Gegenstand und seiner Umwelt auftritt.

Im Experiment mit speziellen Kohlenstoffmolekülen, den Fullerenen, auch als Fußballmoleküle bekannt, ist es der Wiener Gruppe um Prof. Anton Zeilinger gelungen, den Weltrekord in der Größe, von in Interferenz gebrachten, makroskopischen physikalischen Objekten, mit Hilfe von Gittern, welche aus nur 50 Nanometer dicken Stäben zusammengesetzt sind, aufzustellen.

---

<sup>82</sup> Rainer Müller, Hartmut Wiesner: Das Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik, Qualitativer Basiskurs, S48, e-mail: rainer.mueller@physik.uni-muenchen.de

Bild: C60 – Fulleren Molekül <sup>83</sup>

Fullerene kann man sich als aufgerollte Graphitschichten vorstellen; sie sind nicht nur mit 60 Kohlenstoffatomen möglich, sondern wurden auch mit 70, 82 und 240 Atomen gefunden.

Die Dekohärenz bietet also keine exakte Abgrenzung zwischen Mikro- und Makrokosmos und ist eigentlich nur für Objekte gültig, welche Information mit ihrer Umwelt austauschen.

Wie groß Objekte sein dürfen, welche der Dekohärenz nicht unterliegen, kann nicht festgestellt werden; so gesehen ist die Größenskala dieser Objekte vielleicht sogar nach oben offen.

*"Man könnte sich durchaus ein anderes lebendes System vorstellen, es muss ja nicht unbedingt gleich eine Katze sein, zum Beispiel eine kleines Bakterium oder eine Amöbe. Dieses Lebewesen kann man nun in einem kleinen Behälter einsperren, gemeinsam mit allem, was es so zum Leben braucht."* <sup>84</sup>

<sup>83</sup> Abb. aus Anton Zeilinger, Einsteins Schleier – Die neue Welt der Quantenphysik, Verlag C.H.Beck, München 2003, S27

<sup>84</sup> Anton Zeilinger, Einsteins Schleier – Die neue Welt der Quantenphysik, Verlag C.H.Beck, München 2003, S101

Auf diese Weise, so Prof. Anton Zeilinger, könnte man den gesamten Behälter von seiner Umwelt isolieren. Für ihn gibt es keine fundamentalen Gründe, warum Quanteninterferenz nicht in immer größeren Systemen beobachtbar sein könnte.

Am Beispiel der Fullerene, welche in einem 650° Grad heißen Ofen "gebacken" werden, heißt das zwar, daß von Ihnen, während des Fluges über eine mehrere Meter lange Flugstrecke, Wärmestrahlung abgegeben wird, diese jedoch aus physikalischen Gründen nicht genutzt werden kann<sup>85</sup>, um Information über die Wegstrecke des Fullerens zu erhalten.

Für Prof. Anton Zeilinger ist die Theorie der Dekohärenz, eine Theorie mit Ablaufdatum.

*"Das Ablaufdatum ist der Tag, an dem es tatsächlich gelingt, Quantensuperpositionen von wirklich großen Objekten im Experiment zu beobachten. Dies ist sicher dann erreicht, wenn Quantensuperpositionen von Objekten beobachtet werden, die man mit bloßem Auge sehen kann."*<sup>86</sup>

Sogesehen müßten wir mit bloßem Auge beobachten können, daß Objekte (beliebig lange) Distanzen überwinden können, ohne sich für einen möglich bestimmbaren Weg zu entscheiden.

Ich frage mich, was passieren würde, könnte man ein derart großes makroskopisches Objekt in Quanteninterferenz bringen, daß es gestatten würde, in dieses Objekt ein Beobachtungsgerät oder gar einen Menschen unterzubringen. Würde die Interferenz im Falle des Einschaltens des eingebrachten Beobachtungsgerätes verschwinden und im Falle eines deaktivierten Beobachtungsgerätes erhalten bleiben?

Würde man also ein "Fenster" des in Interferenz gebrachten Objektes von innen her öffnen, wäre dies ein Wiederauftauchen aus dem Verschwundensein.

---

<sup>85</sup> siehe Anton Zeilinger, Einsteins Schleier – Die neue Welt der Quantenphysik, Verlag C.H.Beck, München 2003, S104

<sup>86</sup> ebd. , S154-155



Wäre es möglich, einen Menschen, oder gar eine ganze "Umwelt" in Quanteninterferenz zu bringen; werden wir dann in ferner Zukunft eine Welt betreten können, deren ortsbestimmte Beobachtung per Naturgesetz ausgeschlossen werden kann?

Eine Welt, in welcher keinerlei Informationsaustausch mit unserer Welt gegeben ist. Wohin wird uns die Möglichkeit der Isolation von Objekten bringen?

Wie verhält es sich mit den Naturgesetzen im Inneren eines in Quanteninterferenz gebrachten Objektes?

Ein solches Objekt in Quanteninterferenz zu bringen, heißt ja, es soweit zu isolieren, daß keine Information über dieses Objekt in die Umwelt entweichen kann. Bedingt der Vorgang der Isolation nicht auch das "Wissen" über die physikalische Dynamik im "Inneren" des Objektes?

So als ob man einen Iglu baut und sobald der letzte "Eisquader" aufgesetzt wird, sich der "Iglu" in Quanteninterferenz befindet und die "Igluwelt" in eine Schleife "eingefangen" wird.

Der Vorgang der "Isolation" ist demnach nur möglich, wenn keine Information, welche eine Ortsbestimmung ermöglicht von der "Umwelt" aufgenommen wird. Eine solche Struktur müßte jedoch eine solche Komplexität erreichen, die die Unmöglichkeit von möglicher (Weg-) Information nach "Außen" sicherstellt; einer komplementären Welt gleich.

## 2.7.: Komplementarität und die Kopenhagener Deutung

Die erste grundlegende Auseinandersetzung mit einer Quantenmechanik, die in ihrer Entwicklung ein eigenständiges Feld wissenschaftlicher Forschung zu bilden begann, wurde im Rahmen des 5. Physikalischen Kongresses des Solvay Institutes im Oktober 1927 in Brüssel abgehalten.

Aus dieser Konferenz ging der Begriff der "Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik" hervor; "Kopenhagener Deutung" deshalb, weil sie der Gruppe um Niels Bohr zugerechnet wird, welche sich in Kopenhagen, am Institut von Bohr zentrierte.

Die Kopenhagener Schule der Quantenmechanik beschreibt, das in diesem Text bereits oft interpretierte Phänomen der Komplementarität, der Unmöglichkeit beide Komponenten der Wirklichkeit in einer Einheit zu beschreiben.

Das Quantenobjekt entzieht sich der Vereinnahmung durch seine Bestimmbarkeit.

Der 5. Solvay Kongreß wurde zu einem wichtigen geschichtlichen Ereignis für die Interpretation physikalischer Realität.

Der Begriff der Komplementarität nach Niels Bohr ist eng mit Werner Heisenbergs Unschärferelation verknüpft.

Komplementarität und Unschärfe verweisen auf die fundamentale Unmöglichkeit einer exakten Messung welche eine vollständige Beschreibung des Quantenobjekts ermöglicht.

Ein erkenntnistheoretischer Ansatz zur Unschärfe beschreibt ein Ausbleiben der Vollständigkeit aufgrund der Störung die durch die Messung verursacht wird.

*"Die Unschärfe wird demnach durch die unvorhersehbare und unkontrollierbare Störung des Mikroobjekts durch die Beobachtung verursacht und weist auf die Untrennbarkeit von Beobachter und Mikroobjekt der Quantenmechanik hin."<sup>87</sup>*

Diese Deutung der Quantenmechanik führte zu einigen Mißverständnissen, welche auch noch heute sehr verbreitet scheinen, zum Beispiel die Bemühung den Effekt der Meßstörung aus dem Gesamtsystem herausrechnen zu wollen.

---

<sup>87</sup> Kurt Baumann und Roman U. Sexl: Die Deutungen der Quantenmechanik, Verlag Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1984, S13

*"Irreführend ist die Behauptung, die Unbestimmtheit entstamme der Störung des Zustandes durch den Meßprozeß. Gebraucht man das Wort "Zustand" im Sinne der Quantentheorie, als Strahl im Hilbertraum, so existiert weder vor noch während der Messung ein Zustand mit zugleich bestimmtem Ort und Impuls" <sup>88</sup>*

In der Notation des Hilbertraums besitzen sowohl der Ort, als auch der Impuls einen Eigenvektor; diese Eigenvektoren sind jedoch nicht als gemeinsamer Eigenvektor für beide Zustände darstellbar, somit ist es nicht möglich die klassische "Teilchenbahn", in der beide Zustände prinzipiell exakt bestimmbar sind, als Ergebnis zu erhalten.

Den Übergang von der Heisenberg'schen Unschärferelation zur Bohr'schen Komplementarität beschreiben Kurt Baumann und Roman Sexl in ihrem Buch "Die Deutungen der Quantentheorie" folgendermaßen: <sup>89</sup>

- Raumzeitliche Beschreibungen eines Vorganges erfordern Beobachtungen (beispielsweise einer Bahn).
- Beobachtungen bedingen unkontrollierbare Störungen des betrachteten Objekts.
- Unkontrollierbare Störungen machen das Kausalgesetz unanwendbar, da das weitere Verhalten des Objekts nicht vorhergesagt werden kann.
- Raum-zeitliche Beschreibung eines Vorganges und die Forderung der Kausalität schließen einander aus, sie sind zueinander komplementär.

Bohr und Heisenberg einigten sich darauf, daß die Komplementarität der Grund der Unbestimmtheit sei.

---

<sup>88</sup> Carl Friedrich von Weizsäcker, Aufbau der Physik, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co.KG, München, 1994, S503

<sup>89</sup> Kurt Baumann und Roman U. Sexl: Die Deutungen der Quantenmechanik, Verlag Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1984, S17

Komplementarität ist das Auftreten verschiedener, exakt – in keinem Punkt zusammenpassender "Welten", die Inkompatibilität von Ort und Impuls oder Weginformation und Interferenz, aber auch von Energie und Zeit.

*"Der Schlüssel zum präzisen Sinn des Komplementaritätsbegriffs bleibt seine physikalische Verwendung von 1927. Teilchen und Welle sind zwei klassische Beschreibungsweisen der Phänomene, die beide durch die Erfahrung erzwungen sind und einander doch in strenger Anwendung ausschließen."* <sup>90</sup>

Eine weitere wichtige Annahme der Komplementarität betrifft den Gegensatz der klassisch beschriebenen experimentellen Apparatur und dem Quantenphänomen. Im Moment der Messung findet eine Wechselwirkung zwischen diesen beiden "Welten" statt. Die Gesamtstruktur beinhaltet einen "klassischen Rahmen" in dem eine Beobachtung erfolgen kann.

*"Da die Anordnung außerdem mit dem Rest der Welt verbunden sein muß, enthält sie tatsächlich die Unsicherheiten der mikroskopischen Struktur der ganzen Welt"* <sup>91</sup>

Erst durch die spezifische Beobachtung von Teilchen oder Welle findet der Sprung vom Wahrscheinlichen zum Bestimmbaren statt, erst dann tritt die Wechselwirkung zwischen experimenteller Anordnung und Quantenobjekt ein, und damit findet auch die Wechselwirkung mit der gesamten übrigen Welt statt. Diese Wechselwirkung ist physikalisch an die experimentelle Meßanordnung gebunden und ist insofern nicht direkt vom Bewußtsein des Beobachters abhängig oder gar manipulierbar und dennoch unterteilen wir in die Welt des Quantenobjekts und in die Welt außerhalb des Quantenobjekts, welche nur klassisch beschrieben werden kann.

Wäre es möglich, einen experimentellen Apparat in einen makrophysikalischen Quantenzustand zu bringen, so würde jener experimentelle Apparat, welcher den eigentlichen experimentellen Apparat in Interferenz brächte, wiederum klassisch beschrieben werden, und ebenso erginge es der übrigen Welt die mit diesem "Meta-apparat" verbunden ist.

---

<sup>90</sup> Carl Friedrich von Weizsäcker, Aufbau der Physik, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co.KG, München, 1994, S507

<sup>91</sup> Werner Heisenberg: Quantentheorie und Philosophie, Reclam, Stuttgart, 2000, S54-55

Werner Heisenberg beschreibt diese Form der wissenschaftlichen Auffassung von der Trennung zwischen Quantenobjekt und Meßapparat dennoch als von Ihrer Entwicklungsgeschichte abhängig.

*"Diese Einteilung ist in gewisser Weise willkürlich und historisch eine unmittelbare Folge der in den vergangenen Jahrhunderten geübten naturwissenschaftlichen Methode. Der Gebrauch der klassischen Begriffe ist also letzten Endes eine Folge der allgemeinen geistigen Entwicklung der Menschheit"* <sup>92</sup>

Die Vereinheitlichbarkeit der Wirklichkeit wurde in unserer wissenschaftlichen Entwicklung zur Voraussetzung; sie begründet den Zusammenhang von Operationalität und Macht.

Die klassischen Begriffe ermöglichten durch ihre Standardisierbarkeit jedoch eine Etablierung und Spezialisierung der Einzelwissenschaften, so gesehen war die Entwicklung einer "klassischen" Wirklichkeitsbetrachtung kein Irrweg.

Wäre die Wirklichkeit jedoch als ein Uhrwerk beschreibbar, wären wir nur kleine oder große Rädchen im Getriebe der Zeit.

Beginnen wir unsere geistesgeschichtliche Entwicklung zu analysieren, so müssen wir uns auf eben diese Entwicklung rückbeziehen um sie zu überwinden.

Wie bereits beschrieben verunmöglicht Objektivität ein Subjekt, Beobachtung bedeutet den Gegenstand subjektiv zu reduzieren.

Eine vollständige Beobachtung des Gesamtzusammenhanges ist nicht möglich, da die Beobachtung einer Wechselwirkung, eines Austausches von Information bedarf.

Unsere kulturell-tradierte Vorstellung einer objektiven Wirklichkeit wird durch eine Wirklichkeitsbetrachtung ersetzt, in der für uns Wirklichkeit nur soweit existiert, soweit wir dementsprechende Information über ihre Beschaffenheit rezipieren.

Vereinheitlichung bedeutet das Gegenteil unserer Wirklichkeit, bedeutet daß es kein Fließen des Realen geben kann; Informationsaustausch nicht stattfindet, gleich der Isolation des Verschwindens.

Wiederholung der Paradoxie:

Die Welt "außerhalb" des Quantenobjektes wird klassisch beschrieben, währenddessen uns die Quantentheorie beschreibt, daß die klassische "Welt" nicht der Wirklichkeit entspricht.

---

<sup>92</sup> Werner Heisenberg: Quantentheorie und Philosophie, Reclam, Stuttgart, 2000, S57

Quantentheorie veranschaulicht, daß Wechselwirkung, Transformation, Zeit-Raum nicht der Singularität von Einheit entspricht.

Die Grenze, die uns die Quantentheorie auferlegt, nach der es uns nicht möglich ist, die Vollständigkeit eines raumzeitlich abgeschlossenen Einzelereignisses als der Natur gegeben zu betrachten, bedeutet jedoch nicht, daß unsere Entwicklung an diesem Punkt endet, es zeigt uns vielmehr, daß wir uns auf eine neue Schwelle unserer Erkenntnis begeben haben.

Ist der Sprung der Analogie aus der quantenphänomenalen Mikrowelt in eine quantenphänomenale Makrowelt möglich?

Gibt es einen Makroquant?

*"In dieser Weise erinnert uns, wie Bohr es ausgedrückt hat, die Quantentheorie daran, daß man beim Suchen nach der Harmonie im Leben niemals vergessen darf, daß wir im Schauspiel des Lebens gleichzeitig Zuschauer und Mitspielende sind."*<sup>93</sup>

---

<sup>93</sup> Werner Heisenberg: Quantentheorie und Philosophie, Reclam, Stuttgart, 2000, S60-61

## 2.8.: Einstein, Podolsky, Rosen und die Annahme der vollständigen Wirklichkeitsbeschreibung

Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen veröffentlichten 1935 eine Arbeit mit dem Titel: " Kann man die quantenmechanische Beschreibung der physikalischen Wirklichkeit als vollständig betrachten?"

Einstein wollte in diesem Papier die Mikrokausalität der Relativitätstheorie stützen, in der die Lichtgeschwindigkeit als maximal feststellbare Geschwindigkeit unserer Wirklichkeit festgelegt ist.

Wie später ersichtlich, handelt es sich hierum im Grunde um ein Mißverständnis, dessen einziger Ausweg zwar die Beibehaltung der Lichtgeschwindigkeit als Maximalgeschwindigkeit beinhaltet, jedoch die vollständige Lokalität von Ereignissen nicht gewährleistet ist; d.h. es gibt Zusammenhänge unabhängig von Raum und Zeit.

*"Nach Einstein haben wir es mit einer physikalischen Wirklichkeit zu tun, die er nicht näher definiert, aber wahrscheinlich ist es die Wirklichkeit der Dinge und Phänomene und daß wir versuchen mit diesen physikalischen Theorien die Wirklichkeit zu beschreiben." <sup>94</sup>*

Die Wirklichkeit wird darin aus existierenden Elementen bestehend beschrieben ("Elements of Reality"). Physikalische Theorie sollte sich vervollständigen, sollte die Möglichkeit einer vollständigen Beschreibung der Wirklichkeit bieten können.

Eine physikalische Theorie ist dann vollständig, wenn jedem Element der Wirklichkeit ein Element der Theorie entspricht.

Das Einstein'sche Realitätskriterium lautet demnach:

*"Wir können zumindest dann von einem Element der Wirklichkeit sprechen, wenn wir den Wert einer physikalischen Größe mit Sicherheit vorhersagen können." <sup>95</sup>*

Ein Element der Wirklichkeit besteht nur dann, wenn die Theorie mit der Wirklichkeit vollständig korrespondiert.

---

<sup>94</sup> Vorlesungsvortrag von Prof. Anton Zeilinger: Interpretationen und erkenntnistheoretische Probleme der Quantenphysik von 12.12.1999

<sup>95</sup> ebd.

Nach Gregor Weihs ist die Annahme der Vollständigkeit im Sinne Einstein's ebenfalls eine sehr allgemeine:

*"Sie drückt nichts anderes aus, als daß zumindest die gesamte physikalische Realität eines bestimmten Problemkreises in einer Theorie enthalten sein muß, damit man diese als vollständig bezeichnen kann."* <sup>96</sup>

Der eigenartige Sprung besteht darin, daß die gesamte physikalische Realität eines Problemkreises in der empirischen Betrachtung sich zur gesamten physikalischen Realität der Wirklichkeit erweitert.

Ein bestimmter physikalischer Gegenstand kann nicht als vollständig angesehen werden, da er mit der übrigen Wirklichkeit in Wechselwirkung steht, zumindestens dann, wenn eine Messung, eine "Bestimmbarkeit" durchgeführt wird.

Eine vollständige Beschreibung ist grundlegend nicht möglich, da man einen quantenphysikalischen Gegenstand nicht von der Umwelt isolieren und gleichzeitig messen kann.

Befindet sich der physikalische Gegenstand in Interferenz beziehungsweise in Superposition so gibt es, wie bereits beschrieben, keine Möglichkeit seine Trajektorie, seine Bahn zu bestimmen, sie ist nicht vorhanden.

Im Augenblick der Messung findet eine Wechselwirkung mit der übrigen physikalischen Welt statt, das physikalische Objekt "verändert" seinen Zustand. Mit dem Sprung des Gesamtzusammenhanges entsteht Weginformation, der Teilchencharakter des physikalischen Objektes erscheint mit gleichzeitigem Verschwinden der Interferenz.

Es ist demnach unmöglich, die gesamte physikalische Realität eines Problemkreises als Ergebnis von als vollständig zu betrachtenden Elementen der Wirklichkeit zu erhalten. Vollständigkeit findet nicht (als Einheit) statt.

Eine Unvollständigkeit der Wirklichkeit betrachte ich im philosophischen Sinne als elementare Notwendigkeit, die Grundlagen von Wirklichkeit betrachten zu können. Für eine einfache Beschreibung ist es hinreichend anzunehmen, daß eine mögliche Eigenschaft beziehungsweise ein möglicher Teil des Beobachtungsgegenstandes keinen Teil der Beobachtung darstellt.

---

<sup>96</sup> Gregor Weihs, Ein Experiment zum Test der Bellschen Ungleichung unter Einsteinscher Lokalität, Dissertation - Universität Wien - Institut für Experimentalphysik, 1999, S14



Die Vorstellung von der Vollständigkeit der Wirklichkeit wird zur Vorstellung einer Wirklichkeit, in der zumindestens ein Element fehlt, welches die Bedingung für ein Vorhandensein von Wirklichkeit darstellt.

Das fehlende Element ist kein fehlendes Element im eigentlichen Sinn, es ist vielmehr ein notwendiges Nichtvorhandensein.

Ich persönlich glaube daran, daß das fehlende Element eine Wirklichkeit in sich tragen kann, welche ebenso ein fehlendes Element aufweist, welches "unsere Wirklichkeit" bildet.

Albert Einstein beharrte, entgegen entgegengesetzter Implikationen der Quantentheorie, auf einer Betrachtung der Wirklichkeit, welche lokal und vollständig beschreibbar sein sollte.

Den eigentlichen Kern der Einstein-Podolsky-Rosen-Argumentation bildet die darin enthaltene Lokalitätsannahme.

*"Die Lokalitätshypothese sagt, was in einem System in einen bestimmtem Raumbereich geschieht muß unabhängig davon sein, was in einen anderem System geschieht, welches hinreichend davon getrennt ist, nämlich weiter davon getrennt ist, als es der Entfernung entspricht, mit der durch die Maximalgeschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit, gerade noch Information hinkommen kann."*<sup>97</sup>

Es sollte demnach keine instantane Wirkungen geben.

Wird in einem solchen Raumbereich eine Messung durchgeführt, so sollte, der kausalen Lokalitätshypothese entsprechend, keinerlei Effekt im anderen Raumbereich ersichtlich sein.

Einstein betrachtete den physikalischen Gegenstand, als einen Gegenstand mit objektiven lokalen Eigenschaften, welcher unabhängig von jeder von raumartig getrennten Beobachtung Bestand haben kann.

---

<sup>97</sup> Vorlesungsvortrag von Prof. Anton Zeilinger: Interpretationen und erkenntnistheoretische Probleme der Quantenphysik vom 10.1.2000

## 2.9.: Korrelierte Zweiteilchensysteme, E.P.R.-Photonenpaare und die Lokalitätshypothese

Um sich der Problematik in einer experimentellen Veranschaulichung zu nähern, betrachtet man das Verhalten von Quantenobjekten in einem Quantenexperiment, welches aus zwei Teilen besteht.

Wir betrachten ein korreliertes Zweiteilchensystem.

Am Anfang einer solchen Beschreibung wählen wir nun den oben bereits beschriebenen Polarisationsfilter, mit dem Unterschied, daß wir die Polarisationsausrichtung mit der Möglichkeit eines beliebigen Winkels zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  versehen werden.

*" Wird der Winkel zwischen dem Polarisator und der Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts mit  $\gamma$  bezeichnet, so ist der elektrische Vektor im austretenden Strahl um den Faktor  $\cos \gamma$  "verkürzt". "*<sup>98</sup>

Der Polarisator verkürzt die Intensität des Lichtes um den Faktor  $\cos^2 \gamma$ , da sie sich proportional zum Quadrat der Feldstärke verhält.

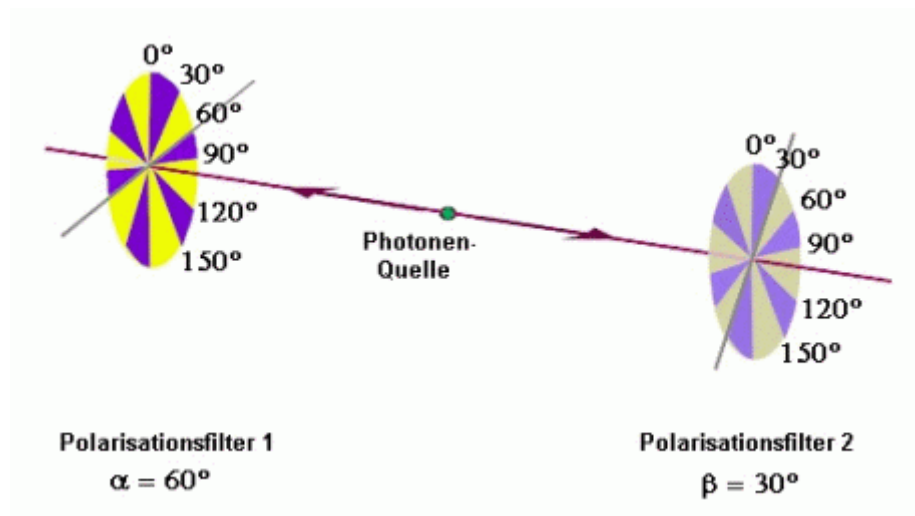
Das verwendete monochromatische Licht verändert jedoch nicht die Frequenz, wenn es den Polarisator passiert.

Ein vom Polarisator durchgelassenes Photon übernimmt die Polarisation des Polarisators, seine ursprüngliche Polarisation hat es "vergessen", beziehungsweise ist als Information nicht mehr vorhanden.

Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Photon den Polarisator passieren wird, beträgt, entsprechend der Winkeldifferenz der Polarisationsausrichtung zwischen dem Photon und des Polarisators,  $\cos^2 \gamma$ .

---

<sup>98</sup> Franz Embacher: EPR-Paradoxon und Bellsche Ungleichung, Oktober 2000, e-mail: fe@ap.univie.ac.at, S2

Bild: Korrelation und Polarisation <sup>99</sup>

Durch eine atomare Zerfallsreihe wird ein "Zwillingsphoton", ein Teilchenpaar emittiert. Im Strahlengang A befindet sich ein Polarisator P1 im Winkel  $\alpha$  eingestellt, ebenso befindet sich im Strahlengang B ein Polarisator P2 im Winkel  $\beta$  eingestellt. Die Entfernung von P1 und P2 kann oder beziehungsweise soll sehr groß sein.

Hier betrachten wir wiederum die Annahme zweier ausreichend weit voneinander getrennten Raumbereiche, deren Geschehen voneinander unabhängig sein sollten, da die Trennung der beiden Raumbereiche so gewählt wurde, daß die Lichtgeschwindigkeit als maximale Geschwindigkeit der Signalübertragung nicht ausreicht, um Informationen zwischen den beiden Raumbereichen zu übermitteln.

Das Teilchen im Strahlengang [Raumbereich] A muß in "ausreichender Distanz", unabhängig von Vorgängen des Teilchens im Strahlengang [Raumbereich] B sein. Eine spezifische Messung an Teilchen 1 müßte unabhängig vom Zustand des Teilchens 2 möglich sein.

Die Lokalitätshypothese schließt also aus, daß eine Messung an Teilchen 1, eine instantane Wirkung an Teilchen 2 hervorrufen kann.

<sup>99</sup> Franz Embacher: EPR-Paradoxon und Bellsche Ungleichung, Oktober 2000, e-mail: fe@ap.univie.ac.at, S4

Im korrelierten Zweiteilchenkonstrukt werden, sofern die Photonen mit gleicher Polarisation entstanden sind unter der Annahme, daß die Polarisatoren parallel ausgerichtet sind ( $a = \beta$ ), beide Photonen passieren oder keines.

Im Sinne der Lokalitätshypothese betrachtet man jedoch die Wahrscheinlichkeit für jeden Raumbereich unabhängig; für jedes Photon sollte eine von "seltsamer Fernwirkung" unabhängige Einzelwahrscheinlichkeit bestehen, den Polarisator zu durchlaufen, da kein Signal von einer Seite auf die andere Seite kommen kann, *"...und vor allen Dingen auch kein Signal darüber ob der Experimentator auf der einen Seite auch tatsächlich eine Messung durchführt oder nicht."*<sup>100</sup>

*" Es sollte also durchaus vorkommen, dass eines der Photonen seinen Polarisator passiert, das andere aber nicht. Genau das wird aber nicht beobachtet! Es kommen immer entweder beide oder kein Photon durch die Polarisatoren, unabhängig davon wie deren Orientierung (solange  $a = \beta$ ) gewählt wird."*<sup>101</sup>

Durch die Trennung der Raumbereiche besteht unter der Annahme der maximalen Signalausbreitung durch die Lichtgeschwindigkeit also keine Möglichkeit des Informationsaustausches zwischen den beiden Photonen und dennoch verhalten sich beide Photonen in ihren verschiedenen Raumbereichen entgegen der Gesamtwahrscheinlichkeit einer lokalen Annahme immer gleich.

Betrachten wir nun die Polarisationswinkel  $a$  und  $\beta$  unter verschiedenen Winkeln. Nehmen wir an  $a$  sei  $60^\circ$  und  $\beta$  sei  $30^\circ$ , so werden sich die Photonen auf Basis von Wahrscheinlichkeitsaussagen verschieden verhalten.

( siehe Bild oben: Korrelation und Polarisation )

Angenommen das linke Photon passiert den Polarisator, dann entspricht es der Polarisation von  $a$  und ebenso ist dann aber auch die Ausrichtung des rechten Photons in der Orientierung von  $a$  festgelegt.

Passiert das rechte Photon unmittelbar danach den Polarisator, ist der Winkel zwischen der Polarisationsausrichtung des Photons und der Polarisationsausrichtung des Polarisators mit  $a-\beta$  festgelegt.

---

<sup>100</sup> Vorlesungsvortrag von Prof. Anton Zeilinger: Interpretationen und erkenntnistheoretische Probleme der Quantenphysik vom 12.12.1999

<sup>101</sup> Franz Embacher: EPR-Paradoxon und Bellsche Ungleichung, Oktober 2000, e-mail: fe@ap.univie.ac.at, S5

Die Wahrscheinlichkeit, daß beide Photonen die Polarisatoren passieren können beträgt demnach  $\cos^2(\alpha-\beta)$ ; in unserem Beispiel:  $\cos^2(60^\circ-30^\circ)$  beträgt die Wahrscheinlichkeit, daß beide Photonen durchkommen  $\frac{3}{4}$ .

Die Gegenwahrscheinlichkeit, daß nicht beide Photonen durchkommen, beträgt  $1 - \cos^2(\alpha-\beta) = \sin^2(\alpha-\beta) = \sin^2(60^\circ-30^\circ) = \frac{1}{4}$ .

## 2.10.: Ein Partikel zur Bell'schen Ungleichung

Als 1935 das E.P.R. Papier veröffentlicht worden ist, konnte man damals jedoch kein Experiment durchführen, um die darin enthaltenen Annahmen zu bestätigen, es erschien jedoch vernünftig, beide Raumbereiche als getrennt darzustellen, da ein Lichtsignal eine Distanz nicht instantan überbrücken kann.

*"Wir werden sehen, daß diese Resultate in Widerspruch zur Annahme stehen. Die Annahme noch einmal: Was jedes einzelne System macht, muß unabhängig davon sein, was mit seinem beliebig weit entfernten "Brüderchen" geschieht." <sup>102</sup>*

1964 stellte der Physiker John S. Bell seine berühmte Ungleichung auf, wonach es erstmals möglich erschien diese Thematik in den Bereich des Meßbaren zu bringen.

*"Bis auf 2 frühe Experimente, die tatsächlich in Einklang mit Bell waren, also die Ungleichung nicht verletzen, sind alle Folgeexperimente im Einklang mit der Quantenphysik." <sup>103</sup>*

Die Verletzung der Bell'schen Ungleichung bedeutet, daß nicht alle Eigenschaften des Photons lokal realisierbar sind.

*"Die Bell'schen Ungleichungen hat Henry P. Stapp als die tiefendeste Entdeckung der Physik seit Copernicus bezeichnet. Dem kann man etwas abgewinnen: Da man sozusagen eine philosophische Frage, experimentell entscheiden kann; Erstens die Frage ob die Dinge lokale Eigenschaften tragen, die festlegen wie Sie sich verhalten sollen und zweitens dies entscheiden kann, ohne daß man weiß wie diese Modelle konkret aussehen. Eine fantastische Leistung." <sup>104</sup>*

Betrachten wir nun eine simple Darstellung der Bell'schen Ungleichung, die weitgehend der Herleitung nach Wigner entspringt.

Wir konzentrieren uns darin auf ein Ensemble von Objekten, welche wohldefinierte Eigenschaften tragen.

---

<sup>102</sup> Vorlesungsvortrag von Prof. Anton Zeilinger: Interpretationen und erkenntnistheoretische Probleme der Quantenphysik vom 12.12.1999

<sup>103</sup> ebd.

<sup>104</sup> ebd.

Die am leichtesten verständliche Erklärung der grundlegenden formalen Zusammenhänge der Bell Gleichung fand ich in einem Papier von Franz Embacher "EPR – Paradox und Bell'sche Ungleichung".<sup>105</sup>

Die betrachtete Problemstellung wird voerst analog zu einer Gruppe von Menschen abstrahiert, wobei uns folgende Eigenschaften der Gruppe interessieren:

- a) weiblich oder männlich ( $w$  oder  $\neg w$ )
- b) fährt Auto oder nicht ( $a$  oder  $\neg a$ )
- c) spricht französisch oder nicht ( $f$  oder  $\neg f$ )

Nun entspräche zum Beispiel der Term  $(w,a)$  den weiblichen, autofahrenden Menschen, der Term  $(a, \neg f)$  somit den autofahrenden, nicht französisch sprechenden Menschen, usw.

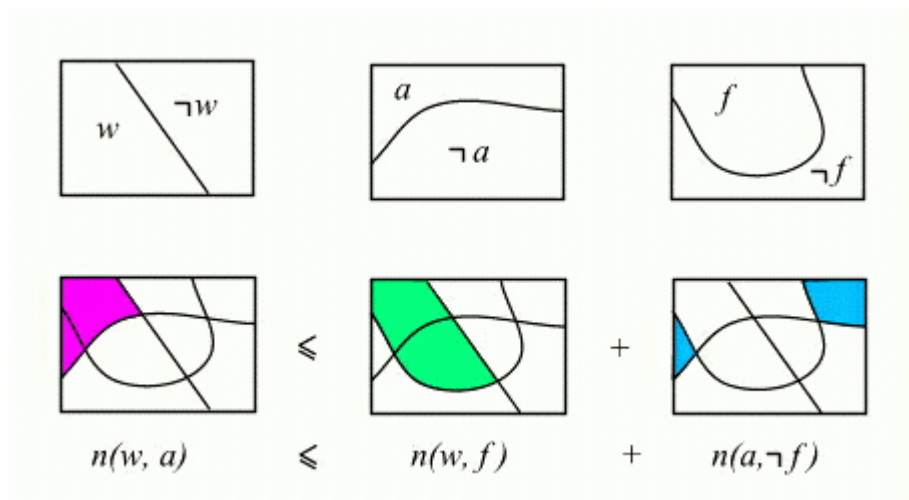
Der Bell'schen Ungleichung entspricht die folgend dargestellte Ungleichung:

$$n(w,a) \leq n(w,f) + n(a, \neg f) \quad \text{beziehungsweise} \quad n(A,B) \leq (A,C) + (B, \neg C)$$

Die Ungleichung in Worten ausgedrückt:

Die Anzahl der Frauen, die mit dem Auto fahren ist kleiner/gleich der Anzahl der französisch sprechenden Frauen und den autofahrenden Menschen, welche nicht französisch sprechen.

Bild: Bell'sche Ungleichung als "Mengenlehre"<sup>106</sup>



<sup>105</sup> Franz Embacher: EPR-Paradoxon und Bellsche Ungleichung, Oktober 2000, e-mail: fe@ap.univie.ac.at, S8

<sup>106</sup> ebd., Abb.3

*"Diese Ungleichung gilt ganz generell für drei Paare von Eigenschaften der Form  $(A, \neg A)$ . Ungleichungen dieser Art werden heute summarisch Bell'sche Ungleichungen genannt."* <sup>107</sup>

Übersetzt auf unser oben abgebildetes E.P.R. Experiment mit Photonenpolarisatoren stellt sich die Bell'sche Ungleichung wie folgt dar:

$$\cos^2(a-\beta) \leq \cos^2(a-\gamma) + \sin^2(\beta-\gamma)$$

Statten wir nun das Trippel mit den Winkel  $a = 0^\circ$ ,  $\beta = 30^\circ$  und  $\gamma = 60^\circ$  aus, so ergibt sich:

$$\cos^2(30^\circ) \leq \cos^2(60^\circ) + \sin^2(30^\circ)$$

dem entspricht numerisch:  $\frac{3}{4} \leq \frac{1}{4} + \frac{1}{4}$  (= falsch!)

Das Ergebnis entspricht der Verletzung der Bell'schen Ungleichung!

*"Die Bell'schen Ungleichungen machen folgendes; man leitet hier Bedingungen ab, die diese Korrelationen erfüllen müssen, wenn diese Annahme der lokalen Realität erfüllt ist. Wenn also ganz konkret die Eigenschaft eines Teilchens auf der einen Seite unabhängig davon ist, was auf der anderen Seite geschieht, sondern nur durch Eigenschaften festgelegt ist, die dieses Teilchen trägt."* <sup>108</sup>

Durch die Bestätigung der Quantenmechanik im Sinne der "Kopenhagener Interpretation" ist die Annahme einer "vollständig-lokalen Realität" weitgehend zugunsten der Bestätigung des Vorhandenseins "Nicht-lokaler Effekte" entschieden worden.

Die Nicht-Lokalität besteht nun im instantanen Zusammenhang eines Teilchens von einem durch eine Raum-Zeit-Schranke getrennten anderen Teilchen und der dort vorhandenen spezifischen Einstellung des Meßapparates.

Die Ergebnisse der Quantenmechanik bestätigen somit das Vorhandensein eines von Raum und Zeit unabhängigen Zusammenhanges physikalischer Wirklichkeit.

---

<sup>107</sup> Franz Embacher: EPR-Paradoxon und Bellsche Ungleichung, Oktober 2000, e-mail: fe@ap.univie.ac.at, S8

<sup>108</sup> Vorlesungsvortrag von Prof. Anton Zeilinger: Interpretationen und erkenntnistheoretische Probleme der Quantenphysik vom 10.1.2000



### 2.10.1: Unabhängige Raumbereiche, verborgene Variablen

*"Obwohl sich die Quantenmechanik als angemessenes Hilfsmittel bei der Ordnung einer Unmenge von anderen atomaren Phänomenen betreffenden Tatsachen erwies, gab ihr Verzicht auf gewohnte Forderungen kausaler Beschreibung natürlich Anlaß zu der Frage, ob wir es hier mit einer erschöpfenden Beschreibung der Erfahrung zu tun haben."* <sup>109</sup>

Betrachten wir den von J.S.Bell gestellten Sachverhalt unter der Annahme der Separabilität der beiden Raumbereiche, insofern daß diese Raumbereiche hinreichend voneinander getrennt sind und es vernünftig erschiene von zwei unabhängigen Messungen zu sprechen.

Der einzige Ausweg, die vollständige Lokalität der quantenmechanischen Objekte nicht vollends aufgeben zu müssen, unterläge der Annahme, daß jedes einzelne Photon des Ensembles eine lokale Eigenschaft in Form einer verborgenen Variablen in sich trägt.

*"Könnte es sein, daß es tatsächlich eine tieferliegende Erklärung gibt, die auch das Verhalten des einzelnen Teilchens ganz genau beschreibt? Wenn es eine solche Beschreibung gäbe, würde der Zufall in der Quantenphysik ein rein subjektiver Zufall sein, der auf unser Unwissen zurückzuführen ist."* <sup>110</sup>

Diese verborgene, im Teilchen lokal verankerte, Eigenschaft würde darüber bestimmen, ob das Photon den Polarisator passieren kann, ob ein "Click" am Detektor verursacht wird.

Diese Betrachtung der Quantenphysik stammt von David J.Bohm, aus dem Jahre 1951, einem amerikanischen Physiker, welcher Einsteins Idee der Lokalität physikalischer Eigenschaften und der damit deterministisch interpretierbaren Physik weiterführen wollte.

---

<sup>109</sup> Niels Bohr: Atomphysik und Philosophie - Kausalität und Komplementarität  
in: Atomphysik und menschliche Erkenntnis, Verlag Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1985, S 106

<sup>110</sup> Anton Zeilinger, Einsteins Schleier – Die neue Welt der Quantenphysik, Verlag C.H.Beck, München 2003, S43

Die Eigenschaft des Photons wäre deshalb als lokal zu bezeichnen, da die Eigenschaft, die über die Passage des Photons durch den Polarisator entscheidet, in jedem einzelnen Photon enthalten wäre, durch ein sogenanntes Quantenpotential geregelt werden würde.

Betrachtet man das Gesamtsystem, ist die Wirkung der Entscheidung eines Photons nur lokal ausgedehnt; die Betrachtung des Gesamten wäre immer auf voneinander unabhängige Events in getrennten Raumbereichen veranschaulichbar.

Die Phänome der E.P.R. Anordnung wären ausschließlich durch Einzelereignisse hervorgerufen, welche in ihrer Summe das Gesamte bilden.

Ein verborgener Parameter der Eigenschaft  $x$  würde demnach eine von zwei möglichen Entscheidung in sich tragen, zum Beispiel:

"Trifft Photon mit Eigenschaft  $x$  auf den Polarisator mit Winkel  $a$ , so wird es passieren; oder es trägt die geteilte Entscheidung der "Nicht-Passage", der Absorption in sich.

In der Bohm'schen Theorie besitzt das Teilchen eine objektive Trajektorie, die "nicht klassischen" Interferenzstreifen am Beispiel des Doppelspaltes sind die Folge der Funktionsweise des Quantenpotentials, der verborgenen Parameter. In dieser Darstellung der Quantenmechanik mit verborgenen Parametern, wird angenommen, daß wenn das linke Photon der E.P.R. – Anordnung den Polarisator passiert, wir nicht annehmen können, daß dadurch auch die Ausrichtung des rechten Photons instantan in der Orientierung von  $a$  festgelegt ist.

Wie bereits erwähnt, ist im realen Quantenexperiment jedoch der Orientierungswinkel mit dem das Photon 2 in  $\beta$  eintreten wird, bereits durch  $a$  festgelegt, wodurch bei  $a=\beta$  niemals ein einzelnes Photon passiert, während auf der anderen Seite ein einzelnes Photon absorbiert wird; es werden ausschließlich passierende Teilchenpaare registriert.

*"Kurz gesagt müssten solche verborgenen Parameter nichtlokal sein, das heißt das Verhalten eines Teilchens müsste wie durch Geisterhand davon abhängen, was zum selben Zeitpunkt an einem weit entfernten Ort geschieht." <sup>111</sup>*

---

<sup>111</sup> Anton Zeilinger, Einsteins Schleier – Die neue Welt der Quantenphysik, Verlag C.H.Beck, München 2003 S44

Das Bild eines lokalen Realismus kann somit nicht mehr aufrechterhalten werden; die zwei separierten Raumbereiche verfügen über keinen Mechanismus miteinander zu kommunizieren und dennoch stehen sie in einer nur durch "Nicht-Lokalität" erklärbaren Verbindung.

*"Das Bohm'sche Quantenpotential erreicht auf diese Weise, dass es sich aufgrund einer einzigen Beobachtung im ganzen Raum, ja im ganzen Weltall sofort ändert. Dieses Potential, von den man annimmt, dass es durchaus real existiert, ist also nicht den Beschränkungen der Lichtgeschwindigkeit unterworfen - eine sehr unplausible Annahme."* <sup>112</sup>

Die Bohm'sche Theorie verborgener Variablen verwickelt sich paradoxerweise in ihren eigenen Beschränkungen, da sie keine Superposition, keine Verschränkung von Zuständen vorsieht.

Auf der "Kopenhagener Linie" bleibt das Einzelereignis vollkommen zufällig, sogesehen wird kein überlichtschneller Informationskanal etabliert, sondern ein zeit- und raumloser Zusammenhang in Form einer Verschränkung angenommen, der, mit der Entstehung der "Zwillingsteilchen" einher ging.

Durch die Zufälligkeit des Einzelereignisses ergibt sich eine Zustandsverursachung durch die Messung.

*"Jordan declared, with emphasis, that observations not only disturb what has to be measured, they produce it. In a measurement of position, for example, as performed with the gamma ray microscope <sup>113</sup>, " the electron is forced to a decision.*

*We compel it to assume a definite position; previously it was, in general, neither here nor there; it had not yet made its decision for a definite position...If by another experiment the velocity of the electron is being measured, this means: the electron is compelled to decide itself for some exactly defined value of the velocity...we ourselves produce the results of measurement."* <sup>114</sup>

Durch die Messung wird der Zustand der "Wirklichkeit" erzeugt.

Die Zustandsreduktion der Wellenfunktion wird dadurch zur ausschließlich theoretischen Konzeption.

---

<sup>112</sup> Anton Zeilinger, Einsteins Schleier – Die neue Welt der Quantenphysik, Verlag C.H.Beck, München 2003, S153

<sup>113</sup> Anm.: Eine nähere Erläuterung des Heisenberg'schen Mikroskopes findet sich in "Einsteins Schleier" auf S 162 ff.

<sup>114</sup> J.S.Bell, Speakable and unspeakable in quantum mechanics, Cambridge University Press, 1993, S142

Es gibt demnach keine vorhandene Wirklichkeit, deren Wahrscheinlichkeitswelle kollabiert, sofern man innerhalb eines experimentellen Ansatzes ein Teilchen registriert. Dementsprechend gibt es ebenfalls keinen bestimmten Weg, welches das Teilchen vor der Messung durchlaufen hätte.

*" Es ist daher viel einfacher und klarer, die Wellenfunktion  $\psi$  nicht als etwas Realistisches zu betrachten, das in Raum und Zeit existiert, sondern lediglich als ein mathematisches Hilfsmittel, mit Hilfe dessen man Wahrscheinlichkeiten berechnen kann. "* <sup>115</sup>

Betrachten wir nun korrelierte Zweiteilchensysteme, so erzeugen wir "Wirklichkeit" nicht nur am Ort der Messung, sondern ebenso am beliebig weit entfernten zweiten Teilchen der Korrelation.

Im folgenden Zitat, bezieht sich J.S. Bell auf das obenstehende Zitat welches den Ansatz von Jordan verdeutlichte; in Folge wird ersichtlich, daß der theoretische Ansatz von A. Einstein keine "geisterhaften Fernwirkungen" zulassen kann.

*"In particular Jordan has been wrong in supposing that nothing was real or fixed in that world before observation. For after observing only one particle the result of subsequently observing the other (possibly at a very remote place) is immediately predictable. Could it be that the first observation somehow fixes what was unfixed, or makes real what was unreal, not only for the near particle but also for the remote one? For E.P.R. that would be an unthinkable "spooky action at distance" "* <sup>116</sup>

Will man jedoch die von A. Einstein als "spooky action at distance" formulierten nicht lokalen Korrelationen vermeiden, muß man sich auf einen objektivierbaren Wirklichkeitszusammenhang beziehen, im Falle von David Bohm ist dies das oben beschriebenen Quantenpotential, welches den Ausgang der Messung vordeterminiert.

Diese verobjektivierbare Eigenschaft, dieser verobjektivierbare Wirklichkeitszusammenhang, ist kein Teil der Kopenhagener Formulierung; deshalb lehnte A. Einstein die Kopenhagener Deutung als unvollständig ab.

---

<sup>115</sup> Anton Zeilinger, Einsteins Schleier – Die neue Welt der Quantenphysik, Verlag C.H.Beck, München 2003, S194

<sup>116</sup> J.S.Bell, Speakable and unspeakable in quantum mechanics, Cambridge University Press, 1993, S143

Er glaubte daran, daß sie durch eine zukünftige neue Deutung der Quantentheorie, welche auf lokaler Kausalität beruht, abgelöst werden könnte.

Albert Einstein mißfiel nicht die Korrelation der Partikel in beiden Raumbereichen, seine Kritik konzentrierte sich auf die instantane Korrelation der Partikel; darauf, daß beide Partikel der Korrelation keine unabhängige Existenz voneinander besitzen könnten, solange die Korrelation der Partikel instantane Folgen auf beiden Seiten des Experimentes hervorbringen kann.

Die Schleife beginnt sich gegenüber der Lokalitätshypothese zu schließen. 1935 als Einstein das E.P.R Papier<sup>117</sup> publizierte, konnten ausschließlich Gedankenexperimente anstatt realer Experimente durchgeführt werden. Es sollten noch Jahrzehnte verstreichen bis experimentelle Ansätze in den Bereich einer möglichen Realisation kommen würden.

### *2.10.2: Ein Partikel zur experimentellen Situation*

*"Die experimentelle Situation ist die; als Bell 1964 seine Ungleichungen aufgestellt hat, war klar, daß es keinen lokalen Realismus geben konnte, jedoch gab es damals keine Experimente die es erlaubt hätten, die Ungleichung zu verletzen" <sup>118</sup>*

Die ersten experimentellen Nachweise der Verletzung der Bellsch'schen Ungleichung gelangen erst in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts. Die besondere Schwierigkeit dieser Experimente liegt darin verborgen, daß der Versuchsaufbau die Möglichkeit einräumen muß, die experimentelle Anordnung sehr schnell zu verändern um lokale Effekte auszuschließen. Anhand des oben dargestellten korrelierten Zweiteilchensystems muß die Ausrichtung der Polarisatoren in den beiden Strahlgängen sehr schnell schaltbar sein; vergleichbar mit dem 2. Strahlteiler beim Mach-Zehnder Interferometer mit verzögerter Auswahl (siehe 2.4.5.).

---

<sup>117</sup> A. Einstein, B. Podolsky und Nathan Rosen: Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?, Physical Review, Vol. 47, 1935, S 777-780

<sup>118</sup> Vorlesungsvortrag von Prof. Anton Zeilinger: Interpretationen und erkenntnistheoretische Probleme der Quantenphysik, vom 10.01.2000

Die kurzzeitige Änderung der Polarisationswinkel auf beiden Seiten des Experiments muß derart schnell vor sich gehen, daß es nicht möglich ist einen lichtschnellen, der Maximalgeschwindigkeit von Signalübertragung entsprechenden Informationsaustausch, zu etablieren.

*"1972 wurde von Freedman und Clauser das erste Experiment veröffentlicht, das explizit zur Untersuchung der Bell'schen Ungleichung angelegt war."* <sup>119</sup>

Die Verletzung der Ungleichung betrug  $0.300 \pm 0.008 \leq 0.25$ .

Ein häufig zitiertes Experiment, welche die Verletzung der Bell'schen Ungleichung nachweisen konnte und damit die von Albert Einstein kritisierten "Nicht-Lokalen Effekte" die "Spooky Actions" bestätigte, fand 1982 in Paris statt und wurde von Alain Aspect durchgeführt.

Die Schaltzeit, der in diesem Experiment eingesetzten Polarisationsfilter belief sich auf 10 Nanosekunden gegenüber ihrer Emmissionzeit von 5 Nanosekunden und ihrer Flugdauer von 40 Nanosekunden.

Das Ergebnis stellte sich im Verhältnis von  $0.126 \pm 0.014 \leq 0$  dar.

Seit dem Beginn dieser Experimente, wurden bereits eine Vielzahl von E.P.R. Experimenten zur Bestätigung der Verletzung der Bell'schen Ungleichung durchgeführt, vor allem in der letzten halben Dekade, in der die Verknüpfung mit der Quantenkryptographie tragend wurde, setzte ein weltweiter "Boom" in diesem Forschungsgebiet ein.

Durch die Quantenkryptographie wird somit erstmals eine praktische Anwendung der experimentellen Ergebnisse, die Verletzung der Bell'schen Ungleichung betreffend, hervorgebracht.

Ein weiteres wichtiges "E.P.R. Experiment" war das "Innsbrucker Experiment" welches im Jahre 1998 veröffentlicht wurde und im Rahmen der Dissertation von Gregor Weihs in der Gruppe der heutigen Professoren Anton Zeilinger und Harald Weinfurter durchgeführt wurde.

---

<sup>119</sup> Gregor Weihs, Ein Experiment zum Test der Bellschen Ungleichung unter Einsteinscher Lokalität, Dissertation - Universität Wien - Institut für Experimentalphysik, 1999, S33

Die beiden Versuchstationen waren bereits 360 Meter voneinander entfernt.

*"Das bedeutet, dass ein Lichtsignal für diese Strecke mindestens 1,2 Mikrosekunden, eine Mikrosekunde ist das Millionstel einer Sekunde, benötigt.*

*Dies erscheint unglaublich schnell, jedoch kann man durch superschnelle elektronische Schalter die Orientierungen, entlang denen die Polarisation des Lichts gemessen wird, im allerletzten Moment, das heißt innerhalb einer Zeit von weniger als einer Zehntel Mikrosekunde, noch ändern. Dies wurde im Experiment nach dem Zufallsprinzip durchgeführt, trotzdem stimmten die Vorhersagen mit der Quantenphysik überein."*<sup>120</sup>

Mit der Quantenphysik übereinstimmen bedeutet natürlich, eine dementsprechende Verletzung der Bell'schen Ungleichung festzustellen und damit den lokalen Realismus zu überwinden.

Der Abstand der Versuchstationen wird ständig erhöht, so konnte ein Experiment, welches im Rahmen eines quantenkryptographischen Ansatzes, in der Gruppe um Prof. Harald Weinfurter durchgeführt wurde, bereits eine quantenmechanische Verschränkung innerhalb einer Distanz von 23,4 Kilometer aufrecht erhalten. Die Standorte der Versuchstationen, waren einerseits die Hütte auf der Zugspitze in 2950 Meter Höhe und und andererseits die Bergstation der Karwendelbahn.<sup>121</sup>

Gegenwärtig gibt es Versuche über eine Distanz von mehreren hundert Kilometern, die auf der Bell'schen Ungleichung basierende Quantenkryptographie, zu etablieren. In nicht allzu ferner Zukunft wird der Nichtlokalitätseffekt die Funktionsweise unserer Hochtechnologie entscheidend mitbestimmen.

Quantencomputer könnten die stetige Steigerung der Rechenleistung moderner Computertechnologie gewährleisten, während "klassische" Computer in wenigen Dekaden an ihre per Naturgesetz festgelegten physikalischen Grenzen stoßen werden.

---

<sup>120</sup> Anton Zeilinger, Einsteins Schleier – Die neue Welt der Quantenphysik, Verlag C.H.Beck, München 2003, S93

<sup>121</sup> Anm.: Dieses Experiment wird in den folgenden mir bekannten wissenschaftlichen Abhandlungen dokumentiert und ist im Internet frei zugänglich:

- Christian Kurtsiefer, Quantenkryptographie, Vortrag und "Folien", Workshop des Chaos Computer Club: 19C3-Out of order, Berlin 2002, <http://scotty.quantum.physik.uni-muenchen.de/people/kurtsiefer.html>  
Workshop Vortrag (mp3+mp4 Format): <http://www.ccc.de/congress/2002/fahrplan/event/382.de.html>
- Matthäus Halder, Quantenkryptographie, Ein Freiraumexperiment zur Schlüsselerzeugung über 23,4 km, Zulassungsarbeit für die erste Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien, durchgeführt an der Maximilian Universität München, in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Harald Weinfurter, 2002, 54 Seiten, <http://xqp.physik.uni-muenchen.de/publ/index>.
- Patrick Zarda, Quantenkryptographie, Ein Experiment im Vergleich, Diplomarbeit an der naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Innsbruck, Arbeitsgruppe: Prof. Dr. Harald Weinfurter 1999, 68S, <http://xqp.physik.uni-muenchen.de/publ/index>.

Das Innsbrucker Experiment betreffend siehe die bereits zitierte Dissertation von G.Weih.

### 2.10.3.: Eine Sequenz zur Quantenkryptographie

Mit Hilfe der Möglichkeit der Winkeleinstellung der oben dargestellten Polarisationsfilter ist es möglich, innerhalb eines korrelierten Zweiteilchensystems<sup>122</sup>, die Polarisationsfilter auf vier mögliche Winkel, auf vier mögliche "Bell Basen" einzustellen. Sowohl Polarisationsfilter 1 auf der linken Seite der "Zwillingsphotonenquelle", als auch Polarisationsfilter 2 auf der rechten Seite werden somit entweder auf  $+45^\circ$  oder  $-45^\circ$  beziehungsweise auf  $0^\circ$  oder  $90^\circ$  eingestellt.

Wird nun an beiden von der Quelle ausgesendeten Photonen durch die Polarisationsfilter gemessen, so werden zwei Zustände erzeugt, welche als eine Menge von zwei Bits, von zwei "binary digits" dargestellt werden können und damit angewandter Informationsverarbeitung zugänglich sind. Diese zwei Bits, stellen sich uns vorerst als zwei klassische Bits dar, welche am Beispiel der Zweiteilchensysteme mit Polarisationsfilter, zwei voneinander unabhängig gesetzten Polarisationswinkelmessungen entspricht, oder am Beispiel einer doppelten Doppelspaltvariante zwei voneinander unabhängigen Wegmessungen entsprechen würden.

*"Wir könnten jedoch auch etwas viel Interessanteres tun: Wir können diese beiden Bits an Information dazu verwenden, lediglich festzulegen, wie sich die Messresultate der Polarisation von beiden Photonen relativ zueinander verhalten, sollten sie gemessen werden."*<sup>123</sup>

Aus dieser Konstellation lassen sich vier mögliche verschränkte Zustände ableiten, welche jeweils auf einer von vier möglichen Zweierkombinationen in Form von Ja – Nein. Entscheidungen beruhen.

*"Es ist unerheblich, welche Messung zuerst und welche als zweite stattfindet und so weiter. Alleine die Gesamtinformation des Systems legt fest, wie sich die Messresultate aufeinander beziehen."*<sup>124</sup>

---

<sup>122</sup> vgl.: Kap. 2.9

<sup>123</sup> Anton Zeilinger, Einsteins Schleier – Die neue Welt der Quantenphysik, Verlag C.H.Beck, München 2003, S223

<sup>124</sup> ebd., S224



Da das Resultat der Messung vollständig zufällig zustande kommt, wird im statistischen Mittel nur jede vierte Messung eine Übereinstimmung der Zustände in den "Bell Basen" beider Seiten der Korrelation ergeben.

Die in heutigen Experimenten eingesetzten "Bell State Analyzer" zeigen demnach nur in einer von vier Messungen eine Übereinstimmung.

Das Maß der stattgefundenen Übereinstimmungen muß über einen "klassischen Kanal" abgeglichen werden.

Die Situation besagt nun, daß eine vorhandene Übereinstimmung auf beiden Seiten der experimentellen Struktur instantan auftritt, also unabhängig von Zeit und Raum emergiert, die Information über diese Tatsache kann jedoch erst dann empfangen werden, wenn man die Meßergebnisse von beiden Seiten des Experimentes erhält.

Da dieses Abgleichen der Meßresultate auf beiden Seiten der Meßanordnung, nur über einen, bereits oben bezeichneten "klassischen Kanal", das heißt einer nicht-quantenmechanischen Informationsübertragung ermöglicht ist, ist auch keine direkte Informationsübertragung im "überlichtschnellen Bereich" möglich, somit kommt die Quanteninformation in "Interferenz" mit der Relativitätstheorie, damit meine ich, daß die Quantenmechanik nicht in Konflikt mit der Relativitätstheorie gerät. Eine Betrachtung des Zusammenhanges unter der deterministischen Perspektive getrennter lokaler "Events", also der Vollständigkeit lokaler Einzelereignisse, kann jedoch nicht verifiziert werden, da die Verschränkung der Zwilling photons unabhängig von Raum und Zeit aufrecht erhalten bleibt.



Abb. "Quantenwürfel" <sup>125</sup>

<sup>125</sup> Abbildung aus: Anton Zeilinger, *Jenseits der Gewißheit – Das Rätsel der Quantenwelt*, S5 von 8  
Ausstellung in der Neuen Galerie in Graz (1997) und im Ludwig Museum in Budapest (1996)  
Katalog im Passagen Verlag, Wien  
<http://www.ap.univie.ac.at/users/fe/Quantentheorie/sciweek2000/Zeilinger-Artikel>

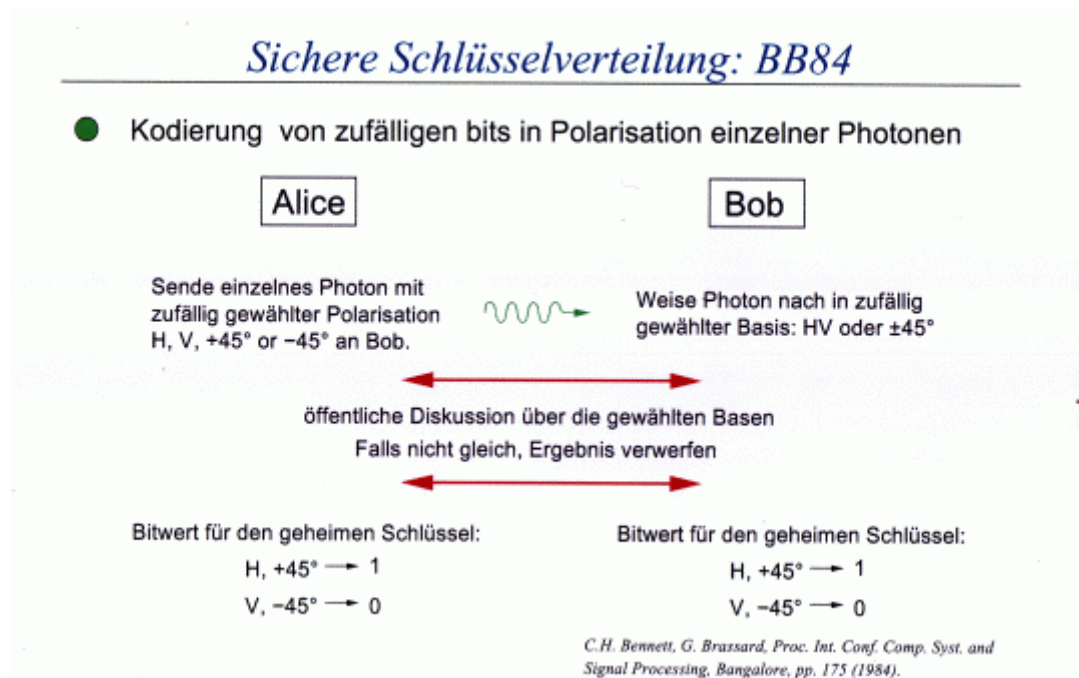
"Prinzip des Einstein-Podolsky-Rosen Experiments.

Zwei Würfel, die quantenmechanisch verbunden sind, werden auch bei noch so großer Entfernung voneinander immer die gleiche zufällige Zahl zeigen." <sup>126</sup>

Das erste Quantenmechanische Informationsübertragungsprotokoll welches auf einer solchen quantenmechanischen Verschränkung basiert, ist das BB84-Protokoll, von dem bei I.B.M., in der quantenmechanischen Grundlagenforschung arbeitenden Physiker Charles H. Bennet und dem Physiker Gilles Brassard von 1984.

Dieses Protokoll bildet den experimentellen Beginn der Quantenkryptographie. Betrachten wir nun eine experimentelle Anordnung in der wir die beiden Seiten des Experimentes mit "Alice" und "Bob" bezeichnen und gehen wir davon aus, daß Alice an Bob ein polarisiertes Photon sendet.

Bild: BB84 <sup>127</sup>



<sup>126</sup> ebd.

<sup>127</sup> Christian Kurtsiefer: Quantenkryptographie, Vortrag und "Folien", Workshop des Chaos Computer Club: 19C3-Out of order, Berlin 2002, Folie: Sichere Schlüsselverteilung BB-84

*"Alice wählt eine zufällige Polarisierung und schickt dieses Photon an Bob. Bob weißt dieses Photon entweder in der Horizontal, Vertikal - Basis oder in der +/- 45° Basis nach."*

*"Anschließend diskutiert der Empfänger öffentlich darüber, welche der beiden möglichen Basen er gewählt hat, also Bob wird Horizontal, Vertikal oder ein +/- 45° Ergebnis von dieser Messung erhalten."*

*Und er teilt öffentlich dem Sender mit welcher dieser beiden Kombinationen er gewählt hat. Er sagt aber nicht, was sein Ergebnis war."*

*Jetzt weiß Alice,... Alice weiß sowieso welche Polarisierung sie losgeschickt hat; Bob weiß, was er gemessen hat und beide Parteien verfügen jetzt über ein gemeinsames Bit." <sup>128</sup>*

Der im Zitat genannte "öffentliche Sender" ist dem oben erwähnten "klassischen Kanal" gleichzusetzen; der eigentliche "Träger" der Information fließt jedoch durch den Quantenkanal.

Das Außerordentliche in diesem Zusammenhang erscheint, wenn man bedenkt, daß wir es bei der Betrachtung des Quantenkanals mit einer quantenmechanischen Verschränkung zu tun haben. Sollte ein möglicher Abhörer dieses quantenkryptographischen Zusammenhanges einen Abhörversuch unternehmen, so muß dieser Versuch eine Messung des Quantenkanals beinhalten. Diese Messung zerstört jedoch die Verschränkung der beiden Photonen, da jegliche Messung einer Quantenstruktur eines Verschwindens der Superposition, einer "Wegmessung" entspricht.

Ein möglicher Abhörer erzeugt so Fehler in der Bitfolge zwischen Alice und Bob und deshalb kann, um es einfach darzustellen, per Naturgesetz ausgeschlossen werden, daß ein möglicher Abhörer unentdeckt bleiben kann.

An diesem Beispiel zeigt sich, daß die Grundlagenforschung eben die Grundlage unserer wissenschaftlich-technischen "Ausformung" bildet.

Die Frage nach der Lokalität des Einzelereignisses transformiert sich zu einer technischen Anwendung, welche die Nichtlokalität verschränkter Struktur als Basis ihrer Funktionalität verwendet.

---

<sup>128</sup> Christian Kurtsiefer: Quantenkryptographie, Vortrag und "Folien", Workshop des Chaos Computer Club: 19C3-Out of order, Berlin 2002, [Anm.: Vortrag als .mp4 Datei verfügbar: <http://www.ccc.de/congress/2002/fahrplan/event/382.de.html> / Zitatbeginn: 29min.,41sek.]

"Re-loop to philosophy!"

Die [philosophische] Struktur der Transformation unseres Weltbildes durch die Verifizierung von Zusammenhängen unabhängig von Raum und Zeit, wird die "innere" Struktur unserer Wirklichkeitsbetrachtung verändern.

*" Es ist meine Überzeugung, dass die dadurch notwendigen Änderungen unseres Weltbildes so groß sein werden, dass alle möglichen technischen Konsequenzen im Vergleich dazu klein erscheinen werden. "* <sup>129</sup>

[Prof. Anton Zeilinger]

---

<sup>129</sup> Anton Zeilinger, Einsteins Schleier – Die neue Welt der Quantenphysik, Verlag C.H.Beck, München 2003, S134

*Ein Ausblick zur Struktur der Wirklichkeit*

*"Das eigentlich Substantielle sind die Beobachtungsergebnisse.*

*Was bedeuten aber Beobachtungsergebnisse letztlich?*

*Nichts anderes als Information..."* <sup>130</sup>

Information und Wirklichkeit verschmelzen in dieser Betrachtung ineinander, werden zu ein- und demselben.

Wirklichkeit erhält ihre Form durch das Vorhandensein ihrer Information.

*"Naturgesetze dürfen keinen Unterschied machen, zwischen Wirklichkeit und Information"* <sup>131</sup>, so Anton Zeilinger.

Das Wissen über die Wirklichkeit transformiert so zur eigentlichen Wirklichkeit.

Wirklichkeit existiert somit genauso wenig unabhängig von Information, wie der Raum von der Zeit.

Da beobachtbare Wirklichkeit der Information aus der Beobachtung entspricht, ist es unmöglich herauszufinden, ob die Information, welche wir über die Wirklichkeit besitzen können, der Natur einer eigentlichen Wirklichkeit entspricht, oder ob der Raum in dem sich unsere Wirklichkeit ausformt nur einen Teilaspekt einer "dahinterliegenden" Gesamtwirklichkeit bildet.

*"Es wird daher nie möglich sein, durch unsere Fragen zum Kern der Dinge vorzustößen. Vielmehr erhebt sich stattdessen begründeter Zweifel, ob überhaupt ein solcher Kern der Dinge, der unabhängig von Information ist, tatsächlich existiert.*

*Da er im Prinzip nie nachgewiesen werden kann, erübrigt sich letztlich wohl auch die Annahme seiner Existenz."* <sup>132</sup>

Ein solcher Kern, der unabhängig von jeder physikalischen Wechselwirkung, unabhängig von jeder Information Bestand hätte, ist kein Teil unserer Wirklichkeit; Sogesehen ist nun schwer zu interpretieren, daß ein Kern der Wirklichkeit mit der Wirklichkeit nichts zu tun hat.

---

<sup>130</sup> Anton Zeilinger, *Einsteins Schleier – Die neue Welt der Quantenphysik*, Verlag C.H.Beck, München 2003, S214

<sup>131</sup> ebd. S216

<sup>132</sup> ebd. S230

Ist demnach keine "Wirklichkeit" denkbar und konstruierbar, welche keinen Teil unserer Wirklichkeit bildet?

Ist ein makrophysikalischer Gegenstand, der nicht der Dekohärenz unterliegt, ein Teil unserer Wirklichkeit?

Am Beispiel korrelierter Zweiteilchensysteme über weite räumliche Distanzen kann man sich leicht vorstellen, sich an einem der beiden Enden, an einer der beiden Versuchsstationen zu befinden.

Die Beobachter der jeweiligen Versuchstation beobachten eine instantane Zufälligkeit der Ereignisse, welche erst dann Sinn ergeben und damit zur Information werden, wenn die beiden Basen eine Koinzidenz aufweisen.

Um herauszufinden bei welchen Beobachtungsereignissen diese Übereinstimmung zwischen den beiden Basen aufgetreten ist, muß ein "klassischer Kanal" eingesetzt werden.

Ein nichtlokales "Ereignis" wird nur dann zur Information, wenn es durch einen "klassischen Kanal" in die klassische, lichtschnelle Wirklichkeit geholt wurde.

Zeit und Zeitlosigkeit.

In sich verkehrende Bahnen.

*Literaturverzeichnis*

- [1] Stefan Bauberger, Naturphilosophie - Grenzfragen der Physik - Aufbau der Materie, Kosmologie, Quantentheorie, Hochschule für Philosophie, München, Skriptum Sommersemester 1999, e-mail: stefan@bauberger.net
- [2] J.S.Bell, Speakable and unspeakable in quantum mechanics, Cambridge University Press, 1993
- [3] Niels Bohr, Atomphysik und menschliche Erkenntnis, Vieweg, Braunschweig, 1985
- [4] Birgit Dopfer, Zwei Experimente zur Interferenz von Zwei-Photonen Zuständen, Ein Heisenbergmikroskop und Pendellösung, Universität Innsbruck, Diss., Arbeitsgruppe Prof. Anton Zeilinger, 1998
- [5] A. Einstein, B. Podolsky und Nathan Rosen, Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?, Physical Review, Vol. 47, 1935
- [6] Franz Embacher, EPR-Paradoxon und Bellsche Ungleichung, Oktober 2000, <http://www.ap.univie.ac.at/users/fe/Quantentheorie/EPR/>  
e-mail: fe@ap.univie.ac.at
- [7] Elisabeth Emter, Literatur und Quantentheorie, Die Rezeption der modernen Physik in Schriften zur Literatur und Philosophie deutschsprachiger Autoren (1925-1970), de Gruyter, Berlin - New York, 1995, Zugl.: Berlin, Univ. Diss., 1994
- [8] Timothy Ferris, Galaxien, Birkhäuser, Basel, 1996
- [9] George Gamow, Mr. Tompkins' seltsame Reisen durch Kosmos und Mikrokosmos, Vieweg, Braunschweig, 1980
- [10] - , Die Unbestimmtheitsrelation, in: Quantenphilosophie, Spektrum, Akad. Verlag, Heidelberg, 1996

[11] Domenico Giulini und Norbert Straumann, " ...ich dachte mir nicht viel dabei...", Plancks ungerader Weg zur Strahlungsformel, Oktober 2000, arXiv:quant-ph/0010008, <http://xxx.lanl.gov>

[12] Gerhard Grössing, Die Beobachtung von Quantensystemen, in: Konstruktivismus und Kognitionswissenschaft - Kulturelle Wurzeln und Ergebnisse [Heinz von Förster gewidmet], Hrsg.: Albert Müller, Karl H. Müller und Friedrich Stadler, , Springer-Verlag, Wien, 1997

[13] Matthäus Halder, Quantenkryptographie, Ein Freiraumexperiment zur Schlüsselerzeugung über 23,4 km, Zulassungsarbeit für die erste Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien, durchgeführt an der Ludwig Maximilian Universität München, in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Harald Weinfurter, 2002, <http://xqp.physik.uni-muenchen.de/publ/index>

[14] Werner Heisenberg, Quantentheorie und Philosophie, Philipp Reclam jun. GmbH&Co, Stuttgart, 1979, 2000

[15] Christian Kurtsiefer, Quantenkryptographie, Vortrag und "Folien", Workshop des Chaos Computer Club: 19C3-Out of order, Berlin 2002  
Folien: <http://scotty.quantum.physik.uni-muenchen.de/people/kurtsiefer.html>  
Vortrag (mp3+mp4 Format):  
<http://www.ccc.de/congress/2002/fahrplan/event/382.de.html>

[16] Rainer Müller und Hartmut Wiesner, Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik, Qualitativer Basiskurs,  
e-mail: [rainer.mueller@physik.uni-muenchen.de](mailto:rainer.mueller@physik.uni-muenchen.de)

[17] Klaus Muthsam, Computerprogramm "Doppelspalt.exe", 1999  
e-mail: [Doppelspalt@gmx.de](mailto:Doppelspalt@gmx.de)  
<http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/Doppelspalt.htm>

[18] Parmenides, Über das Sein, Philipp Reclam jun., Stuttgart, 1985



- [19] Henri Poincare, Der Wert der Wissenschaft, Übersetzt von E.Weber, Teubner, Leipzig, 1906, in: Zeit im Wandel der Zeit, Hrsg.: Peter C. Aichelburg, Vieweg, Braunschweig - Wiesbaden, 1988
- [20] Roman Sexl, Baumann Kurt: Die Deutungen der Quantentheorie, Braunschweig - Wiesbaden, Vieweg, 1984
- [21] - , Herbert Kurt Schmidt, Raum - Zeit - Relativität, Vieweg, Braunschweig 1990
- [22] Erwin Schrödinger, Geist und Materie, Zsolnay, Wien - Hamburg, 1986
- [23] Gerhard Schwarz, Raum und Zeit, WUV-Universitätsverlag, Wien, 1992
- [24] Gregor Weihs, Ein Experiment zum Test der Bellschen Ungleichung unter Einsteinscher Lokalität, Diss., Universität Wien, Institut für Experimentalphysik, Arbeitsgruppe von Prof. Anton Zeilinger, 1999
- [25] Carl Friedrich von Weizsäcker, Aufbau der Physik, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co.KG, München, 1994
- [26] Patrick Zarda, Quantenkryptographie, Ein Experiment im Vergleich, Diplomarbeit an der naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Innsbruck, Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Harald Weinfurter, 1999
- [27] Anton Zeilinger, Einsteins Schleier - Die neue Welt der Quantenphysik, Verlag C.H.Beck, München, 2003
- [28] - , Jenseits der Gewißheit - Das Rätsel der Quantenwelt, Ausstellung in der Neuen Galerie in Graz (1997) und im Ludwig Museum in Budapest (1996) Katalog im Passagen Verlag, Wien  
<http://www.ap.univie.ac.at/users/fe/Quantentheorie/sciweek2000/Zeilinger-Artikel>

*Danksagung:*

Vielen herzlichen Dank an Herrn Professor Michael Benedikt für die Betreuung und Unterstützung der vorliegenden Arbeit.

Vielen Dank auch den zahlreichen hervorragenden WissenschaftlerInnen und kreativen StudienkollegInnen für ihre konstruktiven Interferenzen.

Besonderer Dank gilt auch meiner zukünftigen Frau Doris und meiner lieben Tochter Anna Yoko für die Zeit, die sie für mein Vorhaben opfern mußten.

Herzlichen Dank auch meiner Mutter, welche immer an mich glaubte und mich mit langjährigen finanziellen Zuwendungen unterstützte.