

(Dies ist ein Teil des Buchs [Der Begriff der Wirklichkeit.pdf](#))

## Inhalt:

3. Lokale und objektive Interpretation der Quantentheorie	
3.1. Vorbemerkung.....	2
3.2. Einleitung: zwei Beispiele.....	2
Paradoxon der zwei Wege.....	2
Doppelspalt-Experiment.....	6
3.3. Zurück zu den Anfängen.....	8
3.4. Der Lichtelektrische Effekt.....	9
3.5. Der Compton-Effekt.....	17
3.6. Die Reduktion der Wellenfunktion: Was wirklich geschieht.....	23
3.7. Die Reduktion der Wellenfunktion: Verallgemeinerung.....	32
3.8. Die zentrale Annahme der lokalen und objektiven Interpretation.....	36
3.9. Einwände.....	37
3.10. Erklärung der Unschärfe; Interpretation des Formalismus.....	42
3.11. Anwendungen.....	49
Elektron in der Schachtel.....	49
Schrödingers Katze.....	50
EPR-Paradoxon.....	50
Computersimulation.....	57
<i>Doppelte Wunder</i> .....	63
Paradoxon der zwei Wege.....	64
Wechselwirkungsfreie Quantenmessungen.....	66
3.12. Geschichtlicher Kommentar.....	69
3.13. Schlussbetrachtung.....	71
4. Abschließende Bemerkungen	
4.1. Kurze Zusammenfassung.....	75
4.2. Der Widerspruch zum Standardmodell.....	77
4.3. Verborgene Ontologie.....	80
4.4. Ausblick.....	82

### **3. Lokale und objektive Interpretation der Quantentheorie**

#### ***3.1. Vorbemerkung***

Der einfachste Weg, die Struktur der Quantentheorie zu skizzieren und zugleich die Problematik ihrer Interpretation aufzuzeigen, führt über paradigmatische Anwendungsfälle. Vor der Quantentheorie dienten solche Beispiele dazu, den Zusammenhang des jeweiligen Formalismus mit dem ihm zugrunde liegenden, *tatsächlich stattfindenden* physikalischen Vorgang verständlich zu machen. In der Quantentheorie aber dienen sie dem Gegenteil: sie demonstrieren, dass der Versuch, zu erklären, welches reale Geschehen sich hinter dem Formalismus verbirgt, aussichtslos ist.

Deshalb sollen nun als Einleitung zwei bekannte Szenarien präsentiert werden – zunächst in der gewohnten Form, um nochmals klar herauszustellen, zu welch seltsamen, um nicht zu sagen: absurden Annahmen uns die Natur zu zwingen scheint. Eine solche Erinnerung ist vielleicht nicht ganz überflüssig – das reibungslose Funktionieren des Formalismus könnte leicht dazu führen, dass diese Interpretationsprobleme allzu weit in den Hintergrund treten.

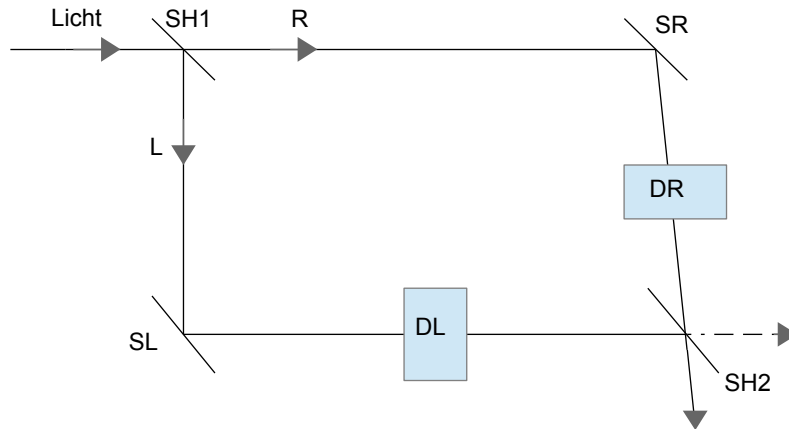
Danach werden Schritt für Schritt die Mittel erarbeitet, die für eine lokale und objektive Interpretation der Quantentheorie benötigt werden. Im weiteren Verlauf werden dieselben Szenarien – und einige andere – in den neuen Zusammenhang gestellt und auf eine Weise erklärt, die alle Absurditäten verschwinden lässt und einsichtig macht, was *wirklich* geschieht. Die neue Interpretation vermeidet aber nicht nur die Seltsamkeiten der üblichen Sichtweise, sie steht überdies auch dem Formalismus näher.

Wie zuvor bei der Erklärung der Relativitätstheorie kann auf das formale Instrumentarium weitgehend verzichtet werden – es handelt sich um reine Interpretationsfragen.

#### ***3.2. Einleitung: zwei Beispiele***

##### **Paradoxon der zwei Wege**

Betrachten wir folgendes Experiment:



(S1)

Ein Lichtstrahl läuft (links oben beginnend) durch die skizzierte Versuchsanordnung. Die Intensität des Lichts wird so gering gewählt, dass sich fast mit Sicherheit nur ein einziges Photon im dargestellten Bereich befindet.

Zunächst durchquert das Licht den halbdurchlässigen Spiegel SH1. Auf den beiden Wegen L und R wird es durch normale Spiegel SL bzw. SR so umgelenkt, dass sich die Strahlen an einem weiteren halbdurchlässigen Spiegel SH2 wieder vereinigen. Die Längen von L und R sind so abgestimmt, dass beim zweiten halbdurchlässigen Spiegel die Phase des den Weg L durchlaufenden Lichts nicht mit der Phase des den Weg R durchlaufenden übereinstimmt und einer der beiden Strahlen durch destruktive Interferenz verschwindet. In beide Strahlengänge können wahlweise Photonendetektoren (DL und DR) gebracht werden.

Der Verlauf des Versuchs zeigt folgende – in der üblichen Betrachtung unbehebbar – Absurdität:

Wenn sich die beiden Detektoren *nicht* in den Strahlengängen befinden, dann tritt nach dem zweiten halbdurchlässigen Spiegel *Interferenz* auf, das heißt: Das Photon bzw. die Lichtwelle muss *beide* Wege genommen haben – sonst wäre Interferenz unmöglich.

Dieses Faktum verdient besondere Beachtung:

*Es muss **immer** in beiden Strahlengängen zugleich irgendetwas unterwegs sein, sonst könnte nicht nach dem zweiten halbdurchlässigen Spiegel immer dann, wenn beide Wege frei sind, Interferenz beobachtet werden.*

Wenn nun aber die Detektoren in die Strahlengänge eingebracht werden, so spricht immer nur *ein* Detektor an: da das Photon unteilbar ist, kann es nur (mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils 1/2) *entweder* den Weg L *oder* den Weg R entlang laufen.

Auch diesem Sachverhalt gebührt unsere besondere Aufmerksamkeit:

*Es ist **niemals** auf beiden Wegen zugleich irgendetwas unterwegs, da niemals beide Detektoren zugleich ansprechen.*

Die beiden Sachverhalte widersprechen einander offenbar.

Wie wird dieser Widerspruch in der Standardinterpretation "gelöst"? Folgendermaßen:

Wenn ein Photon in einem der Detektoren gefunden wird, dann verschwindet das Wellenphänomen im anderen Strahlengang augenblicklich! – es ist gewissermaßen nicht existent, es war nur eine "Wahrscheinlichkeitswelle", was auch immer das bedeuten mag.

Das ist die sogenannte *Reduktion der Wellenfunktion*: Eine einzige der wellenartig sich ausbreitenden Möglichkeiten – in diesem Beispiel sind es nur zwei – wird wirklich, und alle anderen verschwinden augenblicklich, gleichgültig, wie weit entfernt sie auch sein mögen.

Wären die Amplitudenquadrate dieser quantentheoretischen Wahrscheinlichkeitswellen einfach nur Wahrscheinlichkeiten, wie beim Würfeln, dann gäbe es kein Problem – dann würde nichts verschwinden, weil es immer nur eine einzige Wirklichkeit gibt: eben den Würfel auf seiner Bahn, vom Beginn des Wurfs an, und weil die Wahrscheinlichkeit von 1/6 für jede Augenzahl bloß der Ausdruck dafür ist, dass wir diese eindeutige Bahn des Würfels einfach nicht kennen.

Von dieser Art können die quantentheoretischen Möglichkeiten aber nicht sein: Sie *interferieren* – es gibt Interferenz, wenn keine Detektoren die Lichtwege unterbrechen. Das *muss* bedeuten, dass in beiden Wegen irgendetwas vorhanden ist. Und was vorhanden ist, kann nicht einfach verschwinden! Es verschwindet aber doch. Und damit – so lautet jedenfalls das allgemeine Credo – müssen wir uns abfinden. Das Paradox ist auch, wie zu Anfang festgestellt, nicht dazu erdacht, um etwas zu erklären, sondern dazu, um zu demonstrieren, dass die Natur sich auf eine Weise verhält, die für uns gänzlich unbegreiflich ist.

Aber halt: vielleicht "weiß" das Photon ja, was wir tun? Wenn die Information darüber, ob die Detektoren in den Strahlengängen sind oder nicht, auf irgendeine Weise am ersten Strahlteiler SH1 vorhanden ist, dann könnte das Photon sich entscheiden, ob es *einen* Weg nimmt oder *beide*.

Auch diese selbst schon wenig plausible Vermutung stellt aber keine Lösungsmöglichkeit des Problems dar.

Wir können nämlich die Entscheidung, ob die Detektoren in die Strahlengänge eingebracht werden oder nicht, so lange hinausschieben, bis das Licht bereits den ersten halbdurchlässigen Spiegel durchquert hat, wenn also bereits entschieden ist, ob es nur *einen* oder ob es *beide* Wege genommen hat. Alles verläuft dann gleich: Ohne Detektoren beobachten wir Interferenz, mit ihnen aber kein gleichzeitiges Ansprechen, sondern eine statistische Folge abwechselnder Ereignisse in beiden Detektoren. Da aber jetzt die Entscheidung, ob das Licht einen oder beide Wege genommen hat, schon gefallen sein muss, scheinen wir *rückwirkend* bestimmen zu können, was es tut bzw. getan hat.

Die Formulierungen, die die Standardinterpretation hier anbietet, erinnern eher an blumentumkränzte Sprechblasen, als dass sie irgendetwas aufklären. Es wird etwa gesagt: "Die Ereignisse können nicht getrennt beschrieben werden. Sie bilden eine Einheit, die erst durch die Messung aufgehoben wird" oder: "Nichts ist ein Ereignis, solange es nicht beobachtet wird".

Tatsächlich mildern solche Äußerungen jedoch nicht im Geringsten die absurde Härte des paradoxen, im Grunde nicht zu akzeptierenden Sachverhalts, dass bei dem beschriebenen Szenario, nicht anders als bei allen quantentheoretischen Beschreibungen, irgendetwas verschwindet, was seine Existenz durch Interferenz beweist, und dass dieses Verschwinden *ohne jede physikalische Vermittlung* stattfindet.

Noch dazu soll dieses Verschwinden *gleichzeitig* mit der Messung erfolgen, also *in beliebiger Entfernung ohne zeitliche Verzögerung*, wobei allerdings nicht klar ist, was das zu bedeuten hat: Würden sich für relativ zueinander bewegte Beobachter die Zeitpunkte des Verschwindens aller Wahrscheinlichkeitswellen, die nicht wirklich werden, etwa ändern?

Genug der Absurditäten! Es ist sicher klar geworden, dass die Gründe, die die Physiker dazu veranlasst haben, das eben Gesagte nicht als *reductio ad absurdum* aufzufassen, sondern als *Interpretation* zu akzeptieren, danach beurteilt werden müssen, ob sie für eine derart extreme Entscheidung stark genug sind, und dass jede Alternative, die solch bizarre Annahmen vermeidet, der gegenwärtigen Sichtweise vorzuziehen ist.

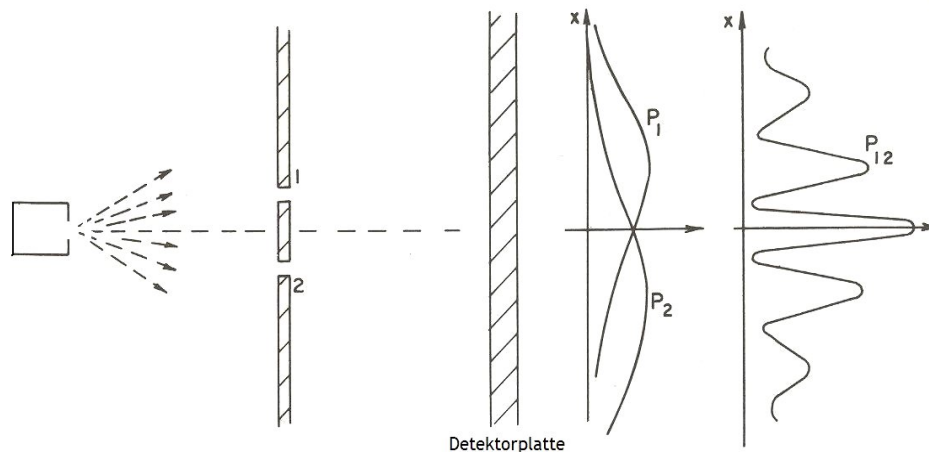
## Doppelspalt-Experiment

Lassen wir wieder Richard Feynman die einleitenden Worte sprechen:

"In diesem Abschnitt werden wir das Grundelement dieses mysteriösen Verhaltens in seiner seltsamsten Form in Angriff nehmen. Zur Untersuchung wählen wir ein Phänomen, das auf klassische Art zu erklären *absolut* unmöglich ist, und das in sich den Kern der Quantenmechanik birgt. In Wirklichkeit enthält es das *einzig*e Geheimnis. Wir können das Geheimnis nicht aufdecken, indem wir 'erklären', wie es funktioniert. Wir können nur berichten, wie es abläuft."<sup>1</sup>

Soweit also der *Status quo*.

Nun aber zur Beschreibung des Experiments:



(S2)

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

<sup>1</sup> Feynman, Leighton, Sands, "Vorlesungen über Physik" Bd. 1, S. 512, Oldenbourg 1987.

Das Scheitern aller Interpretationsversuche wird folgendermaßen dargestellt:

Einerseits treten Elektronen (oder Photonen usw.) ausschließlich als unteilbare Einheiten auf. Sie müssen daher als Teilchen beschrieben werden, das heißt: sie gehen *entweder* durch Spalt 1 *oder* durch Spalt 2.  $P_{1,2}$  ist aber nicht die Summe von  $P_1$  und  $P_2$  – es gibt Interferenz, was im Teilchenbild unmöglich ist. Wir müssen also andererseits das Wellenbild der Elektronen verwenden, um diese Interferenz zu beschreiben. In *diesem* Bild tritt eine Welle durch beide Spalten, wird durch diese gebeugt, interferiert mit sich selbst und trifft auf die Detektorplatte. Abhängig von der Entfernung der Platte vom Doppelspalt kann die Welle dabei beliebig ausgedehnt sein. Wir beobachten aber kein allmähliches gleichmäßiges Ansteigen der Schwärzung der Detektorplatte gemäß  $P_{1,2}$ , sondern eine Folge eng lokalisierter Ereignisse, das heißt einzelner winziger Schwärzungen, die durch jeweils ein Elektron ausgelöst werden, das also jetzt wieder der Teilchenvorstellung entspricht. Erst eine große Zahl solcher lokalen Ereignisse ergibt das Interferenzbild. Mit dem Auftreten des Teilchens verflüchtigt sich augenblicklich die ganze ausgedehnte Welle. (Das ist wieder die *Reduktion der Wellenfunktion*: wieder bleibt von allen wellenförmig sich ausbreitenden Möglichkeiten nur eine einzige übrig, die zum beobachteten Ereignis wird; alle anderen verschwinden.)

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

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

Deshalb wird die Amplitude von  $\Psi$  nicht als Amplitude einer wirklich existierenden Welle aufgefasst, sondern als *Wahrscheinlichkeitsamplitude*. Ihr Quadrat gibt die Wahrscheinlichkeit (bzw. im kontinuierlichen Fall die Wahrscheinlichkeitsdichte) der Ereignisse an.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup>Wenn Sie jetzt gleich erfahren wollen, was beim Doppelspaltexperiment *wirklich* geschieht, müssen Sie im [Abschnitt 3.6](#) weiterlesen.

### 3.3. Zurück zu den Anfängen

Vor 1900 war die physikalische Wirklichkeit in zwei Klassen von Phänomenen aufgeteilt, denen verschiedene Modellvorstellungen zu Grunde lagen: solche, die wellenartiges, und solche, die teilchenartiges Verhalten zeigten. Auf dieser Basis gelang es aber nicht, die Wechselwirkung von Licht, das für eine Welle gehalten wurde, und Materie, die aus Teilchen bestehend gedacht wurde, in Übereinstimmung mit dem Experiment darzustellen. Dafür erschien es notwendig, dem Licht Teilchencharakter zuzuschreiben. Später wurde festgestellt, dass umgekehrt auch den Teilchen Welleneigenschaften zuerkannt werden müssen.

Aus Beobachtungen ergab sich zunächst, als Vorstufe der Quantentheorie, eine neue Einteilung der Phänomene: bei jeder Art von Ortsveränderung – Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung, Bewegung und Verteilung atomarer und subatomarer Partikel – verhalten sich die Objekte wellenartig, was sich insbesondere durch Beugung und Interferenz zeigt; bei Wechselwirkungsprozessen hingegen – Absorption und Emission von Licht, Beschleunigung von Elektronen durch Licht-einstrahlung, Streuung von Licht an Elektronen – verhalten sich die Objekte wie Teilchen.

Der Zusammenhang zwischen den Modellen, die nun, obwohl unvereinbar, *beide* auf dieselben Objekte angewendet werden mussten, wurde durch die Gleichungen

$$E = h\nu \quad \text{und} \quad p = h/\lambda$$

geregelt, wobei  $h$  eine Konstante ist, die Planck bei dem Versuch ermittelt hatte, die Schwarzkörperstrahlung zu beschreiben. (Das gelang ihm nur unter der Voraussetzung, dass ein Oszillator der Frequenz  $\nu$  nicht beliebige Energiemengen aufnehmen kann, sondern nur ganzzahlige Vielfache der Energie  $h\nu$ .)

Wegen des Wellencharakters der Teilchen – genauer wegen der Zuordnung des Impulses zu einer reziproken Wellenlänge – ging die gleichzeitige Existenz von Ort und Impuls verloren. Das Minimum der Ungenauigkeit ihrer gleichzeitigen Bestimmbarkeit wurde durch die Gleichung

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

festgelegt, die sogenannte Unschärferelation.

Ich nehme an, Sie fragen sich, warum das hier noch ein weiteres Mal erzählt wird. Das hat den folgenden einfachen Grund:



Die Struktur der Quantentheorie ergibt sich aus der Tatsache, dass darin all die experimentellen Erfahrungen eingingen, von denen soeben die Rede war.

Will man also die Quantentheorie anders interpretieren, ohne sie jedoch formal zu ändern, dann ist es zunächst notwendig, jene Experimente umzuinterpretieren, die zur Theorie Anlass gaben und durch sie beschrieben werden konnten.

Genau das soll nun geschehen.

Nach Auffassung der meisten Physiker müssen die theoretischen Konstrukte der Physik nach 1900 als Ergebnisse einer Reihe formal und logisch notwendiger Schritte verstanden werden. Ich will das nicht in Abrede stellen. Vielmehr versuche ich, zu zeigen, dass der *erste* Schritt falsch war und somit der Fehler immer schon *vorausgesetzt* wird.

Wenden wir uns nun also diesem ersten Schritt zu, und nehmen wir, nach mehr als hundert Jahren, die Frage nach der Natur der Wechselwirkung von Licht und Materie wieder auf, wie sie sich Einstein vor 1905 darbot.

### ***3.4. Der Lichtelektrische Effekt***

Die experimentellen Fakten zum Lichtelektrischen Effekt:

Wird eine Metallplatte mit UV-Licht bestrahlt, dessen Frequenz  $\nu$  über einer Grenze  $\nu_{\min}$  liegt, dann werden ohne messbare Verzögerung Elektronen freigesetzt, deren kinetische Energie nur von der Frequenz  $\nu$  der Strahlung abhängt.

Das steht in eklatantem Widerspruch zum Wellenbild des Lichts, demzufolge die Energie der Elektronen von der Intensität des Lichts abhängen müsste und ihre Ablösung bei jeder beliebigen Frequenz erfolgen sollte. Überdies wäre eine geradezu enorme Verzögerung (unter realistischen Bedingungen tausende Stunden) bis zur Ablösung des ersten Elektrons zu erwarten, wenn man annimmt, dass die auf eine Fläche der Größenordnung des Elektronenquerschnitts eingestrahelte Lichtenergie sich bis zum erforderlichen Wert summieren müsste.

Einsteins Lösung ist bekanntlich, die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie als *Stossprozess* von Teilchen aufzufassen, und zwar eines Lichtquants mit der Energie  $h\nu$  und eines Elektrons, das mit der Energie  $A$  gebunden ist. Aus der Energiebilanz ergibt sich dann die Beziehung

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2} \quad (A \dots \text{ Ablösearbeit}) \quad (1)$$

Durch die Gleichung wird der Vorgang auf eine Weise beschrieben, die mit dem Experiment übereinstimmt. Insofern ist es sicher gerechtfertigt, dies als korrekte, erfolgreiche Beschreibung aufzufassen. Allerdings würde man es doch vorziehen zu wissen, *wie* diese wunderbare Verwandlung einer Welle in ein Teilchen vor sich gegangen ist – immerhin ist eindeutig bewiesen, dass Licht eine Welle ist.

Man stelle sich vergleichsweise folgende Szene vor: ein Zauberer stellt einen leeren Zylinderhut auf einen Tisch, legt eine Trompete hinein und spricht seine Zauberformel. Aus dem Zylinder springt ein Schwein – und nun weiß man bloß die Geschwindigkeit des Schweins. Trotz des zweifellos vorhandenen praktischen Nutzens – man könnte dem nächsten Schwein wahrscheinlich ausweichen – wäre man damit wohl kaum zufrieden!

In diesem Fall würden wir aber doch keineswegs annehmen, dass eine wirkliche Verwandlung der Trompete in ein Schwein stattgefunden hat. Warum nicht? Ganz einfach: es gibt keine Zauberei.

Warum nehmen wir aber dann die Verwandlung der Welle in ein Teilchen als Tatsache hin?

Der übliche Kommentar – der sich als Erklärung ausgibt – lautet: Unser Denken ist nur für mittlere Größenordnungen geeignet. Sehr Kleines entzieht sich unserem Begriff.

Ersetzen wir doch diese haltlose Behauptung, die für sich allein genommen völlig aus der Luft gegriffen ist und bloß dazu dient, Widersprüche zu vernebeln, ganz einfach durch die

***No-Nonsense Hypothese:*** *Es gibt keine Zauberei. Es gibt in der Natur überhaupt keinen Unsinn irgendwelcher Art.*

Mit dieser Hypothese gerüstet wenden wir uns nun wieder dem Lichtelektrischen Effekt zu.

Dass Licht sich wellenartig verhält, ist vollständig gesichert. Also *ist* es eine Welle. Da es keine Zauberei gibt, verwandelt es sich *nicht* in ein Teilchen – somit muss es in die Wechselwirkung als Welle eintreten.

Zugleich ist aber bekannt, wie eingangs festgestellt, dass es nicht möglich ist, den Lichtelektrischen Effekt als Wechselwirkung zwischen Welle und Teilchen darzustellen.

Also gibt es nur eine einzige Möglichkeit: auch das Elektron muss eine Welle sein.

Aber das Elektron ist doch ein Teilchen! Machen wir uns mit der Annahme, es sei nun eine Welle, nicht erst recht wieder des Glaubens an Hexerei schuldig?

Keineswegs. Ein Teilchen ist nämlich mit seinen Attributen (Wechselwirkungen) nicht *logisch*, sondern bloß *per definitionem* verbunden, und somit ändert sich seine Definition zugleich mit der Änderung der Beschreibung der Wechselwirkung. Wenn es also gelingt, die Wechselwirkung unter der Voraussetzung zu beschreiben, dass das Elektron eine Welle ist, dann hat sich seine Definition geändert – mit anderen Worten: dann war es auch schon vorher eine Welle.

Hingegen ist eine Welle mit ihren Attributen (Wechselwirkungen) *logisch* verbunden: ihre Attribute folgen aus ihrer eigenen Dynamik. Bei einer Welle besteht daher keine Möglichkeit zu einer anderen Definition. Eine Beschreibung der Wechselwirkung, in die eine Welle nicht als Welle eintritt, sondern als Teilchen – wie das in der Darstellung von Einstein der Fall ist – kann also die Definition der Welle nicht ändern; in diesem Fall bleibt die Annahme der Verwandlung (bzw. des Dualismus) unumgänglich.

Die No-Nonsense Hypothese hat uns also zu der Annahme geführt, dass sowohl Licht als auch Elektron *Wellen* sind.

Wie können Wellen *als Wellen* überhaupt wechselwirken? Am einfachsten durch *Superposition*. Wir werden also die Wechselwirkung als Überlagerung der beiden Wellen darstellen.

Zunächst eine Vorüberlegung: Angenommen, in einem Elektron existiere eine Schwingung mit der Frequenz  $\nu$ . Was bedeutet dann, dass das Elektron *ruht*? Es bedeutet, dass die Schwingung *gleichphasig* ist, denn bei Gleichphasigkeit gibt es keine Bewegung. Also gilt für ein ruhendes Elektron

$$y = \cos 2\pi t \nu$$

(Das ist die bekannte Schlussfolgerung von de Broglie.) Für ein mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegtes Elektron ergibt die Lorentz-Transformation

$$y = \cos 2\pi \left( t \nu \frac{1}{k} - x \nu \frac{v}{c^2} \frac{1}{k} \right) \quad \left( k = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)$$

Die Frequenz  $\nu_e$  eines mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegten Elektrons verhält sich zur Frequenz  $\nu_{e_0}$  eines ruhenden Elektrons also wie

$$\frac{\nu_e}{\nu_{e_0}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{k} \quad (2)$$

Für nichtrelativistische Elektronen ist  $v$  klein gegen  $c$  und daher gilt

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx \frac{1}{1 - \frac{v^2}{2c^2}} \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2} \quad (3)$$

Jetzt zur Wechselwirkung. Zunächst betrachten wir die Wechselwirkung zwischen Licht und einem freien Elektron.

Sei also  $\nu_{e_0}$  die Frequenz eines ruhenden, nicht gebundenen Elektrons vor der Wechselwirkung,  $\nu_e$  die Frequenz des nach der Wechselwirkung mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegten Elektrons.

Wir bilden eine Überlagerung aus der das Elektron repräsentierenden<sup>3</sup> gleichphasigen Schwingung

$$y = \cos 2\pi t \nu_{e_0}$$

und einer das Licht repräsentierenden ebenen Welle

$$y = \cos 2\pi \left( t \nu_L - x \frac{1}{\lambda_L} \right)$$

Aus dem Sumpensatz für Winkelfunktionen

---

<sup>3</sup> Es kann natürlich nicht behauptet werden, das Elektron *sei* diese Schwingung. Aber aus der Tatsache, dass diese Schwingung auftritt, lassen sich Schlüsse ziehen.

$$2 \cos a \cos b = \cos(a + b) + \cos(a - b) \quad (4)$$

folgt, dass wir durch die Überlagerung zwei Wellen mit den Frequenzen

$$\nu_{e_0} \pm \nu_L$$

erhalten (wo  $\nu_L$  die Frequenz des Lichts ist).

Die höhere Frequenz muss der Frequenz  $\nu_e$  des durch die Wechselwirkung *beschleunigten* Elektrons entsprechen, also nach (2)

$$\nu_e = \nu_{e_0} + \nu_L = \nu_{e_0} \frac{1}{k} \quad (5)$$

(Die zweite Frequenz diskutieren wir gleich anschließend.)

Dann ist  $\nu_L = \nu_{e_0} \left( \frac{1}{k} - 1 \right)$  und nach (3)

$$\nu_L = \nu_{e_0} \frac{v^2}{2c^2} \quad (6)$$

***Das Quadrat der Geschwindigkeit des Elektrons nach der Wechselwirkung ist also auch hier proportional zur Frequenz des Lichts.***

(Für die zweite Frequenz müssten wir setzen

$$\nu_e = \nu_{e_0} - \nu_L = \nu_{e_0} k \quad (5')$$

Nach (3) ist aber  $k \approx 1 - \frac{v^2}{2c^2}$

und wir erhalten wieder  $\nu_L = \nu_{e_0} \frac{v^2}{2c^2}$

Die Frequenz der zweiten Welle entspräche also der Frequenz eines Elektrons, dessen Geschwindigkeit infolge der Wechselwirkung um  $v$  *vermindert* ist. Da wir aber von einem ruhenden Elektron ausgegangen sind, so dass  $\nu_{e_0}$  nicht weiter verkleinert werden kann, entfällt dieser Teil.)

Bisher haben wir bloß einfache Wellenmathematik angewendet. Um in die Welt der physikalischen Modellbildungen zurückzukehren, multiplizieren wir (6) mit  $h$ :

(Hier ist aber die Tatsache, dass  $h$  eine fundamentale *Einheit* darstellt, ohne Bedeutung – die Multiplikation ist nur aus Dimensionsgründen erforderlich, um auf die "mechanische" Beschreibung überwechseln zu können. Wir werden diesen Schritt anschließend ausführlicher besprechen.)

$$h\nu_L = h\nu_{e_0} \frac{v^2}{2c^2} = m_e c^2 \frac{v^2}{2c^2} \quad (6')$$

Wir erhalten 
$$h\nu_L = \frac{m_e v^2}{2} \quad (7)$$

Um dieses Verfahren auf die Wechselwirkung von Licht mit einem gebundenen Elektron zu übertragen, müssen wir nur in (5) den Frequenzunterschied  $\delta_\nu$  zwischen einem gebundenen und einem freien Elektron einfügen

$$\nu_e = \nu_{e_0} + \nu_L - \delta_\nu = \nu_{e_0} \frac{1}{k} \quad (8)$$

und dieses  $\delta_\nu$  mitlaufen lassen, also

$$h\nu_L - h\delta_\nu = h\nu_{e_0} \frac{v^2}{2c^2} = m_e c^2 \frac{v^2}{2c^2} \quad (8')$$

So gelangen wir schließlich zu 
$$h\nu_L = \frac{m_e v^2}{2} + h\delta_\nu \quad (9)$$

und das ist identisch mit (1).

Vergleichen wir nun die beiden Modelle – das übliche, einem mechanischen Stoß analoge Modell und das hier vorgeschlagene Wellenüberlagerungsmodell.

Die Tatsache, dass die Geschwindigkeit bzw. die Energie der Elektronen nach der Wechselwirkung nur von der Frequenz des Lichts abhängt, lässt sich im mechanischen Stoßmodell nur so erklären, dass immer gleiche, unteilbare, durch ihre Frequenz definierte Lichtteilchen mit den Elektronen in Wechselwirkung treten. (Gäbe es auch andere oder geteilte Lichtteilchen, dann wären nach dem Stoß auch Elektronen mit anderen Geschwindigkeiten zu erwarten.)

Im Wellenmodell hingegen ist diese Tatsache selbstverständlich: Hier verlassen die "Elektronen" die Metallplatte in einem stetigen Prozess, *als Wellen*, deren Frequenz aus der Überlagerung von Licht- und Elektronenwellen folgt. Gemäß Gleichung (4) sind daher nach der Wechselwirkung keine anderen Frequenzen und damit auch keine anderen Energien und Geschwindigkeiten möglich – Wellenüberlagerungen lassen keine anderen Resultate zu. In diesem Modell ist somit klar ersichtlich, warum die Amplitude bzw. die Intensität des Lichts gleichgültig ist, und ebenso, warum keine Verzögerung bis zur ersten Messung auftritt: der Überlagerungsprozess setzt augenblicklich ein. Die Annahme unteilbarer Lichtteilchen ist im Wellenmodell also überflüssig.

Der wichtigste Punkt ist aber der folgende, denn hier wird zum ersten mal der Kern der neuen Interpretation erkennbar:

Die Gleichung 
$$v_L = v_{e_0} \frac{v^2}{2c^2} \quad (6)$$

enthält bereits das wesentliche Ergebnis: das Quadrat der Geschwindigkeit eines freien Elektrons nach der Wechselwirkung mit Licht ist nur von der Frequenz des Lichts abhängig (– für ein gebundenes Elektron muss links noch der Term  $-\delta_v$  eingefügt werden).

Für die Ableitung dieser Gleichung werden nur zwei Voraussetzungen benötigt:

1. Sowohl Licht als auch Elektron sind *Wellen*.
2. Die Lorentz-Transformation gilt.

Ansonsten gehen *keine physikalischen Voraussetzungen* in die Ableitung ein.

Erst nach der Multiplikation von (6) mit  $h$ , also für den Schritt von (6') auf (7):

$$h\nu_L = h\nu_{e_0} \frac{v^2}{2c^2} = m_e c^2 \frac{v^2}{2c^2} \quad (6')$$

$$h\nu_L = \frac{m_e v^2}{2} \quad (7)$$

– und für die physikalische Interpretation von (7) werden die Begriffe *Energie* und *Masse* gebraucht sowie die zwischen diesen Begriffen und der Frequenz geltende Beziehung

$$h\nu = mc^2 = E$$

Mit anderen Worten: Für die Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Licht und Elektron beim Lichtelektrischen Effekt ist die Annahme ausreichend, dass beide Partner Wellen sind. Nicht nur die Annahme von Lichtquanten ist überflüssig – es kann auf *alle* physikalischen Begriffe und Zusammenhänge verzichtet werden. Erst beim Übergang zu einer mechanischen Beschreibung der gewohnten Art treten die Begriffe auf, die sonst die notwendige Basis der Beschreibung bilden: Masse, kinetische Energie, Gesamtenergie.

Hier stehen also die Beschreibungen durch Wellen und durch Teilchen nicht nebeneinander, sondern es besteht eine hierarchische Beziehung zwischen beiden: Die Wellenbeschreibung kommt zuerst – sie ist *fundamental*; die Teilchenbeschreibung ist ihr nachgeordnet – sie ist *abgeleitet*.

Die Gleichungen  $E = h\nu$  und  $p = h/\lambda$  sind daher in diesem Fall kein Beweis für den Welle-Teilchen-Dualismus; sie sind **Definitionsgleichungen** für die Größen Energie und Impuls.

Der Begriff *Energie* wird auf den Begriff *Frequenz zurückgeführt*, und der Begriff *Impuls* auf den Begriff *Wellenlänge*.<sup>4</sup>

Es ist klar: Wenn diese Interpretation, die sich beim Lichtelektrischen Effekt auf ganz natürliche Weise ergibt, tragfähig ist, dann ändert sich formal *nichts* – begrifflich und konzeptionell ändert sich aber *alles*.

---

<sup>4</sup> Vollständig wird diese Rückführung allerdings erst, wenn die Einheit der Masse als selbständiges Konzept beseitigt ist, so dass h seine Rolle als Bindeglied zwischen Wellen und Teilchen verliert. Das kann aber erst im zweiten Teil durchgeführt werden. (In 6. Ein Universum ohne Masse.)



Ich fasse zusammen. Wie zu sehen ist, lässt sich der Lichtelektrische Effekt auf zwei Arten darstellen:

1. Nach dem mechanischen Stoßmodell. Beide Partner werden als Teilchen aufgefasst.

Dann muss entweder eine *objektiv dualistische* Position eingenommen werden (Quanten, die die gesamte Energie tragen, sind in die Wellen eingebettet – dies war Einsteins, de Broglies und später Bohms Standpunkt) oder es muss *Komplementarität* angenommen werden (dies ist die Kopenhagener Interpretation).

Die dualistische Position führt zur expliziten Nichtlokalität, die Kopenhagener Interpretation führt zum Verzicht auf jede Art von Verständnis.

2. Durch Wellenüberlagerung. Beide Partner werden als Wellen aufgefasst.

Dann entfallen die Interpretationsschwierigkeiten, die mit den unter 1. erwähnten Positionen verbunden sind. Weder Dualismus noch Komplementarität sind erforderlich.

Das alles gilt vorläufig nur für den Lichtelektrischen Effekt. Der nächste Schritt, den wir auf unserer Abzweigung vom historischen Gang der Physik unternehmen müssen, ist die Erprobung der Modellannahmen an der Streuung von hochfrequentem Licht (Röntgenstrahlen) an Elektronen.

### ***3.5. Der Compton-Effekt***

Bei der Streuung von Röntgenstrahlen an Elektronen werden zwei Effekte beobachtet, die ebenfalls nicht mit der Annahme vereinbar scheinen, dass Licht nur eine Welle ist:

1. Die Wellenlänge der gestreuten Strahlung ist größer als die der einfallenden.

2. Die Streuwinkelverteilung ist bezüglich Vorwärts- und Rückwärts-Richtung asymmetrisch.

1922 gelang es Arthur Compton, die Streuung von Röntgenstrahlen an Graphit als Stoßprozess von Lichtquanten und Elektronen zu beschreiben.

Er leitete die gemessene, vom Streuwinkel  $\vartheta$  abhängige Differenz zwischen der Wellenlänge  $\lambda_2$  der gestreuten und der Wellenlänge  $\lambda_1$  der einfallenden Strahlung

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_C (1 - \cos \vartheta) \quad (\lambda_C \text{ Compton-Wellenlänge des Elektrons})$$

aus der Annahme ab, dass Lichtteilchen an Elektron-Teilchen gestreut werden.

Der Unterschied zwischen Compton-Effekt und Lichtelektrischem Effekt besteht – aus konventioneller Sicht – darin, dass beim LE das Photon absorbiert wird, dass es also seine ganze Energie an das Elektron abgibt, während beim CE das Photon vom Elektron abgelenkt wird und nur einen Teil seiner Energie verliert.

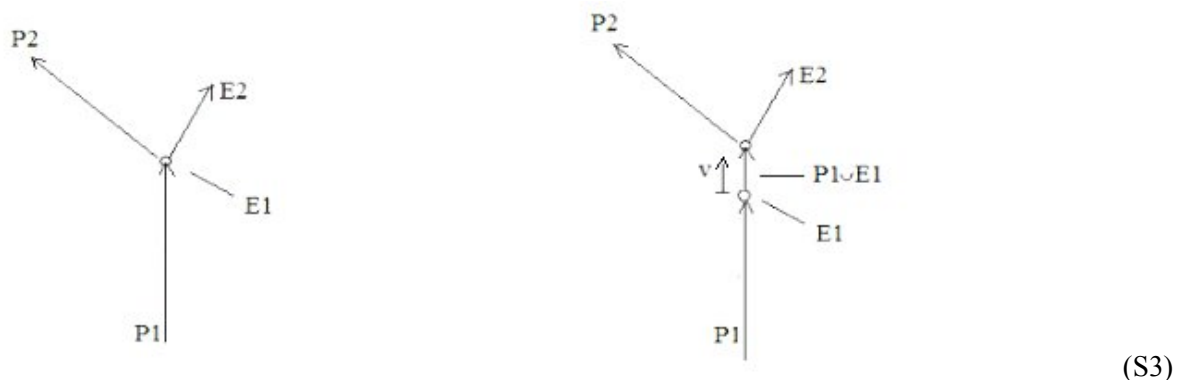
Von dem hier eingenommenen Standpunkt aus besteht der Unterschied zwischen beiden Effekten darin, dass beim LE die beiden Wellen eine dauernde Superposition bilden, während sie sich beim CE wieder trennen.

Aus dieser Sicht erfolgt der Streuprozess Photon-Elektron also in zwei Schritten:

A: Das Photon trifft auf ein ruhendes Elektron. Beide Wellen bilden eine Überlagerung.

B: Beide Wellen trennen sich wieder.

In der folgenden Skizze links der Streuprozess als Stoß, rechts die 2-Schritt Variante:



$P1 \cup E1$  bezeichnet den kurzzeitig bestehenden Überlagerungszustand beider Wellen.

Der ganze Prozess lässt sich also wie folgt beschreiben:

Das ruhende Elektron  $E_1$  vereinigt sich mit dem Photon  $P_1$ . Es wird dadurch zu  $E_+$ . ( $E_+ = P_1 \cup E_1$ ).  $E_+$  bewegt sich mit der Geschwindigkeit  $v$ .  $E_+$  gibt das Photon  $P_2$  ab und wird zum Elektron  $E_2$ .

Nennen wir das Labor-Bezugssystem  $S$ . Wir betrachten nun die Verhältnisse in jenem relativ zu  $S$  mit  $v$  bewegten Bezugssystem  $S'$ , in dem  $E_+$  ruht.  $E_1'$  bewegt sich also relativ zu  $S'$  mit  $-v$ .

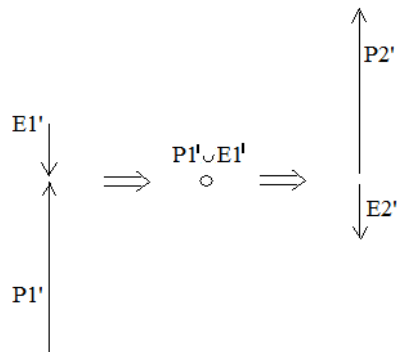
Ein mit  $v$  bewegtes Elektron hat eine de Broglie-Wellenlänge von

$$\lambda_B = \lambda_C \frac{c}{v} k \quad \left( \lambda_C \dots \text{Compton-Wellenlänge des Elektrons, } k = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)$$

Bezüglich  $S'$  gilt also:

(1) Die Wellenlänge von  $E_1'$  beträgt  $\lambda_C \frac{c}{v} k$ .

Wir bleiben in  $S'$ . Nehmen wir nun zunächst den Fall an, dass sich die beiden Wellen genau entlang der Geraden trennen, auf der sich  $P_1'$  zu  $E_1'$  hin bewegt hat.



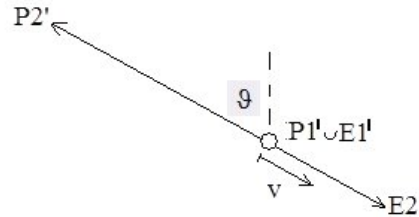
(S4)

Dann ist der Trennungsprozess  $TP(0^\circ)$  offenbar die Umkehrung des Vereinigungsprozesses  $VP$ , und das führt zu

$$P_2' = P_1' \quad \text{und} \quad E_2' = E_1'.$$

$E_2'$  hat dann in  $S'$  wieder (so wie vorher  $E_1'$ ) die Geschwindigkeit  $-v$ .  $P_2'$  wäre in der üblichen Darstellung ein *nicht gestreutes* Photon.

Jetzt gehen wir zu einer beliebigen Trennungsrichtung  $\vartheta$  über. In bezug auf  $S'$  entfernen sich  $P2'$  und  $E2'$  voneinander wieder entlang einer Geraden.



(S5)

Gegenüber dem Trennungsprozess  $TP(0^\circ)$  ist dieser Trennungsprozess  $TP(\vartheta)$  nur gedreht, ansonsten aber unverändert. Es ist also *derselbe* Prozess, der Betrag der Geschwindigkeit von  $E2'$  in  $S'$  ist daher wiederum  $|v|$ , und das aus  $TP(\vartheta)$  hervorgegangene Photon ist bis auf die Richtung identisch mit dem aus  $TP(0^\circ)$  hervorgegangenen Photon.

In Verbindung mit dem Vorhergehenden ergibt sich, dass in  $S'$  gilt:

(2) Das einfallende Photon  $P1'$  und das gestreute Photon  $P2'$  sind bis auf die Richtung identisch.

Es ist somit  $\lambda_{P1'} = \lambda_{P2'}$  für alle Streuwinkel  $\vartheta$ .

Zuletzt benötigen wir noch Folgendes:

In  $S'$  hat  $E1'$  die Geschwindigkeit  $-v$ .  $E_+$  ist relativ zu  $S'$  in Ruhe.

Die Frage ist: Was muss bezüglich  $P1'$  gelten, damit, wie gefordert, in  $S'$  die Geschwindigkeit der Vereinigung  $E_+$  der beiden Wellen  $E1'$  und  $P1'$  gleich 0 wird?

Die de Broglie-Wellenlänge  $\lambda_B = \lambda_C \frac{c}{v}$  des Elektrons ist ein relativistisches Phänomen: Durch

Lorentz-Transformation einer gleichphasigen Schwingung in ein mit  $v$  bewegtes System wird die Phasengleichheit aufgehoben und es entsteht eine Phasenwelle mit ebendieser Wellenlänge. Wenn die

dadurch erzeugte Bewegung wieder verschwinden soll, muss diese Phasenverschiebung aufgehoben werden.

Betrachten wir den kurzzeitigen Überlagerungszustand  $E_+$  der Wellen, die  $P1'$  und  $E1'$  repräsentieren:

$E1'$  wird gemäß (1) repräsentiert durch ( $f_e$  ... Frequenz des ruhenden Elektrons)

$$\cos 2\pi \left( t f_e \frac{1}{k} + x \frac{1}{\lambda_C} \frac{v}{c} \frac{1}{k} \right) = \cos 2\pi \left( t f_e \frac{1}{k} + x \frac{1}{\lambda_B} \right)$$

$P1'$  wird repräsentiert durch

$$\cos 2\pi \left( t f_{P1'} - x \frac{1}{\lambda_{P1'}} \right)$$

Setzen wir nun die Wellenlänge von  $P1'$  gleich der von  $E1'$ , also

$$\lambda_{P1'} = \lambda_B = \lambda_C \frac{c}{v} k,$$

dann entstehen durch die Wellenüberlagerung  $E1' * P1'$  gemäß dem Summensatz für Winkelfunktionen

$$2 \cos a \cos b = \cos(a + b) + \cos(a - b)$$

(genau wie beim Lichtelektrischen Effekt) zwei Wellen:

Bei der ersten Welle verschwindet der  $x$ -Term, was nichts anderes bedeutet, als dass hier tatsächlich die Phasenverschiebung aufgehoben und deshalb die Geschwindigkeit von  $E_+$  gleich 0 ist.

Die zweite Welle würde sich, von  $S$  aus gesehen, entgegen der Richtung des einfallenden Photons bewegen, die Frequenz wäre aber zugleich gegenüber der Frequenz des in  $S$  ruhenden Elektrons  $E1$  verringert, was nicht möglich ist. Wie beim Lichtelektrischen Effekt entfällt also auch hier dieser zweite Teil.

Somit gilt:

(3) Das einfallende Photon P1' hat im Bezugssystem S' die Wellenlänge

$$\lambda_{P1'} = \lambda_B = \lambda_C \frac{c}{v} k$$

Nun muss nur noch von S' ins Laborsystem S transformiert werden.

Für die Berechnung der Wellenlängen von P1 und P2 benötigen wir lediglich den relativistischen Dopplereffekt für beliebige Winkel  $\vartheta$ , also:

$$\lambda' = \lambda \left(1 - \frac{v}{c} \cos \vartheta\right) \frac{1}{k}$$

In unserem Fall ist

$$\lambda_{P1} = \lambda_{P1'} \left(1 - \frac{v}{c}\right) \frac{1}{k}$$

und, wegen (2)

$$\lambda_{P2} = \lambda_{P1'} \left(1 - \frac{v}{c} \cos \vartheta\right) \frac{1}{k}$$

Daraus folgt

$$\lambda_{P2} - \lambda_{P1} = \lambda_{P1'} \frac{1}{k} \frac{v}{c} (1 - \cos \vartheta)$$

Wird nun der Wert für  $\lambda_{P1'}$  aus (3) eingesetzt, ergibt sich

$$\lambda_{P2} - \lambda_{P1} = \lambda_C (1 - \cos \vartheta)$$

und das ist das gewünschte Resultat.

Was ist mit der Asymmetrie der Streuwinkelverteilung?

In S' sind alle Streurichtungen gleich wahrscheinlich, d.h. gleichverteilt zwischen  $0^\circ$  bis  $360^\circ$ . Bezüglich des Laborsystems S folgt dann die beobachtete, mit der Frequenz der einfallenden Photonen zunehmende Asymmetrie der Streuwinkelverteilung.

Auch bei der Beschreibung der Streuung von hochfrequentem Licht an Elektronen ist es also gelungen, ohne alle physikalischen Voraussetzungen, nur auf die Annahme gestützt, dass sowohl Licht als auch Elektron Wellen sind, das richtige Resultat abzuleiten. Da dieses Resultat als Differenz von

Wellenlängen angegeben ist, war es hier – anders als beim Lichtelektrischen Effekt – bis zum Schluss nicht notwendig, auf die übliche mechanische Beschreibung überzuwechseln oder auch nur irgendeinen der dort notwendigen Begriffe zu erwähnen.

Wie zu sehen war, sind in die Ableitung Symmetrieanahmen eingegangen; sie dienten aber nicht, wie üblich, der Begründung von Erhaltungssätzen, sondern wurden für die Annahme benötigt, dass sich in bezug auf S' nur die Ausbreitungsrichtung der beiden Wellen ändert, nachdem sie sich getrennt haben, dass sie aber ansonsten für alle Streuwinkel identisch sind.

Alles, was am Ende des vorigen Abschnitts zum Lichtelektrischen Effekt gesagt wurde, gilt identisch oder analog auch hier. Eine Zusammenfassung oder ein Kommentar erübrigen sich somit.

Damit sind die beiden Experimente, durch die der Welle-Teilchen-Dualismus der Strahlung in die Physik Eingang fand, durch *Wellenüberlagerungen* beschrieben worden. Die Annahme von Licht-Teilchen erwies sich als überflüssig.

Der nächste Schritt wird nun sein, den Dualismus der Materie zu beseitigen. Diesem Vorhaben scheint die Tatsache entgegenzustehen, dass dieser Dualismus geradezu die Basis des quantenmechanischen Formalismus und seiner Interpretation darstellt.

### ***3.6. Die Reduktion der Wellenfunktion: Was wirklich geschieht***

"Unter den [...] Gegnern der "orthodoxen" Quantentheorie nimmt Schrödinger insofern eine gewisse Ausnahmestellung ein, als er nicht den Teilchen, sondern den Wellen die "objektive Realität" zusprechen will und nicht bereit ist, die Wellen nur als Wahrscheinlichkeitswellen zu interpretieren. [...] Freilich kann Schrödinger [...] nicht das Element von Diskontinuität aus der Welt schaffen, das sich in der Atomphysik überall [...] äußert. In der üblichen Deutung der Quantentheorie ist es an der Stelle enthalten, wo jeweils der Übergang vom Möglichen zum Faktischen vollzogen wird. Schrödinger selbst macht keinen Gegenvorschlag, wie er sich etwa die Einführung des überall zu beobachtenden Elements von Diskontinuität anders als in der üblichen Deutung vorstellen will."<sup>5</sup>

1926 fand Schrödinger seine "Wellenfunktion". Es war seine Intention, sie auf irgendetwas "Reales" zu beziehen. Er hielt es für erforderlich, zu diesem Zweck Wellengruppen zu finden, die nicht auseinanderlaufen, sondern ihre Ausdehnung im Raum beibehalten. Er wollte also *Teilchen*

---

<sup>5</sup>Werner Heisenberg, Phys. Bl. 12 (1956), S. 300.

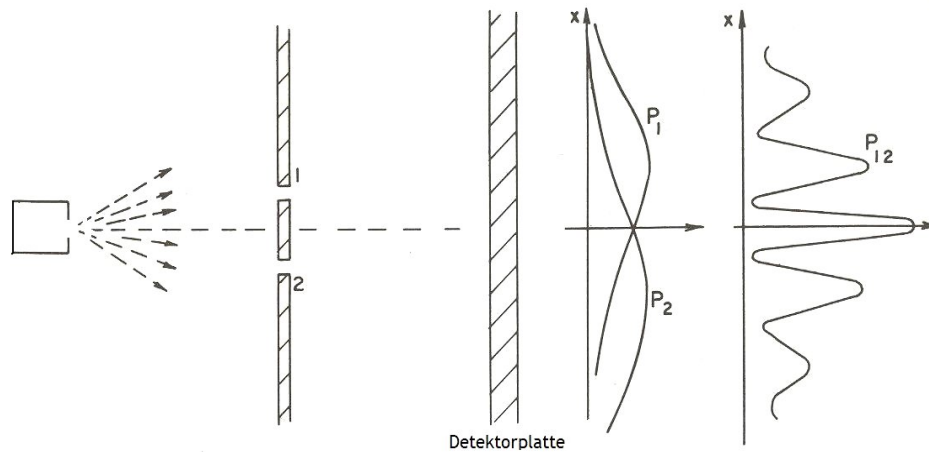
modellieren. Nachdem sich herausgestellt hatte, dass außer beim harmonischen Oszillator bei allen quantenmechanischen Systemen die Wellengruppen auseinanderlaufen, gab er sein Vorhaben auf.

Die entscheidende Frage ist:

*Ist die Möglichkeit, Wellengruppen zu konstruieren, die nicht auseinanderlaufen, tatsächlich eine notwendige Bedingung dafür, der Wellenfunktion irgendein Element der Realität zuzuordnen?*

Die Antwort ist *nein* – aber die Begründung dieser Antwort erfordert eine radikale Umstellung unserer Sicht der (atomaren) Wirklichkeit. Die nun folgenden Erläuterungen verstehen sich als Einführung in diese Umstellung. Ich werde zunächst ein Modell präsentieren, anschließend die Modellannahmen verallgemeinern und danach – im Abschnitt 3.9. – einige mögliche Gegenargumente diskutieren.

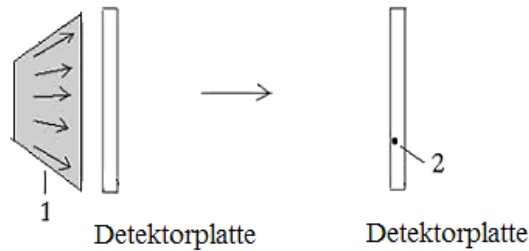
Was Heisenberg mit der Diskontinuität gemeint hat, die an der Stelle des Übergangs vom Möglichen zum Faktischen auftritt, ist natürlich die *Reduktion der Wellenfunktion*. Der Sachverhalt lässt sich an Hand des Doppelspaltexperiments illustrieren:



(S2)

Diesmal konzentrieren wir uns auf folgenden Punkt:





(S6)

Links im Bild, mit **1** bezeichnet, der Zustand des Teilchens – sagen wir: eines Elektrons – im Augenblick des Auftreffens auf eine Detektorplatte: *eine ausgedehnte Welle*, die durch Beugung am Doppelspalt und nachfolgende Interferenz entstanden ist.

Rechts im Bild, mit **2** bezeichnet, die beobachtbare Folge des Zustands desselben Teilchens im nächsten Augenblick: *ein Schwärzungspunkt*.

Nun stehen wir also vor dem Innersten des Geheimnisses der Quantentheorie, das da heißt:

*Warum verschwindet die ausgedehnte Welle und verwandelt sich in ein Teilchen? Oder, in der Ausdrucksweise Heisenbergs: wie wird das Mögliche zum Wirklichen?*

*Was ist die Reduktion der Wellenfunktion?*

Die vor der Beschreibung des Lichtelektrischen Effekts aufgestellte *No-Nonsense Hypothese* lässt auch hier wieder nur eine einzige Möglichkeit der Interpretation dessen zu, was sich wirklich ereignet.

Ich wiederhole zunächst meine Argumentation bezüglich des sogenannten Welle-Teilchen-Dualismus:

Es gibt nichts, was Welle *und* Teilchen sein kann. Wenn also Objekte Eigenschaften von beidem aufweisen, dann muss zwischen den beiden Konzepten ein Abhängigkeitsverhältnis bestehen, d.h. eines der beiden Konzepte muss als aus dem anderen *abgeleitet* und seine Begriffe als durch die des anderen *definiert* aufgefasst werden.

Das Problem ist aber nicht symmetrisch: Eine Welle ist als dynamisches Gebilde definiert. Mit dieser Definition sind alle Welleneigenschaften, wie etwa Beugung und Interferenz, untrennbar verbunden. Sie können nicht auf etwas anderes zurückgeführt werden. Wenn das Konzept *Welle* durch etwas

anderes ersetzt wird, dann gehen auch die mit ihm verbundenen Eigenschaften verloren. Ein Teilchen dagegen ist *als solches* überhaupt nicht definiert, sondern erst durch die ihm zugeordneten Eigenschaften. Es erscheint also bloß als Träger dieser Eigenschaften, mit denen es – im Gegensatz zu den Verhältnissen bei Wellen – nur definitiv und nicht logisch verbunden ist. Das Konzept *Welle* ist also nicht ersetzbar, das Konzept *Teilchen* dagegen kann ohne jeden Verlust ersetzt werden, wenn bei dieser Ersetzung die Eigenschaften erhalten bleiben (z.B. Lokalisierung, Diskretheit).

Richtet man unter dieser Voraussetzung den Blick auf das Doppelspaltexperiment, so erkennt man sofort, dass das Wellenkonzept eigentlich für alles, was zu beobachten ist, eine Erklärung bietet. *Alle* Arten von Wellen treten bekanntlich in zwei Gestalten auf: als laufende Wellen, die Beugung und Interferenz zeigen, und als stehende Wellen, die durch Randbedingungen in ihrer räumlichen Ausdehnung begrenzt sind und nur in bestimmten diskreten Zuständen existieren können. Genau diese beiden Gestalten finden wir beim Doppelspaltexperiment vor, und auch der Übergang zwischen beiden ist im Grunde selbstverständlich.

Da aber das allgemeine Denken hier in einer mittlerweile schon hundert Jahre dauernden, geradezu magischen Erstarrung eingefroren ist, erscheint es angebracht, den Vorgang ausführlicher zu beschreiben. Das soll nun geschehen.

Nach dem soeben Gesagten *ist* das Elektron eine Welle. Daher tut es genau das, was bei Wellen selbstverständlich ist, das heißt: Es läuft zunächst durch *beide* Spalten, wird durch sie gebeugt, läuft also nach dem Doppelspalt *tatsächlich* auseinander und interferiert mit sich selbst (wie das auch in der Schrödingerschen Darstellung der Fall ist).

Dann trifft die Elektron-Welle auf die Detektorplatte. Diese ist aber ebenfalls eine Welle, oder sagen wir besser: ein Wellenfeld. Das Eindringen der Elektron-Welle in das Wellenfeld "Detektorplatte" bedeutet also: es kommt zu Überlagerungen der Wellen.

Die Elektronenhüllen der Atome gleichen in ihrer räumlichen Begrenztheit einfachen stehenden Wellen, bei denen durch Randbedingungen festgelegt ist, in welchen stationären Zuständen sie in ihrer Gesamtheit schwingen können bzw. in welchen Schwingungszuständen sie stabil sind.

Was geschieht mit einer stehenden Welle bei einer stetigen Änderung der Anregungsbedingungen?

Betrachten wir eine stehende Luftwelle in einem Rohr. Die allmähliche Änderung der Anregungsbedingungen bewirkt zunächst nichts Hörbares – wir hören einen gleichbleibenden Ton; wenn diese Änderung aber groß genug wird, *springt* die stehende Welle *in den nächsten stabilen Zustand*: Wir hören den benachbarten Oberton. Würden wir die Wellen im Rohr zählen, so sähen wir, dass *nach* dem

Umspringen der stehenden Welle ein Schwingungsknoten *mehr* (oder weniger) im Rohr ist. Es ist aber klar, dass nicht etwa ein Schwingungsbereich hinzugefügt worden ist, sondern dass die stehende Welle *im ganzen* sich – entsprechend den Randbedingungen – neu organisiert hat.

Hörbar (beobachtbar) ist daher auch bei *stetiger Änderung* der Anregung eine *diskrete Folge* von Tönen, entsprechend den möglichen stabilen Zuständen der stehenden Welle, also das Umspringen der ganzen Welle auf einen Zustand mit einer (Teil-)Welle mehr (oder weniger), während das tatsächliche, ursächliche Geschehen *stetig* verläuft.

Ähnliches erwarten wir also auch bei Atomen und Molekülen. Elektronenhüllen können demnach nur in bestimmten, diskreten Zuständen existieren bzw. sind nur in solchen stabil. Wenn der Zustand der *gesamten* Hülle – d.h. der Gesamtschwingungszustand des entsprechenden Raumbereichs – sich *stetig* verändert, geschieht so lange nichts Beobachtbares, bis die Veränderung groß genug ist, um den (scheinbar) un stetigen Übergang auf den nächsten stabilen Zustand zu erzwingen. So wie bei der stehenden Welle im Rohr beobachten wir auch hier die *diskrete Folge* möglicher stabiler Zustände des gesamten räumlichen Schwingungsbereichs. Das Umspringen zwischen den stabilen Zuständen äußert sich *lokal*, als Auftreten einer *zusätzlichen* Knotenfläche und damit eines *zusätzlichen* Schwingungsbereiches. Auch hier ist dieser aber natürlich nicht *als einzelner hinzugefügt* worden (wie das bei der Teilchenvorstellung der Fall wäre), sondern er erscheint als Folge der Neuorganisation der ganzen räumlichen Wellenstruktur. Und auch hier gilt: Das eigentliche Geschehen verläuft *stetig*.

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

Die Annahme lautet:

*Die un stetige Änderung des lokalen Schwingungszustands, die sich als Messergebnis präsentiert, wird durch einen stetigen Prozess verursacht – durch Wellen, deren Amplitudenquadrate sich summieren, bis es zu einem Übergang kommt.<sup>6</sup> Die lokale Wellen-Intensität bestimmt daher die lokale Wahrscheinlichkeit eines solchen Übergangs.*

Es ist also ganz einfach: Wellen treffen auf die Platte, dringen ein und überlagern sich den schon vorhandenen. Die Wellen-Intensitäten, deren Verteilung der quantentheoretischen Wahrscheinlich-

---

<sup>6</sup> Ich erinnere daran, dass genau diese Annahme – auf *Photonen* angewendet – im 1. Kapitel die lokale Darstellung verschränkter Photonen ermöglicht hat.

keitsdichte (den Kurven in (S2)) entspricht, summieren sich am Ort des Eindringens, bis der an diesem Ort vorhandene räumliche Schwingungszustand (die Elektronenhülle) in den nächsten stabilen Zustand "springt", in der üblichen Sichtweise also "ein zusätzliches Elektron erscheint". Diese Übergänge sind somit eine Folge lokaler Gegebenheiten, unabhängig von den gleichzeitig an anderen Stellen stattfindenden Summationsprozessen gleicher Art, die *später* ebenfalls zu Übergängen führen.

Insbesondere erfolgt zum Zeitpunkt eines Übergangs *kein Verschwinden anderer Wellen*.

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

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

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

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

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

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

Wir sehen klar, worin wir getäuscht waren: Es gibt keine Teilchen. Elektronen (und andere Elementarteilchen) sind keineswegs "unteilbare Einheiten". Wir erliegen dieser Suggestion nur, weil sie *in allen Beobachtungen* als solche auftreten. ("Ereignisse" sind immer Übergänge!) Tatsächlich sind es stetige, auseinanderlaufende Wellen oder Wellenpakete, die nur unter bestimmten, in Materie gegebenen Randbedingungen *lokalisiert* und in immer gleichen Gestalten erscheinen.

Die Reduktion der Wellenfunktion – das Verschwinden eines ausgedehnten Wellen-Phänomens und scheinbar übergangslose Auftreten eines lokalisierten Ereignisses – findet nicht statt. Sie wird im Wellenmodell durch einen gewöhnlichen physikalischen Vorgang ersetzt.

Wir sind also vom Welle-Teilchen-Dualismus zum Wellen-Monismus gelangt. Das ist jedoch kein Verlust – was zuvor als "Teilchen" bezeichnet worden ist, bleibt ja als *dasselbe Phänomen* erhalten: lokalisiert, diskret und stets formal identisch. Nur die Definition hat sich geändert: Objekte, die ursprünglich dem Vorbild makroskopischer Gegenstände entsprechend gedacht wurden, aber diese Vorgabe von Anfang an nicht erfüllten und deshalb im Grunde undefiniert waren, werden nun als stationäre Wellenzustände bzw. Übergänge zwischen solchen Zuständen aufgefasst.

So stellt sich tatsächlich heraus: Das ein Jahrhundert andauernde Unvermögen, sich von mechanistischen Vorstellungen zu lösen (Teilchen, Stoßvorgänge usw.), hat die Interpretation der physikalischen Theorien auf einen falschen Weg geführt und darauf festgehalten.

## **Bemerkungen**

1. Die lokale und objektive Erklärung des Doppelspaltexperiments ist dermaßen einfach, dass man kaum glauben mag, dass sie bisher nicht existierte. Woran liegt es also, dass sie so lange unentdeckt bleiben konnte? Es ist die folgende suggestive Vorstellung, die das bewirkt hat:

Nehmen wir an, eine Person A wirft einer Person B einen Ball zu. Dann kann natürlich nicht der geringste Zweifel bestehen, dass der Ball, den B fängt, *derselbe* Ball ist, den A geworfen hat. Dieser Sachverhalt ist so selbstverständlich, dass er gedanklich überhaupt nicht in Erscheinung tritt: niemand käme auf die Idee, zu fragen, ob es derselbe Ball ist – die Frage wäre einfach absurd.

Genau dieses Konzept – mitsamt der eben erwähnten unhinterfragten Selbstverständlichkeit der Identität des geworfenen und des gefangenen Balls – ist jedoch auf das Doppelspaltexperiment übertragen worden. Der Grund für diese vollständige Übertragung ist die *Teilchenvorstellung*: Wenn das Elektron als *Teilchen* aufgefasst wird, dann erscheinen die Bedingungen beim Doppelspaltexperiment analog zu denen beim Ballwurf.

Das Elektron *ist* aber kein Teilchen, sondern eine Welle bzw. ein Übergang zwischen zwei Wellenzuständen, und der "Elektron" genannte Übergang, der sich auf der Detektorplatte zeigt, *ist nicht identisch* mit der "Elektron" genannten Welle, die unmittelbar vorher den Doppelspalt durchquert und dann die Detektorplatte erreicht hat. Dieser Übergang, also das beobachtete Ereignis, enthält nicht nur Anteile von *dieser* Welle, sondern auch von Wellen, die schon früher aufgetroffen sind, und auch von Wellen, die schon vor Beginn des Experiments da waren (und dazu führten, dass etliche Schwingungszustände sich schon vorher nahe an der Grenze befanden, über der ein Übergang stattfindet).

Mit anderen Worten: **Das Elektron, das jetzt auf der Detektorplatte erscheint, ist nicht identisch mit dem Elektron, das unmittelbar vorher erzeugt worden ist** – oder, um es genauer zu sagen: es ist nicht *substanziell*, sondern nur *formal* identisch mit diesem.

In der Ballwurf-Analogie hieße das: *Der gefangene Ball ist nicht identisch mit dem geworfenen Ball*, er sieht nur genauso aus. Solange man an diese Analogie gebunden bleibt, ist es offensichtlich unmöglich, das Doppelspaltexperiment zu verstehen, und dasselbe gilt für alle anderen quantenmechanischen Messungen.

2. In der Standardinterpretation des Doppelspaltexperiments gibt es im Inneren der Detektorplatte keine stetigen Prozesse, sondern nur sprunghafte Übergänge. In der neuen Interpretation hingegen werden diese Übergänge durch stetige Prozesse verursacht. Was sind das für Prozesse? Genau diejenigen, die bei Wellen *immer* auftreten: wenn die Frequenzen der eindringenden und der schon vorhandenen Wellen gleich sind, dann summieren sich die Amplituden, wenn sie verschieden sind, dann bilden sich Kombinationsfrequenzen.

Es ist möglich, die Energie proportional zum Amplitudenquadrat zu setzen. Dadurch kann auch den Zuständen, die zwischen den stationären Zuständen liegen, eine bestimmte Energie zugeordnet werden. (Im Grunde ist diese Proportionalität auch in der Standardinterpretation vorhanden. Man denke z.B. an den Lichtelektrischen Effekt: zwar ist hier die Energie der austretenden Elektronen von der Amplitude des Lichts unabhängig, aber die Zahl der detektierten Elektronen hängt natürlich davon ab.)

3. Ich habe die einfachste Modellversion vorgestellt. Verschiedene Erweiterungen sind erforderlich. Zumindest eine davon erscheint mir wichtig genug, um sie hier zu erwähnen:

Durch Randbedingungen ist lokal festgelegt, welche Schwingungszustände stabil sind. Diese Zustände müssen als *Attraktoren* aufgefasst werden. (Das gilt für stehende Wellen ganz allgemein.) Das bedeutet, dass ein lokaler Schwingungszustand sich auf den Attraktor hin bewegen wird, wenn der Punkt des Phasenraums, der ihn repräsentiert, sich im Einzugsbereich des Attraktors befindet. Nehmen wir an, ein lokales Wellensystem (eine Elektronenhülle) befindet sich genau auf einem Attraktor. Wenn

nun Wellen von außen eindringen und sich den schon vorhandenen überlagern, dann ist das System in einer gewissen Entfernung vom Attraktor. Es wird dann dem Attraktor wieder zustreben, d.h. es wird versuchen, Wellen zu emittieren. Wohin? An die benachbarten Wellensysteme. Es finden also *Austauschprozesse* statt, für die folgende einfache Regel gilt: Die Tendenz eines lokalen Wellensystems, dem Attraktor zuzustreben, wird umso größer sein, je näher der Zustand des Systems dem Attraktor ist. Das bedeutet: bei zwei einander benachbarten räumlichen Schwingungszuständen wird derjenige, dessen Entfernung vom Attraktor-Zustand geringer ist, die zusätzlichen Wellen an den anderen abgeben. Wird aber ein Systemzustand durch die Wellen-Akkumulation über die Grenze zwischen den Einzugsbereichen des aktuellen und des nächsthöheren Attraktors hinaus getrieben, dann wird das System diesem nächsten Attraktor zustreben, d.h. es wird Wellen von den umgebenden Systemen aufnehmen.

An den grundsätzlichen Überlegungen ändert sich durch diese Ergänzung nichts, aber die Dynamik des Verlaufs wird doch erheblich modifiziert. Nehmen wir als Beispiel die Verteilung  $P_1$  in der Skizze (S2). Sehen wir für den Augenblick von allen Zufallsschwankungen ab und gehen wir davon aus, dass sich alle Systeme genau im Attraktor-Zustand befinden.

Betrachten wir zwei benachbarte Systeme (lokale Schwingungszustände, Elektronenhüllen), die an einer beliebigen Stelle auf der Oberfläche der Detektorplatte lokalisiert sind. In jenem System, das vom Maximum der Kurve  $P_1$  weiter entfernt ist, wird das Amplitudenquadrat der eindringenden Wellen (entsprechend der Kurve  $P_1$ ) geringer sein als im anderen. Das System bleibt also näher am Attraktor-Zustand und wird daher diese Wellen an das andere System abgeben. Dieser Prozess findet bei allen Paaren benachbarter lokaler Systeme gleichzeitig und auf gleiche Weise statt. Somit werden die Wellen schließlich bei jenem System landen, das genau dort liegt, wo die Kurve  $P_1$  ihr Maximum hat. In diesem System werden also die Amplitudenquadrate aller in die Platte eingedrungenen Wellen aufsummiert.

Dies wäre allerdings nur dann der Fall, wenn es keine Zufallsschwankungen gäbe, und daher kann es sich nicht in dieser Form ereignen. Aber dieses idealisierte Beispiel zeigt doch, dass die in die Platte eindringenden Wellen nicht nur genau am Ort des Auftreffens zu einem Übergang führen können, sondern dass sie durch Austauschprozesse auch in größere Entfernungen transportiert werden und dort zu Übergängen beitragen. Möglicherweise sind das Attraktor-Konzept und die daraus folgende Hypothese der Austauschprozesse in einigen Fällen zur Erklärung der Abfolge von Ereignissen erforderlich, z.B. beim Photoeffekt, um zu verstehen, warum nie mehrere Elektronen gleichzeitig detektiert werden.

4. Was soeben von der *Entstehung* der Elektronen an der Oberfläche der Detektorplatte gesagt wurde, muss analog für den Prozess ihrer *Erzeugung* gelten:

Wenn also links in der Skizze (S2) Elektronen "erzeugt" werden, bedeutet das nicht, dass *ein Teilchen nach dem anderen* sich löst. Es ist vielmehr ein *stetiger* Vorgang.<sup>7</sup> Es findet eine stetige Abstrahlung von Wellen statt, bis es irgendwo zu einem Übergang kommt – ein lokaler Gesamtschwingungszustand geht in einen anderen über, der eine Knotenfläche weniger hat. Diese Änderung selbst ist wiederum unstetig. In der üblichen Sichtweise: Ein Elektron hat sich gelöst. (Auch hier ist es wieder möglich, die unter Punkt 3 beschriebenen Austauschprozesse anzunehmen.) Die Wellengruppen, die nun unterwegs sind, entstammen also nicht einem einzigen Übergang, d.h. sie entsprechen nicht *einem* Elektron, vielmehr enthalten sie Wellen aus vielen solchen als *Elektron* definierten Übergängen.

5. Alles, was hier über Elektronen gesagt wurde, gilt in gleicher Weise auch für Photonen.

### 3.7. Die Reduktion der Wellenfunktion: Verallgemeinerung

Um unsere Modellannahmen in einen allgemeineren Zusammenhang zu setzen, müssen wir einen kurzen, einfachen Ausflug in den formalen Teil der Quantentheorie unternehmen.

Sei  $\Psi(x)$  der Zustandsvektor eines Objekts T, an dem die Messung eines Attributs vorgenommen werden soll, das dem Operator A entspricht. Es gelte

$$A\Psi(x) = \sum_{i=1}^n s_i U_i(x) \quad (U_i \text{ Eigenfunktionen, } s_i \text{ Koeffizienten})$$

Seien  $a_i$  Eigenwerte der entsprechenden  $U_i$ . Dann wird sich bei der Messung einer der Werte  $a_i$  ergeben.

Soweit die Vorgaben, deren Gültigkeit so weit erwiesen ist, dass sie als Fakten gelten können. Nun aber beginnt schon der Bereich der Interpretation:

Wird der Wert  $a_j$  ( $1 \leq j \leq n$ ) gemessen, dann soll sich T – d.h. *dasselbe Objekt*, das zuvor durch

$\sum_{i=1}^n s_i U_i(x)$  repräsentiert wurde – im Zustand  $U_j$  befinden: die ganze Summe  $\sum_{i=1}^n s_i U_i(x)$  hat sich auf einen einzigen Ausdruck  $s_j U_j$  reduziert.

---

<sup>7</sup> Genau wie beim Lichtelektrischen Effekt im Abschnitt 3.4.



Nennen wir dies die Hypothese (H1). Sie bildet das Fundament der gegenwärtigen Interpretation der Quantentheorie:

(H1) *Die durch die Messung auf einen einzigen Term reduzierte Zustandsfunktion beschreibt **dasselbe Objekt** wie die Zustandsfunktion vor der Reduktion. Der eine Term entspricht dem Zustand des Systems nach der Reduktion.*



Eine einfache Veranschaulichung:

(S7)

T ist das Objekt, an dem das Attribut A gemessen werden soll. T1 bis T4 stellen 4 verschiedenen Möglichkeiten dar, T nach der Messung vorzufinden. Falls  $j = 3$ , wird also T3 zur gemessenen Wirklichkeit. T1, T2 und T4 verschwinden.

Die Hypothese (H1) besagt also: **T3 ist dasselbe Objekt wie T**. T ist der Zustand des Objekts *vor* der Messung, T3 ist der Zustand des Objekts *nach* der Messung.

Das hier präsentierte Modell beruht dagegen auf der folgenden Hypothese (H2):

(H2) *Das Objekt, das sich **nach** der Messung im Zustand  $U_j$  befindet, ist **nicht dasselbe Objekt** wie das durch  $\Psi(x)$  repräsentierte Objekt T **vor** der Messung. Keine der zur Repräsentation des Objekts T gehörenden Eigenfunktionen  $U_i$  mit  $i \neq j$  verschwindet, sondern alle liefern Beiträge zu nachfolgenden Messungen, bei denen dann andere, mit T formal identische Objekte (z.B. "Elektronen") in entsprechenden Zuständen vorgefunden werden. Es findet also gar keine "Reduktion" statt – jedenfalls nicht in dem Sinn, dass irgendetwas verschwindet.*

(H2) bedeutet:

1. *Ein Teil* von T – der, auf den T gemäß (H1) "reduziert" wurde – liefert einen Beitrag zum *aktuellen* Messergebnis – also zum entsprechenden Wert des Attributs A –, *alle anderen Teile* von T leisten Beiträge zu *anderen, künftigen* Messergebnissen.

2. Das aktuelle Messergebnis wird im Allgemeinen nicht nur durch Wellen aus T verursacht, sondern auch durch Wellen, die von anderen, mit T formal identischen Objekten stammen.

Bei dem in (S7) dargestellten Schema gilt also – im Gegensatz zur üblichen Interpretation:

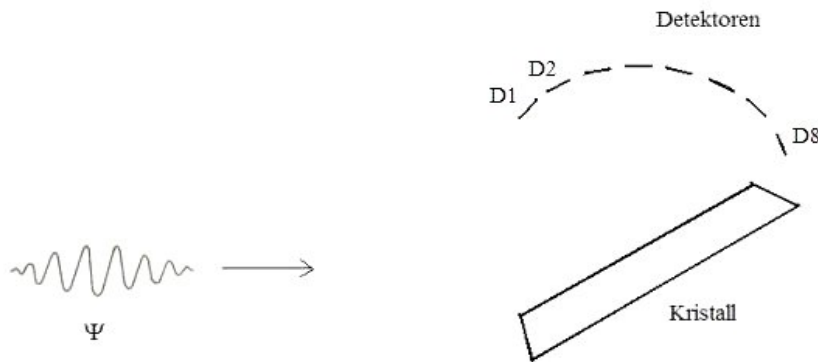
**T3 ist *nicht* dasselbe Objekt wie T.** Einerseits enthält T3 nicht nur Wellen aus T, und andererseits enthält T auch Wellen, die nicht zum Ereignis T3 beitragen, sondern zu (möglichen) späteren Ereignissen T1, T2 und T4.

Dazu ein Beispiel:

Nehmen wir an, T sei ein Elektron. Der Impuls von T soll zunächst berechnet und dann gemessen werden.

Um die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte zu berechnen, muss auf die Wellenfunktion  $\Psi$ , durch die T repräsentiert wird, der Impulsoperator angewendet werden. Dieses Verfahren ist eine *Spektralanalyse*:  $\Psi$  wird in Sinuswellen mit verschiedenen Wellenlängen zerlegt, und die zugehörigen Amplituden werden bestimmt. Deren Quadrate ergeben die gesuchten Wahrscheinlichkeiten.

Im Experiment wird das Wellenpaket *tatsächlich* geteilt. Das könnte z.B. durch folgende Versuchsanordnung ausgeführt werden:



(S8)

Das Wellenpaket wird an einem Kristall gestreut, das heißt: die darin enthaltenen Wellen mit verschiedenen Wellenlängen werden durch die Kristalloberfläche gebeugt. Diese wirkt wie ein ebenes Beugungsgitter, das das Wellenpaket in nahezu monochromatische Strahlenbündel zerlegt. In der Nähe der Kristalloberfläche kommt es zu Interferenz sämtlicher Wellen, in ausreichender Entfernung trennen sich aber die Strahlen, so dass alle Wellen, die auf einen bestimmten Detektor auftreffen, fast dieselbe Wellenlänge haben. Wir haben also die Wellengruppe nach Wellenlängen (bzw. Impulsen) sortiert.

Der *formalen* Zerlegung durch die Anwendung des Impulsoperators auf  $\Psi$  entspricht also die *reale* Zerlegung des Wellenpakets in Sinuswellen mit verschiedenen Wellenlängen durch die Versuchsanordnung.

Bei der Messung führt in der üblichen Interpretation eine der Eigenfunktionen des Impulsoperators zum Messergebnis, das heißt: sie wird *wirklich*, die anderen *verschwinden*. In einem Detektor befindet sich jetzt ein *Elektron* mit einem bestimmten Impuls – der vorher nicht existierte –, in den anderen Detektoren befindet sich *nichts*. In der hier vorgeschlagenen Interpretation gibt es dagegen keine Reduktion. Keine Eigenfunktion verschwindet. Alle Eigenfunktionen liefern Beiträge zu späteren Ereignissen bzw. Messungen. Die Amplitudenquadrate der Wellen mit identischer Wellenlänge werden summiert, bis es im betreffenden Detektor zu einem Übergang kommt: ein charakteristisches Schwingungsmuster entsteht – eine Impulsmessung hat stattgefunden (die auch hier wieder im Allgemeinen nicht die Folge einer einzelnen Wellengruppe ist, sondern der Summierung der Amplitudenquadrate von Wellen aus mehreren Wellengruppen bedarf).

Auch hier ist wieder klar zu erkennen, dass sich quantitativ nichts ändert: Die Wellenpakete werden in Sinuswellen mit verschiedenen Wellenlängen zerlegt, die auf die entsprechenden Detektoren treffen. Wenn nun, gemäß unserer Grundannahme, die charakteristische Neuorganisation eines lokalen räumlichen Schwingungszustandes – also das Erscheinen eines Elektrons – durch die Summierung von Wellenintensitäten *verursacht* wird, dann muss die Wahrscheinlichkeit der Ereignisse in einem bestimmten Detektor dem Quadrat der Amplituden der Wellen, die *tatsächlich* auf diesen Detektor auftreffen, proportional sein – also genau so, wie durch die Quantentheorie vorausgesagt.

Widerspricht es nicht eigentlich dem quantenmechanischen Formalismus, anzunehmen, dass das vor der Messung vorhandene Teilchen kurze Zeit später als *dasselbe* Teilchen wieder erscheint – selbst dann, wenn formal (*und* experimentell) eine Teilung erfolgt und die Teile sich beliebig weit voneinander entfernen? Es wäre nicht ganz abwegig, dies eine Interpretation *gegen den Formalismus* zu nennen. Und darüber hinaus treten nur unter diesen Bedingungen Paradoxien auf, etwa wenn gefragt wird, "welchen Weg" das "Teilchen" beim Doppelspaltexperiment nimmt.

Mein Vorschlag folgt dagegen einfach dem, was der Formalismus vorgibt, und erlaubt es, diese Vorgabe mit einer lokalen und objektiven Realität zu verbinden: Wenn ein Teilchen X *vor* der Messung an einer bestimmten Stelle erzeugt wird und *nach* der Messung an anderer Stelle ein *identisches* Teilchen erscheint, dann ist dies *nicht dasselbe* Teilchen; die Wellen, die aus der Auflösung des charakteristischen Schwingungsmusters X stammen, verteilen sich entsprechend ihrer formalen Beschreibung – sie laufen also tatsächlich auseinander – und tragen zur Entstehung eines anderen Schwingungsmusters X bei, das dieselbe Bezeichnung X aber nicht deshalb verdient, weil es *substanziell*, sondern weil es *formal* identisch mit dem ersten ist.

### ***3.8. Die zentrale Annahme der lokalen und objektiven Interpretation***

Die lokale und objektive Interpretation der Quantentheorie beruht auf einer einzigen Annahme. Alles andere kann darauf zurückgeführt werden. Sie lautet:

*Wenn durch eine quantenmechanische Wellenfunktion Ereigniswahrscheinlichkeiten vorausgesagt werden können, dann gibt es eine **wirklich existierende Welle**, die diese Ereignisse verursacht.*

Quantenmechanische Amplitudenquadrate sind also nicht bloß formale Hilfsmittel; sie entsprechen nur deshalb Wahrscheinlichkeiten, weil sie sich auf die Intensitäten existierender Wellen beziehen.<sup>8</sup>

Daraus folgt unmittelbar, dass **keine Reduktion der Wellenfunktion** stattfindet; Was existiert, kann nicht verschwinden.

Ebenso folgt daraus, dass es **keine Teilchen** im üblichen Sinn gibt: Da bei Wellenfunktionen von Teilchen, die sich außerhalb von Materie bewegen, die Wellen im Allgemeinen auseinanderlaufen, ist eine realistische Interpretation gleichbedeutend mit der Aufgabe des Teilchenbegriffs in der gewohnten Form. An dessen Stelle tritt ein anderer Teilchenbegriff, der folgendermaßen definiert ist:

---

<sup>8</sup> Was ist mit den Wahrscheinlichkeitsamplituden für *nicht* eintretende Ereignisse? (Der Zustand eines radioaktiven Kerns z.B. ist eine Überlagerung der Zustände *zerfallen* und *nicht zerfallen*.)

Dazu ist Folgendes zu sagen: Wenn Amplitudenquadrate als Wahrscheinlichkeiten definiert sind, dann erfordert dies die Einführung von Amplitudenquadraten, die die komplementären Wahrscheinlichkeiten darstellen. Es ist dieser Akt formaler Vervollständigung, dem die in diesem Sinn "komplementären" Amplituden ihre Existenz verdanken. Es lässt sich trotzdem behaupten, dass sie sich auf wirkliche Wellen beziehen, aber eben nur über den gerade beschriebenen formalen Zwischenschritt.

*Teilchen sind stationäre Zustände von Wellen oder durch Wellen vermittelte Übergänge zwischen solchen Zuständen.*

Dualismus bzw. Komplementarität treten also nur im Bereich der Phänomene auf. Die fundamentale, ursächliche Ebene der Wirklichkeit ist wellenartig.

### **3.9. Einwände**

In diesem Abschnitt sollen einige Einwände diskutiert werden, die gegen die realistische Interpretation der Wellenfunktion vorgebracht werden können (und in der historischen Diskussion auch tatsächlich vorgebracht worden sind), und ebenso einige Einwände gegen die daraus folgenden Hypothesen..

#### **1. Einwand**

*Die Darstellung findet im multidimensionalen Konfigurationsraum statt. Deshalb können die Elemente der Darstellung nicht real sein.*

Dies ist ein seltsames Argument, um nicht gleich zu sagen: überhaupt keines. Es ist bei der mathematischen Darstellung irgendeines Ausschnitts der Wirklichkeit *niemals* der Fall, dass die Darstellung mit dem realen Szenario einfach identisch ist. In manchen Fällen wäre diese Annahme geradezu lächerlich. Durch die schon früher erwähnte logistische Gleichung etwa kann die zeitliche Entwicklung der Fischpopulation in einem Teich beschrieben werden. Aber die logistische Gleichung *ist* keine Fischpopulation, und die Fische *sind* keine reellen Zahlen. Trotzdem käme niemand auf die Idee, die Existenz von Fischen zu bezweifeln.

Die *realistische* Interpretation eines mathematischen Formalismus bedeutet also nicht, die Elemente der Darstellung mit den Elementen der Wirklichkeit zu *identifizieren*, sondern anzunehmen, dass es zwischen den Elementen des Formalismus und Elementen der Wirklichkeit eine *Verbindung* gibt.

Im Fall einer realistischen QT-Interpretation ist es daher nicht erforderlich zu behaupten, dass die im QT-Formalismus auftretenden wellenartigen Phänomene reale Wellen *sind*. Es muss bloß die folgende schwächere Aussage gelten:

Der Zustandsvektor  $\Psi$  ist *nicht nur* ein mathematisches Hilfsmittel. Zu jedem  $\Psi$  gibt es eine wirklich existierende Welle, mit der  $\Psi$  in folgendem Zusammenhang steht: Jedes mögliche Ereignis, dessen

Wahrscheinlichkeit mit Hilfe von  $\Psi$  bestimmt werden kann, wird durch die mit  $\Psi$  verbundene reale Welle vermittelt

## 2. Einwand

*Es gibt keinen physikalischen Begriff, der der Amplitude in der Schrödingergleichung zugeordnet werden kann.*

Diese Behauptung ist richtig. *Was* hier eigentlich schwingt, kann nicht innerhalb der gegenwärtigen Physik beantwortet werden.

Somit richtet sich dieser Einwand aber nicht gegen die realistische Interpretation der Schrödingergleichung, sondern verweist lediglich darauf, dass man, um zu bestimmen, *wovon* die Gleichung handelt, aus dem Bereich der üblichen physikalischen Begriffsbildung heraustreten muss.

Sollte die Schrödingersche Wellenfunktion ein *wirklich fundamentales* Beschreibungsmittel darstellen, dann ist das aber eigentlich selbstverständlich, denn dann geht es hier um die Frage, wie *Existenz* letztlich physikalisch definiert werden soll. Damit ist zugleich klar, dass das, worauf sich die Amplitude der Gleichung bezieht, nicht einfach mit irgendeinem schon bekannten Element physikalischer Modellbildungen identifiziert werden kann.

## 3. Einwand

*Es gibt quantenmechanische Größen, die nicht als Eigenschaften realer Objekte interpretiert werden können.*

Als eine solche Eigenschaft gilt der *Spin*, den man die "quantenmechanischste" aller Eigenschaften nennen könnte.

Ein Teil der Argumentation, mit der dieser Einwand entkräftet werden kann, ist schon in dem Schema enthalten, das uns bereits zur lokalen und objektiven Interpretation quantenmechanischer Szenarios gedient hat. Ich zitiere aus Abschnitt 1.4, der die lokale Rekonstruktion der quantenmechanischen Voraussagen für verschränkte Photonen beinhaltet:

*"Das Messergebnis entspricht nicht direkt der Eigenschaft eines Objekts; erst die Akkumulation von Objekten löst das Messereignis aus."*

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

Also kann behauptet werden: Nur dadurch, dass dieses Messereignis als *Objekteigenschaft* aufgefasst wird, entstehen Paradoxien. Als Eigenschaft des Objekts "Photon" kann der Spin nicht realistisch interpretiert werden.

Im Fall von Photonen ist diese Erklärung ausreichend, weil Photonen nur *Übergänge* zwischen räumlich begrenzten stationären Schwingungszuständen sind und *keine* Objekte. Elektronen sind jedoch nicht nur Übergänge zwischen Schwingungszuständen, sondern diese Schwingungszustände selbst, und das Problem ist, dass sie, auch wenn sie auf diese Weise aufgefasst werden, anscheinend nicht realistisch verstanden werden können. Es scheint, als wäre ihr Spin auch dann undenkbar, wenn sie als Schwingungszustände interpretiert werden und nicht als "Teilchen"..

Dieses Problem kann erst im zweiten Teil geklärt werden. Ich will hier nur kurz zur Frage: *Was ist real?* Stellung nehmen.

Die gegenwärtige Physik ist von der gegenständlichen Seite des Seienden her aufgebaut worden. Ihre Begriffe sind Abstraktionen von gegenständlichen Erfahrungen. Innerhalb der Grenzen dieser Begrifflichkeit kann der Spin tatsächlich nicht realistisch verstanden werden: er ist keine Eigenschaft eines denkbaren Gegenstandes oder Schwingungszustandes.

Im zweiten Teil des Buches wird die Physik von der anderen, der ungegenständlichen Seite her entwickelt. Dabei ist man zunächst gezwungen, Gegenständliches überhaupt erst zu rekonstruieren. Auf diesem Weg, der sich vom *Ursprung alles Seienden* bis zu den elementaren Gegenständen erstreckt, tritt der Spin als einfaches geometrisches Konzept auf. Er erweist sich als notwendiges Element der Rekonstruktion der Dingwelt von den abstrakten Grundlagen des Seienden aus.

*Gegenständlich* bedeutet: als Objekt in Raum und Zeit existierend.

*Real* aber ist ein viel abstrakterer Begriff.

Nehmen wir an, es gelänge, das, was existiert, auf etwas Elementares zurückzuführen, dessen Notwendigkeit eingesehen werden kann, und ferner gelänge es, von diesem Elementaren ausgehend, in Schritten, deren Notwendigkeit ebenfalls eingesehen werden kann, zum Gegenständlichen zu

gelangen, zurück zur Erfahrungswelt; dann kann auf folgende Weise definiert werden, was *real* bedeutet:

*Real* ist alles, was auf diesem Weg erscheint. Real bedeutet also: *Aus den als notwendig erkannten Voraussetzungen des Seienden mit Notwendigkeit folgend.*

Genau in diesem Sinn ist auch der Spin real, und er wird, wenn er auf diesem Weg erscheint, geometrisch einsichtig.

Das, was die Quantentheorie beschreibt, liegt an der Grenze zwischen dem nicht-gegenständlichen und dem gegenständlichen Bereich. Erst aus dieser Sicht – durch die Betrachtung von *beiden* Seiten – werden Quantenobjekte verständlich.

Allerdings ist es für die Auflösung der Paradoxien der QT-Interpretation gar nicht notwendig, *real* zu definieren; es ist völlig ausreichend, *real* einfach als *nicht verschwindend* aufzufassen, also zu behaupten, dass das, was existiert – wie auch immer es definiert ist – nicht verschwinden kann.

#### **4. Einwand**

*Die Amplituden in der Wellenfunktion sind komplexe Zahlen. Sie können sich daher nicht auf etwas Existierendes beziehen.*

Hier gilt genau dasselbe, was schon beim dritten Einwand gesagt wurde: erst beim Aufbau der Physik von den Voraussetzungen des Seienden her wird klar, warum zur Konstruktion von *Objekten* imaginäre Zahlen notwendig sind.

#### **5. Technische Einwände**

Es gibt auch einige Einwände gegen eine realistische Interpretation der Wellenfunktion, die auf "technische Probleme" bei solchen Interpretationsversuchen zurückgehen.

Ein wichtiges Beispiel: Auch schon vor der Quantentheorie konnten die Atomspektren als Teilfrequenzen eines Gesamtschwingungszustands, der durch eine Fourier-Analyse zerlegt wird, mit guter Näherung dargestellt werden – mit Ausnahme der Amplituden, die stark von den Anregungsbedingungen abhängen, während sie bei der Fourier-Analyse eindeutig sein müssten.



Ich habe dieses Beispiel deshalb gewählt, weil hier deutlich wird, dass Probleme dieser Art unter Umständen schon allein durch die Aufhebung einer unnötig starken Einschränkung in den Voraussetzungen gelöst werden können: Setzt man die Modellannahmen aus 3.6. voraus, verschwindet das Problem. Wenn man die Gesamtschwingungszustände als Attraktoren auffasst, wird sofort klar, dass die Fourier-Zerlegung nur in den Fällen exakt zutreffen kann, in denen der Zustand des schwingenden Systems genau auf einem Attraktor liegt. Alle anderen Zustände, die zwischen den Attraktoren liegen und in unserem Modell ebenfalls vorkommen, müssen sich hinsichtlich der Amplituden unterscheiden. Die "Unterschiede in den Anregungsbedingungen" beziehen sich in unserem Modell ja auf die jeweils neu hinzukommenden Wellen, die sich den schon vorhandenen überlagern. Unter dieser Voraussetzung wird die Änderung der Teilwellen-Amplituden selbstverständlich.

Wie schon bei meinen bisherigen Ausführungen will ich mich aber auch hier auf die wirklich grundsätzlichen Argumente beschränken und keine weiteren technischen Fragen diskutieren.

## 6. Weitere Einwände

Die bisher diskutierten Einwände waren alle gegen die realistische Interpretation der Wellenfunktion gerichtet. Den wichtigsten Bedenken gegen die daraus folgenden Hypothesen – dass *keine Reduktion* stattfindet und dass *Teilchen keine elementaren Objekte* sind, sondern stationäre Wellenzustände – wurde schon in den vorhergehenden Abschnitten entgegnet.

Es wurde gezeigt, dass der Verzicht auf die *Reduktion der Wellenfunktion* an den quantenmechanischen Voraussagen über Ereigniswahrscheinlichkeiten nichts ändert. An die Stelle der Reduktion tritt ein gewöhnlicher physikalischer Prozess. Die absurde Annahme, dass Wellenphänomene, die ihre Existenz durch Interferenz beweisen, einfach verschwinden, entfällt also.

Als Begründung dafür, dass bestimmte *Teilchen elementare Phänomene* sind, wird üblicherweise angeführt, dass sie *unteilbar* sind: sie treten stets als ganze und in identischer Weise auf.

Die alternative Hypothese, dass Teilchen stationäre Zustände von Wellen bzw. Übergänge zwischen solchen Zuständen sind, ändert daran allerdings nicht das Geringste: Diese Definition *erklärt* sogar, warum Teilchen *immer* als ungeteiltes Ganzes auftreten. Wie sollte ein stationärer Wellenzustand auch geteilt werden? Er ist nur *als Ganzes* stabil, und auch beim Übergang auf einen benachbarten stabilen Zustand wäre es unsinnig, von einer "Teilung" zu reden. Wiederum ist die Analogie zu stehenden Wellen hilfreich: Konstante Randbedingungen vorausgesetzt, gibt es nur die diskrete Folge möglicher Frequenzen und Wellenlängen und die – dem Beobachter un stetig erscheinenden – Übergänge

zwischen den Elementen dieser Folge. Die beobachtbaren Phänomene sind stets diskret, unteilbar und ununterscheidbar.

Das zweite wesentliche Element der üblichen Teilchenvorstellung ist die räumliche Begrenztheit. Aber gerade diese Begrenztheit ist ja auch das Charakteristikum stationärer Wellenzustände: sie sind durch räumliche Begrenzung *definiert* und können nur unter entsprechenden Randbedingungen, d.h. in *Feldern* auftreten. Außerhalb dieser Felder gibt es keine stationären Zustände, und die Wellen erscheinen wieder in ihrer anderen Gestalt – sie laufen auseinander.

### ***3.10. Erklärung der Unschärfe; Interpretation des Formalismus***

Jeder Gegenstand hat zu jedem Zeitpunkt einen Ort und eine Geschwindigkeit – jedenfalls, solange man sich einen Gegenstand als etwas vorstellt, was in jedem Augenblick ein wohldefiniertes Raumvolumen einnimmt. Von genau dieser Vorstellung ist die Physik vor dem 20. Jahrhundert ausgegangen, und deshalb war die Verwunderung groß, als sich herausstellte, dass es unmöglich ist, bei *sehr kleinen* Gegenständen beides, Ort und Geschwindigkeit, zur selben Zeit genau zu ermitteln. Anfangs wurde dies durch die Messung begründet, im Lauf der Zeit aber wurde klar, dass es sich um eine Begrenzung der Natur selbst handelt.

Am Beginn der objektiven und lokalen Interpretation der Quantentheorie (in den Abschnitten 3.4. und 3.5.) standen die alternativen Darstellungen des Lichtelektrischen und des Compton-Effekts, und zwar ohne alle physikalischen Begriffe und Zusammenhänge, allein auf die mathematische Definition von Wellen gestützt und auf die Annahme, dass beide Partner der Wechselwirkung, Licht und Elektron, Wellen sind, die sich überlagern. Im Fall der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie steht damit fest, dass das Wellenkonzept fundamental ist und das Teilchenkonzept abgeleitet. Das bedeutet, dass hier die Gleichungen

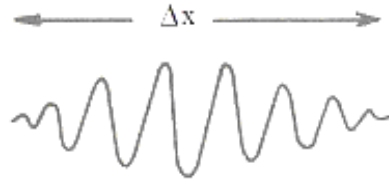
$$E = h\nu \quad \text{und} \quad p = h * 1/\lambda$$

nicht auf Dualismus oder Komplementarität hinweisen, sondern als *Definitionsgleichungen* für Energie und Impuls aufgefasst werden müssen.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> Dass die ungerichtete Größe *Energie* durch Frequenz und die gerichtete Größe *Impuls* durch Wellenlänge definiert wird, ist in einer Welt aus Wellen selbstverständlich. Im Abschnitt 2.6. wurde gezeigt, dass die Konstruktion von Bewegung aus Wellenüberlagerungen direkt zu den de Broglie'schen Materiewellen führt. Daraus folgen dann auch die Definitionen von Energie und Impuls materieller Objekte. (Die Bedeutung der Konstanten *h* wird erst im zweiten Teil erörtert.)

Für die so definierte Größe *Impuls* gilt dann in Verbindung mit der Größe *Ort* eine "Unschärferelation", und zwar einfach deshalb, weil bei räumlich begrenzten Wellenzügen (Wellenpaketen) wie in der folgenden Skizze



(S9)

bekanntlich *immer* eine "Unschärferelation"

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

gilt. Solche Wellenzüge *haben* einfach keine eindeutige Wellenlänge. Sie sind aus Wellen mit verschiedenen Wellenlängen zusammengesetzt. Je kleiner die räumliche Eingrenzung  $\Delta x$  wird, umso größer wird das Intervall der benötigten Wellenlängen. Je genauer umgekehrt die Wellenlänge – und damit in unserem Fall zugleich die Geschwindigkeit – festgelegt ist, desto größer wird die Ortsunschärfe  $\Delta x$ . In Verbindung mit der Gleichung

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

ergibt sich also

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

Das ist ja zur Genüge bekannt. Es musste aber dennoch erwähnt werden, weil es im Fall der üblichen Interpretation der Quantenmechanik nicht als *Erklärung* der Unschärfe betrachtet werden kann, sondern bloß als eine rein formale Tatsache. Zur Erklärung wird es erst durch die Annahme, dass Teilchen stationäre Wellenzustände sind und dass daher der Impuls durch die Wellenlänge *definiert* ist.

*Für die Größen Impuls und Ort gilt also Folgendes:*

1. Beide Größen sind als Welleneigenschaften *definiert*, und sie entsprechen bestimmten *Wellenarten*: dem Impuls werden Sinuswellen zugeordnet, dem Ort Pulswellen (das sind Wellen, deren Amplitude nur in einem Punkt ungleich 0 ist).

2. Zwischen beiden Größen besteht eine Unschärferelation. *Diese Unschärfe ist ein rein wellenmathematisches Faktum*. Sie wird auf die beiden physikalischen Größen durch deren Definition übertragen.

Was Ort und Impuls betrifft, sind damit alle Seltsamkeiten verschwunden: Während es im Rahmen der konventionellen Teilchenvorstellung absurd erscheint, dass Ort und Impuls nicht zugleich scharfe Werte haben können<sup>10</sup>, ist es bei der alternativen Teilchendefinition – bei der Gegenstände eben *kein* wohldefiniertes Raumvolumen einnehmen – vollkommen klar, dass das der Fall sein muss.

Die Frage ist, ob sich dieses Schema auf alle physikalischen Attribute von Objekten übertragen lässt. Die Antwort ist *ja*. Genau genommen gilt sogar, dass gar nichts übertragen werden muss – die Quantenmechanik *ist* dieses Schema. Sie muss also nur anders interpretiert werden.

Betrachten wir das quantenmechanische Schema in seiner einfachsten Form:

Messgrößen sind Observablen. Ihnen werden Operatoren zugeordnet. Durch die Anwendung eines Operators auf den Vektor im Hilbertraum, der den Zustand des Messobjekts repräsentiert, wird dieser Zustandsvektor in eine Reihe von Eigenfunktionen zerlegt, d.h. es wird eine *Spektralanalyse* durchgeführt: Eigenfunktionen sind Wellen, deren Form von der Art des Operators abhängt. (Z.B. sind die de Broglie'schen Materiewellen Eigenfunktionen des Impulsoperators, stehende Wellen auf Kugelflächen – d.h. Kugelflächenfunktionen – sind die Eigenfunktionen des Drehimpulsoperators.)

Die Zuordnung von Observablen zu Operatoren bedeutet damit zugleich eine Zuordnung zu *Klassen von Wellen*. Es gilt aber ganz allgemein, dass es unter den Klassen von Wellen, in die eine Wellengestalt zerlegt werden kann, stets Paare gibt, zwischen denen – wie bei Sinuswellen und Pulswellen – eine *Unschärferelation*<sup>11</sup> besteht. Das ist somit auch bei der spektralen Zerlegung des Zustandsvektors der Fall. Und diese Unschärfe überträgt sich wiederum auf die durch diese Wellenklassen *definierten* physikalischen Größen.

---

<sup>10</sup> Man versuche, sich ein Auto vorzustellen, das sich weder an einem genau bestimmten Ort befindet noch eine genau bestimmte Geschwindigkeit hat. Das ist unmöglich. Der konventionelle Teilchenbegriff ist aber eine Abstraktion solcher Objekte. In ihm hat sich der Begriff der *materiellen Substanz* erhalten.

<sup>11</sup> Bei einer Zerlegung in zwei solche Wellenklassen kann das Produkt der *Bandbreiten* nicht kleiner als 1 werden.

Das bedeutet: Das Schema, das gerade eben für Ort und Impuls beschrieben wurde, gilt in gleicher Weise für alle physikalischen Attribute (Observablen): Sie sind durch Wellenklassen definiert, und die für sogenannte kanonisch konjugierte Attribute gültige Unschärferelation ist eine rein wellenmathematische Gesetzmäßigkeit, die auf die Attribute durch deren Definition übertragen wird.

Wie ist nun dieses formale Schema von dem hier eingenommenen Standpunkt aus zu interpretieren?

Die wesentlichen Elemente der Interpretation wurden schon beschrieben und erklärt. Ich will sie hier zusammenfassen:

Das Objekt, das als Folge einer Messung auftritt, ist *nicht* dasselbe Objekt wie dasjenige, an dem die Messung vollzogen wird; dieses ist (im Allgemeinen) eine Wellengruppe, deren Teilwellen zu verschiedenen Messereignissen beitragen. (Siehe das Schema von 3.7.)

Der Zustandsvektor repräsentiert das Messobjekt. Er bezieht sich also auf das Wellenpaket *vor* der Messung, und die Spektralanalyse bezieht sich somit auf die Teilung dieses Wellenpakets in Wellen, die derjenigen Wellenklasse angehören, der die Eigenschaft zugeordnet ist, die gemessen werden soll.

Da die Klasse der Wellen, in die der Zustandsvektor geteilt wird, frei wählbar ist, enthält er alle messbaren Eigenschaften *als Möglichkeiten*, aber nicht etwa im Sinne Heisenbergs als eigenständige Form der Existenz bzw. Nicht-Existenz, sondern in einem völlig alltäglichen Sinn: Jede der im Wellenpaket enthaltenen Wellen, die zu irgendeiner Klasse gehören, kann zur Entstehung eines Objekts – des Objekts der aktuellen Messung oder des Objekts einer späteren Messung – beitragen.

Im Experiment ist es meist erforderlich, das Wellenpaket *tatsächlich* zu zerlegen, wie das etwa im Beispiel am Ende von 3.7. der Fall war. Die Verteilung der Messwerte wird dann, wie in diesem Beispiel erläutert, der Verteilung der Amplitudenquadrate der im Zustandsvektor enthaltenen Wellen entsprechen.

Das gemessene Objekt – der Träger der gemessenen Variablen – wird, sofern es sich um ein Objekt atomarer oder molekularer Größenordnung handelt, in jedem Fall durch den Messprozess *neu gebildet*.<sup>12</sup> Erst durch diese Neuformation der Messobjekte können die Wellen, die der Zustandsvektor

---

<sup>12</sup> Eine interessante Frage ist, wie groß bzw. wie komplex die Objekte sein können, die bei einem quantenmechanischen Messprozess (etwa beim Doppelspalt-Experiment) in Teilwellen zerlegt werden und sich dann an verschiedenen Orten neu formieren. Die Grenze muss jedenfalls dort liegen, wo die *Gestaltinformation* – die in den Frequenzen, Wellenlängen und Phasenbeziehungen der Wellen enthalten ist, aus denen die Objekte gebildet sind – verloren geht, so dass die Neubildung formal identischer Objekte nicht mehr möglich ist.

enthält, zu *gemessenen Eigenschaften* werden, mit anderen Worten: kann das Mögliche zum Wirklichen werden.

Es ist zu sehen, dass einige der bekannten Formulierungen völlig identisch in die realistische Interpretation übertragen werden können – nur ihr Sinn ändert sich: aus Aussagen, die auf die Unmöglichkeit hinweisen, sich von dem, was vorgeht einen Begriff zu machen, werden Aussagen über eine begreifbare Wirklichkeit.

Natürlich muss in jedem Fall der Zuordnung eines Attributs zu einer Wellenklasse erklärbar sein, was der physikalische Grund für diese Zuordnung ist. Im Fall von Energie und Impuls ist der Großteil der Erklärung schon geleistet worden. Eine kurze Wiederholung:

Bewegung (Geschwindigkeit) von Objekten ist durch *Superposition von Wellen* definiert. Die Existenz gleichförmiger Bewegung wird dadurch zu einer Selbstverständlichkeit. Änderung der Bewegung wird durch Änderung der Frequenzen verursacht. Damit ist die konzeptionelle Basis für die Definition von Energie und Impuls geschaffen, und es kann eingesehen werden, warum der Größe Energie die *Frequenz* zugeordnet wird und warum der Größe Impuls *Sinuswellen* (relativistische Phasenverschiebungswellen) zugeordnet werden. Formal wurden diese Definitionen bei der Beschreibung von Photoeffekt und Compton-Effekt demonstriert und bestätigt.

Warum in atomaren und molekularen Größenordnungen Spin und Drehimpuls *Kugelflächenfunktionen* (stehende Wellen auf Kugeloberflächen) zugeordnet sind, wird im zweiten Teil erklärt.

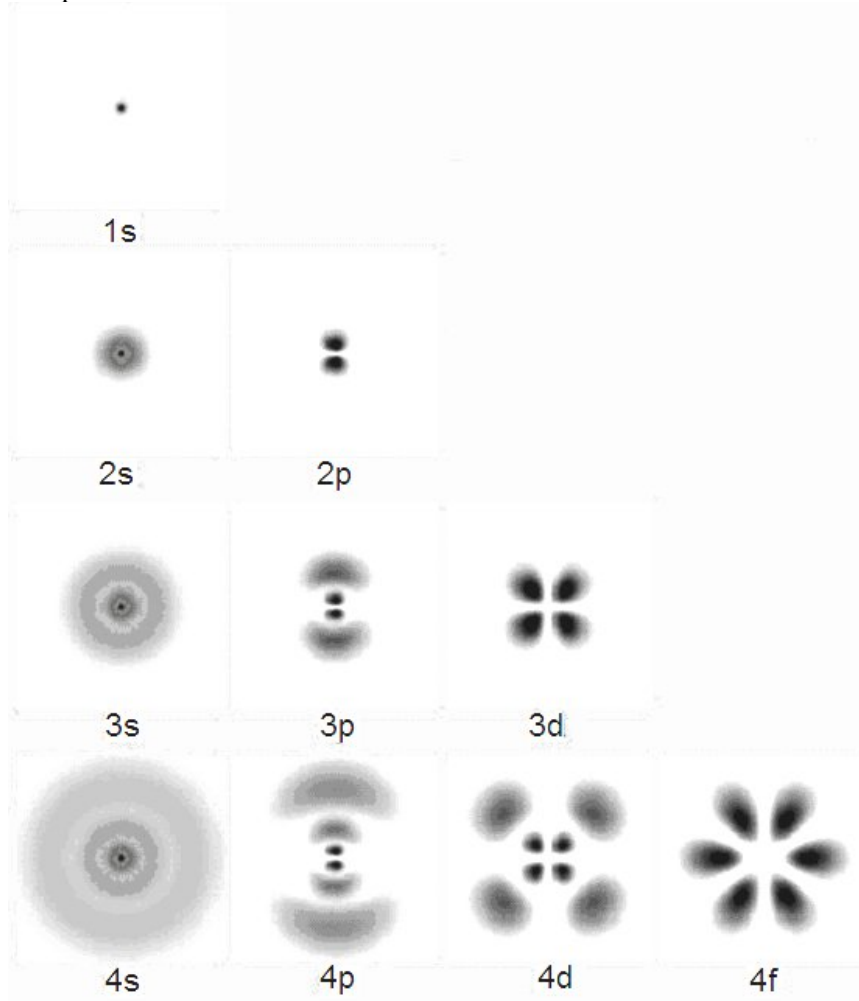
Damit sind die wichtigsten Zuordnungen auf einsichtige Zusammenhänge zurückgeführt. Allerdings muss hinzugefügt werden, dass alle Erklärungen erst dann vollständig sind, wenn die Größe "Masse" geometrisch definiert werden kann und wenn (was ebenfalls im zweiten Teil geschehen wird) die Existenz der Planckschen Konstante  $h$  (z.B. in der Gleichung  $E = h \nu$ ) so erklärt wird, dass sie nicht mehr als Beweis für die fundamentale Diskretheit des Seienden aufgefasst werden muss.

Die Quantentheorie vereinigt also nicht etwa die Wellen- und Teilcheneigenschaften von Objekten der fundamentalen Schicht der Wirklichkeit. Vielmehr treffen sich in ihr die fundamentale Wellenwelt und die daraus erzeugte gegenständliche Erfahrungswelt. Damit ist zugleich geklärt, weshalb die Quantentheorie unumgänglich ist: alle physikalischen Beschreibungen – seien sie auch noch so abstrakt – dienen letztlich der Erklärung erfahrbarer gegenständlicher Sachverhalte.

Zusammengefasst kann behauptet werden: *Die Quantentheorie ist genau jene Theorie, die es ermöglicht, das Fundament der Wirklichkeit, das ausschließlich aus Wellen besteht, durch Größen zu beschreiben, die der alltäglich erfahrbaren Gegenstandswelt entstammen und für diese geeignet sind.*

Wie hier gezeigt wurde, wurzelt die gegenwärtige erkenntnistheoretische Verwirrung nicht im Formalismus der Quantentheorie, sondern in ihrer Interpretation: erst die Unfähigkeit, sich von gegenständlichen Denkmustern zu lösen, erzeugt Paradoxien und führt zum Verlust jeglichen Begriffs der Wirklichkeit.

Betrachten wir als letztes Beispiel einige Eigenzustände des Wasserstoff-Atoms. Die folgende Skizze zeigt die Amplitudenquadrate der jeweiligen Wellenfunktionen – üblicherweise als "Dichteverteilung" interpretiert.



(S10)

Wir können nun entweder behaupten, diese Wellenfunktionen seien nichts als mathematische Hilfsmittel zur Bestimmung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des (punktförmigen?) Elektrons – mit all den eben erwähnten absurden Konsequenzen, oder wir akzeptieren, was eigentlich evident ist: dass sich alle diese Bilder auf wirklich existierende stationäre Wellenzustände beziehen.

Wir haben also die Wahl:

Entweder wir wählen das *Nebeneinander* von Teilchen und Wellen.

Dann haben wir uns für einen Sachverhalt entschieden, der für sich allein schon absurd ist, und der überdies eine Reihe weiterer Absurditäten nach sich zieht: Reduktion der Wellenfunktion, objektive Wahrscheinlichkeiten, Nichtlokalität.<sup>13</sup>

Oder wir nehmen an, dass Teilchen nicht als *substanzielle Entitäten*, sondern als *dynamische Muster* unteilbar sind, weil sie stationären Wellenzuständen entsprechen, und dass Teilcheneigenschaften deshalb durch Wellenklassen *definiert* sind.

Dann verschwinden alle Absurditäten, und die Zusammenhänge werden einsichtig.

Ich schließe damit den allgemeinen Teil der lokalen und objektiven Interpretation der Quantentheorie ab. In den folgenden Abschnitten soll demonstriert werden, wie durch die Anwendung der Modellannahmen auf bekannte quantenmechanische Szenarien all das, was zuvor unerklärlich und paradox erschien, einfach verschwindet.

---

<sup>13</sup> Lässt man die Annahme der Reduktion der Wellenfunktion fallen, dann kann die Bellsche Ungleichung nicht mehr abgeleitet werden, wie gleich anschließend gezeigt wird.



### ***3.11. Anwendungen***

Der entscheidende Schritt zur Klärung der nun folgenden, bekannten Paradoxien ist in allen Fällen die Annahme, dass keine Reduktion der Wellenfunktion stattfindet – oder um es ausführlicher zu sagen: dass quantenmechanische Amplitudenquadrate niemals verschwinden, weil sie sich immer auf die Intensitäten existierender Wellen beziehen, und dass sie nur deshalb die Wahrscheinlichkeiten von Messereignissen wiedergeben, weil die Ereignisse Übergänge sind, die durch stetige Summierung ebendieser Wellenintensitäten ausgelöst werden.

Die Paradoxien lösen sich dann ganz von selbst auf und es wird unmittelbar klar, was eigentlich geschieht. So etwa bei dem Paradoxon von de Broglie, dem

#### **Elektron in der Schachtel**

Nehmen wir an, in Paris wird ein Elektron in einer Schachtel eingefangen, deren Wände das Elektron reflektieren. Nach kurzer Zeit wird die Wellenfunktion des Elektrons über die ganze Schachtel verteilt sein. Nun teilt man die Schachtel durch einen Schieber in zwei gleich große Hälften und bringt eine Hälfte nach Tokio. Dann hat man in jeder Hälfte eine Wahrscheinlichkeit von je  $1/2$ , das Elektron vorzufinden oder nicht. Wird die Hälfte in Paris geöffnet, dann findet man darin ein Elektron oder nicht, aber jedenfalls "reduziert" die Pariser Messung die gesamte Wellenfunktion und verwandelt dadurch den Zustand der in Tokio befindlichen Hälfte von einer Überlagerung der Zustände *vorhanden* und *nicht vorhanden* in eine eindeutige Wirklichkeit. Auch hier stößt man also auf die Nichtlokalität der üblichen Sichtweise.

Aus unserer Sicht ergibt sich dagegen Folgendes:

In jeder Schachtelhälfte sind Elektron-Wellen, also kann in jeder Schachtelhälfte ein Elektron gefunden werden. Ob das der Fall ist, hängt von den Ausgangsbedingungen in den zum Auffinden verwendeten Detektoren ab, d.h. davon, ob darin einer der lokalen Schwingungszustände (eine der Elektronenhüllen) nahe genug an der Grenze zum "Umspringen" in den nächsten stabilen Zustand ist oder nicht (siehe Abschnitt 3.6.). Da im Fall des Erscheinens des Elektrons in einer Schachtelhälfte die Wellenfunktion in der anderen Hälfte *nicht* verschwindet, löst sich der Zusammenhang zwischen den Schachtelhälften auf, der dem Paradoxon zugrunde liegt.

## Schrödingers Katze

Der Sachverhalt ist so klar, dass dazu nichts gesagt werden muss. Es findet ein Übergang (Ereignis) statt oder nicht, und die Katze ist tot oder nicht.

Nicht benötigt werden: *Mess-Akt, Beobachter, Bewusstsein, Aufspaltung des Universums, Dekohärenz, Krötenpulver, Furunkelextrakt usw.*

## EPR-Paradoxon

Nun also zum zweiten Durchgang der lokalen Rekonstruktion des EPR-Szenarios. Diesmal soll der Zusammenhang zwischen der lokalen Auflösung des Paradoxons und der zentralen Annahme der Alternativinterpretation der Quantentheorie im Mittelpunkt stehen.

Es wird gezeigt:

*Lässt man die Annahme der "Reduktion der Wellenfunktion" fallen und nimmt stattdessen an, dass alle in ihr enthaltenen Wellen zu Übergängen (Messereignissen) beitragen, dann kann die Bellsche Ungleichung nicht abgeleitet werden.*

Das lässt sich auf folgende Weise durchführen:

Wir betrachten wieder Photonenpaare, die durch den Zerfall eines Spin-0-Systems erzeugt werden.

Wir nehmen an, die Messungen auf einer Seite werden nicht von den Messungen auf der anderen Seite beeinflusst.

Sei  $\alpha$  der zufällige Winkel zwischen der Polarisation des linken Photons und der Richtung des linken Polarisators. Dann gibt es zwei Wahrscheinlichkeitsamplituden:  $\cos \alpha$  und  $\sin \alpha$ ; Die Wahrscheinlichkeit des Durchgangs ist  $\cos^2 \alpha$ , die des Nicht-Durchgangs  $\sin^2 \alpha$ .

Setzt man nun, wie üblich, die Reduktion der Wellenfunktion voraus, dann verschwindet die Wahrscheinlichkeitsamplitude  $\cos \alpha$ , falls das Photon nicht durchgeht, und die Ausgangsbedingungen der nächsten Messung sind identisch mit den Ausgangsbedingungen der soeben durchgeführten, d.h. der folgende Messvorgang ist unabhängig von dem Messvorgang, der soeben stattgefunden hat.

Lässt man dagegen die Annahme der Reduktion der Wellenfunktion fallen, dann ist  $\cos^2\alpha$  nicht mehr bloß die Wahrscheinlichkeit des Erscheinens eines Photons, sondern *auch* das Amplitudenquadrat einer *wirklich durchgegangenen Welle*, die anschließend den Detektor erreicht.

Da diese Welle nicht verschwindet, aber auch keinen Übergang auslöst, verbleibt sie im Detektor und trägt zu den nachfolgenden Übergängen (Messungen) bei. Dadurch ändern sich die Ausgangsbedingungen der nachfolgenden Messungen: diese sind dann nicht nur von den Wellen abhängig, die den Detektor seit der vorherigen Messung erreicht haben, sondern auch von Wellen, die schon früher angekommen sind. Die Winkel  $\alpha$  sind jedoch zufällig, die Folge der Winkel ändert sich somit bei jeder Versuchsreihe. Das bedeutet, dass die Anfangsbedingungen der Messungen niemals gleich sind und dass die Messergebnisse untrennbar mit dem Verlauf des jeweiligen Experiments verbunden sind.

Um die Bellsche Ungleichung ableiten zu können, müssen aber Aussagen über weitere Messungen an denselben Objekten möglich sein. Die Annahme der Reduktion der Wellenfunktion garantiert, dass jede einzelne Messung vom Versuchsverlauf unabhängig ist. Unter dieser Voraussetzung ist die Information bezüglich weiterer Messungen an denselben Objekten verfügbar.

Ohne Reduktion können aber die Messereignisse nicht aus dem Versuchsverlauf gelöst werden, weil sie vom spezifischen, unwiederholbaren Ablauf des Versuchs abhängen. Daher kann überhaupt nichts darüber gesagt werden, was der Fall wäre, wenn dieselben Objekte ein weiteres Mal gemessen würden.

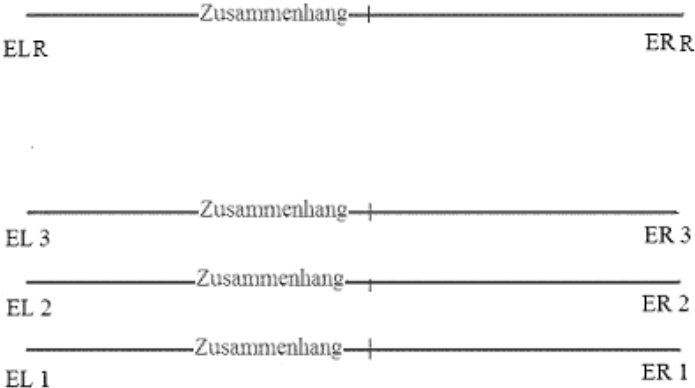
Das hat zur Folge, dass die Bellsche Ungleichung nicht mehr abgeleitet werden kann. (Diese Überlegungen finden sich ausführlich im [ersten Kapitel](#).)

Das heißt: Die Reduktion der Wellenfunktion ist eine notwendige Voraussetzung der Bellschen Ungleichung. Lässt man die Annahme der Reduktion fallen – mit anderen Worten: gesteht man den Wellen Existenz zu, so dass sie sich nicht einfach in Nichts auflösen können – dann verschwindet der Beweis der Nichtlokalität.

Hier ist also der Verzicht auf die Reduktion der Wellenfunktion zwar nicht gleichbedeutend mit der Auflösung des Paradoxons, aber der entscheidende Schritt ist getan: das Szenario ist aus dem Griff der Bellschen Ungleichung befreit und offen für lokale Beschreibungen. Es gibt keinen Grund mehr, anzunehmen, dass es *nicht* lokal beschrieben werden kann.

Zur Illustration zwei Skizzen:

In der Standardinterpretation ist jedes Ereignispaar  $(EL_i, ER_i)$  von allen vorhergehenden Ereignispaaren und damit vom Verlauf des Experiments unabhängig. Dann gilt die Bellsche Ungleichung, und es ist daher notwendig, zwischen  $EL_i$  und  $ER_i$  einen *nichtlokalen* Zusammenhang anzunehmen, wie in der folgenden Skizze dargestellt (R ist die Anzahl der Ereignispaare):



(S11)

Ohne die Reduktion ist dagegen jedes Ereignispaar von allen vorhergehenden Ereignispaaren und damit vom spezifischen Versuchsverlauf abhängig:



(S12)

Die Bellsche Ungleichung kann hier nicht abgeleitet werden. An die Stelle des *nichtlokalen* Zusammenhangs zwischen *räumlich* getrennten Ereignissen  $EL_i$  und  $ER_i$  in der Standardinterpretation tritt also in der Alternativinterpretation der *lokale* Zusammenhang zwischen *zeitlich* getrennten Ereignissen (im selben Detektor).

Wie im [ersten Kapitel](#) festgestellt, sind an eine lokale Beschreibung des Szenarios folgende Forderungen zu stellen:

Die von der Quantenmechanik vorausgesagten Wahrscheinlichkeiten müssen in konsistenter Weise als Funktionen von Variablen dargestellt werden, deren Träger direkt am Ort der Messung – also in den Detektoren – lokalisiert sind. Außerdem muss die Struktur des Szenarios übernommen werden, d.h. die Objekte, die die Träger dieser Variablen sind, müssen vom Zerfallsort  $Z$  stammen, dann die Polarisatoren durchqueren und schließlich die Detektoren erreichen.

Die Modellierung selbst ergibt sich aus den allgemeinen Annahmen der lokalen und objektiven Interpretation, wie sie in diesem Kapitel präsentiert worden ist:

Stetige Wellenabstrahlung führt zu unstetigen Übergängen ("Photonen"). Statt der Abstrahlung von Photonenpaaren, die zueinander rechtwinkelig polarisiert sind, nehmen wir daher die Abstrahlung von Paaren von *Wellen* an, die zueinander rechtwinkelig polarisiert sind und aus denen sich die abgestrahlten Wellengruppen zusammensetzen.

Im lokalen Modell muss die Zahl der Ereignisse in einem Detektor der *Gesamtintensität* der Wellen proportional sein, die auf den Detektor treffen.

Wir definieren also Zufallsvariable folgendermaßen:

( $\delta$  ist der Winkel zwischen den Polarisatoren,  $\alpha_i$  der zufällige Winkel zwischen der Wellenpolarisation und der Ausrichtung des Polarisators links, somit  $(\alpha_i+90-\delta)$  der entsprechende Winkel rechts)

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

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

Die Wahrscheinlichkeit  $w_L$  ( $w_R$ ) eines Übergangs links bzw. rechts (d.h. des Auftretens eines "Photons" im linken bzw. rechten Detektor) ist unseren Modellannahmen zufolge gleich dem Erwartungswert der Zufallsvariablen:

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

Das entspricht der quantenmechanischen Voraussage.

Der Erwartungswert ist aber nur zur Berechnung der Häufigkeit der Ereignisse in *einem* Detektor geeignet. Er enthält keine weitere Information. Um die Korrelation der Ereignisse auf beiden Seiten zu ermitteln, benötigen wir jedoch Information über den zeitlichen Zusammenhang zwischen diesen Ereignissen.

Wovon hängen die Zeitpunkte des Eintretens von Ereignissen ab? Mit Sicherheit vom zeitlichen Verlauf der beim Detektor ankommenden Intensitäten, d.h. von den zeitlichen Intensitätsschwankungen. Das Ausmaß dieser Schwankungen ist durch die *Varianz* der Zufallsvariablen gegeben.

Die Wahrscheinlichkeit der Ereignisse in *einem* Detektor lässt sich auf folgende Weise durch die Varianz der Zufallsvariablen ausdrücken: (Die Faktoren 2 und 1/4 erscheinen zunächst willkürlich. Sie werden gleich anschließend begründet.)

$$w_L = 2 * \text{Var}(X) + 1/4 = 1/2 \quad (3)$$

( Beweis:  $2 * \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\cos^2 \alpha - 0.5)^2 d\alpha + \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$  )

Der Zusammenhang zwischen den Intensitätsschwankungen auf *beiden* Seiten wird durch die *Kovarianz* der Zufallsvariablen ausgedrückt. Das legt die Vermutung nahe, dass die Wahrscheinlichkeit  $w_{LR}$  des Auftretens *gleichzeitiger* Übergänge auf beiden Seiten durch eine zu (3) analoge Gleichung gegeben ist, die statt der Varianz die Kovarianz enthält. Für die Kovarianz gilt

$$\text{Cov}(X,Y) = E [ ( X - E(X) ) ( Y - E(Y) ) ] =$$

$$= \int_0^{2\pi} (\cos^2 \alpha - 0.5)(\cos^2(\alpha + 90 - \delta) - 0.5) d\alpha \frac{1}{2\pi} = -\frac{1}{8} + \frac{1}{4} \cos^2(90 - \delta) \quad (4)$$

Daraus folgt, dass tatsächlich analog zu (3) gilt:

$$W_{LR} = 2 * \text{Cov}(X,Y) + 1/4 = 1/2 \cos^2(90 - \delta) = 1/2 \sin^2 \delta \quad (5)$$

Nach (4) liegt die Kovarianz – abhängig vom Winkel  $\delta$  – im Intervall zwischen  $-1/8$  und  $+1/8$ . Die Faktoren 2 und  $1/4$  haben also den Zweck, das Intervall  $[-1/8, +1/8]$  auf das (für die Wahrscheinlichkeit erforderliche) Intervall  $[0, 1/2]$  abzubilden.

Die Nummern der Zufallsvariablen geben ihre zeitliche Ordnung an. Deshalb bedeutet (5):

*Die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens von Photonen in beiden Detektoren hängt vom Ausmaß der Übereinstimmung des Intensitätsverlaufs auf beiden Seiten ab.*

Für  $\delta = 0^\circ$  erreicht die Kovarianz ihr Minimum, und es gibt überhaupt keine gemeinsamen Ereignisse. Für  $\delta = 90^\circ$  erreicht sie ihr Maximum: in diesem Fall sind die Intensitäten auf beiden Seiten zu jedem Zeitpunkt einander gleich, und alle Ereignisse sind gemeinsame Ereignisse.

Gleichung (5) lässt sich leicht verallgemeinern. Nehmen wir an, dass der Winkel zwischen den Polarisationen der gemessenen Photonen – der in unserem Modell gleich dem Winkel zwischen den Polarisierungen der abgestrahlten Wellen ist – nicht  $90^\circ$  beträgt, sondern den beliebigen Wert  $\zeta$  hat. Für die Zufallsvariablen muss dann gesetzt werden

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

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

(4) bleibt gültig, wenn  $90^\circ$  durch  $\zeta$  ersetzt wird, und (5) wird dann zu

$$W_{LR} = 2 * \text{Cov}(X,Y) + 1/4 = 1/2 \cos^2(\zeta - \delta) \quad (6)$$

**(6) führt in *allen* möglichen Fällen zu Resultaten, die mit der Quantenmechanik übereinstimmen.**

Der entscheidende Punkt ist:

**Die durch (6) ermittelten Resultate sind *lokal*.**

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

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

Die Behauptung der Nichtlokalität von Gleichung (6) ist also keine mögliche Position. Wer nun dennoch weiterhin die Nichtlokalität der quantenmechanischen Voraussagen behaupten will, die in allen Fällen mit den aus Gleichung (6) ermittelten übereinstimmen, dem verbleibt als einziger Ausweg, diese vollständige Übereinstimmung als ***Zufall*** aufzufassen.

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

1. Die Bellsche Ungleichung kann nicht abgeleitet werden. Es kann also gar kein Grund mehr dafür angegeben werden, warum eine lokale Interpretation *nicht* möglich sein sollte
2. Das Szenario wurde komplett in das lokale Modell übernommen.
3. Die Modellierung folgt genau den allgemeinen Annahmen der lokalen und objektiven Interpretation der Quantentheorie.

Gleichung (6) liefert nicht nur die korrekten Wahrscheinlichkeiten, sie erfüllt auch die an eine lokale Lösung gestellte Forderung, die Ereignisse – den Modellannahmen entsprechend – in den spezifischen Verlauf einer Mess-Serie einzubetten.



## Computersimulation

Zur Feststellung des Konvergenzverhaltens habe ich einige Computersimulationen von (5) durchgeführt. Hier die Ergebnisse für 30, 100 und 1000 Paare von Zufallsvariablen und für einige charakteristische Winkel  $\delta$ . (Für die Kovarianz sind jeweils drei Resultate angegeben. Ganz rechts der QM-Sollwert. Alle Resultate beziehen sich auf Spin-0-Systeme.)

n = 30	delta	E(X)	2*Cov(X,Y)+1/4			QM Sollwert
	0	0.486	-0.010	0.006	0.020	0.
	22.5	0.492	0.039	0.075	0.111	0.073
	45	0.502	0.212	0.248	0.283	0.25
	67.5	0.511	0.407	0.421	0.436	0.427
	90	0.479	0.457	0.481	0.494	0.5
n = 100	delta	E(X)	2*Cov(X,Y)+1/4			QM Sollwert
	0	0.497	-0.012	0.000	-0.029	0.
	22.5	0.484	0.060	0.062	0.042	0.073
	45	0.481	0.243	0.228	0.234	0.25
	67.5	0.488	0.431	0.409	0.436	0.427
	90	0.530	0.498	0.497	0.529	0.5
n = 1000	delta	E(X)	2*Cov(X,Y)+1/4			QM Sollwert
	0	0.499	0.001	0.004	-0.011	0.
	22.5	0.491	0.073	0.070	0.066	0.073
	45	0.506	0.251	0.241	0.250	0.25
	67.5	0.508	0.431	0.417	0.434	0.427
	90	0.509	0.502	0.500	0.506	0.5

Abschließend soll noch erwähnt werden, dass sich  $W_{LR}$  auch durch Zufallsvariable auf *einer* Seite ausdrücken lässt:

Sei  $I = \{ i \mid 1 \leq i \leq n \}$  die Menge der Nummern der Zufallsvariablen bei insgesamt n Paaren.

Sei  $I_E = \{ i \mid \text{sign}(X_i - 1/2) = \text{sign}(Y_i - 1/2) \}$ ,  $I_D = \{ i \mid \text{sign}(X_i - 1/2) \neq \text{sign}(Y_i - 1/2) \}$ .

$$\text{Sei } SL_E = \sum_{i \in I_E} |X_i - 1/2|, \quad SL_D = \sum_{i \in I_D} |X_i - 1/2|$$

Dann gilt:

$$W_{LR} = \frac{1}{2} \frac{SL_E}{SL_E + SL_D} = \frac{1}{2} \cos^2(\zeta - \delta) \quad (7)$$

(Der Beweis kann nahezu unverändert aus dem [ersten Kapitel](#) übernommen werden.)

Weitere Kommentare zum 2-Photonen-Szenario erübrigen sich, da alles Notwendige schon im ersten Kapitel gesagt worden ist.

Was ist mit anderen Verschränkungsszenarien? Sofern es sich um Photonenverschränkung handelt, kann es kein Problem geben: erstens bleibt formal alles gleich wie bisher, und zweitens gilt Gleichung (6) in *allen* Fällen, auch für den Einzelprozess. Damit ist die Ursache der Korrelationen aufgeklärt und in den Formalismus integriert. Daher muss sich jede Photonenkorrelation auf das angegebene Schema zurückführen lassen.

Andere Verschränkungen habe ich nicht untersucht. Was aber das ursprüngliche EPR-Szenario betrifft, das sich auf Ort- und Impulsmessungen bezieht, ist Folgendes zu sagen:

Die zu messenden Objekte (z.B. "Teilchen") sind Wellengruppen, also Überlagerungen von Wellen mit verschiedenen Wellenlängen. Das bedeutet: Vor der Messung ist es nicht möglich, den Objekten einen bestimmten Impuls oder einen bestimmten Ort zuzuordnen. Auch wenn nach der Messung an einem Objekt der Messwert für das andere Objekt vorausgesagt werden kann, existiert er dennoch vor der Messung nicht.

Vor der Messung gibt es also weder einen eindeutigen Ort noch einen eindeutigen Impuls. In diesem Sinn existieren die Eigenschaften "Ort" und "Impuls" vor der Messung nicht. Auch in der lokalen und objektiven Interpretation werden sie erst durch die Messung erzeugt – allerdings nicht durch die Reduktion der Wellenfunktion, sondern durch einen physikalischen Prozess. (Wie beim Beispiel am Ende von Abschnitt 3.7.)

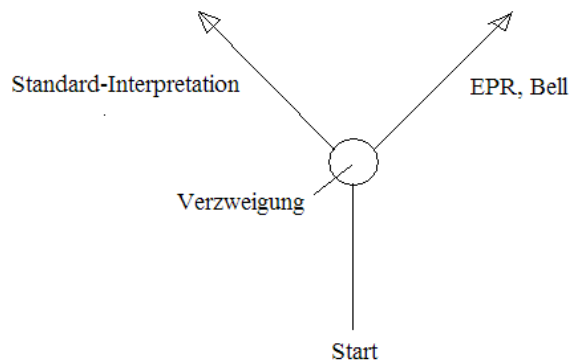
Die EPR-Annahme ist also falsch, und das EPR-Realitätskriterium<sup>14</sup> ist ungeeignet. Dass wir nach der Impulsmessung auf einer Seite das Ergebnis der Impulsmessung auf der anderen Seite voraussagen können, ist eine Folge der Symmetrie des Verlaufs auf beiden Seiten, und nicht, wie EPR irrtümlich annahmen, eine Folge davon, dass das "Teilchen" diesen Impuls schon vorher hatte. Vor der Messung gab es kein Teilchen und daher auch keinen eindeutigen Impuls.

## Bemerkungen

1. Bevor wir das EPR-Paradoxon endgültig verlassen, wenden wir uns noch kurz der Frage zu, inwiefern sich meine Argumente für eine lokale Wirklichkeit von den bisher zur Diskussion gestellten unterscheiden. (Ich beginne mit der Antwort. Die Erläuterung folgt unmittelbar anschließend.)

*Die hier vorgeschlagene Argumentation für eine lokale Interpretation verschränkter Systeme findet **in einem ganz anderen Bereich** statt als die bisherige Diskussion.*

Zunächst eine Skizze der Struktur des üblichen, wohlbekannten Verzweigungs-Szenarios:



(S13)

Gemeinsamer Ausgangspunkt aller Varianten ist die quantenmechanische Beschreibung eines Paares verschränkter Objekte.

---

<sup>14</sup> Einstein, Podolsky und Rosen, a.a.O.: "Wenn wir, ohne auf irgendeine Weise ein System zu stören, den Wert einer physikalischen Größe mit Sicherheit [...] voraussagen können, dann gibt es ein Element der physikalischen Realität, das dieser physikalischen Größe entspricht."

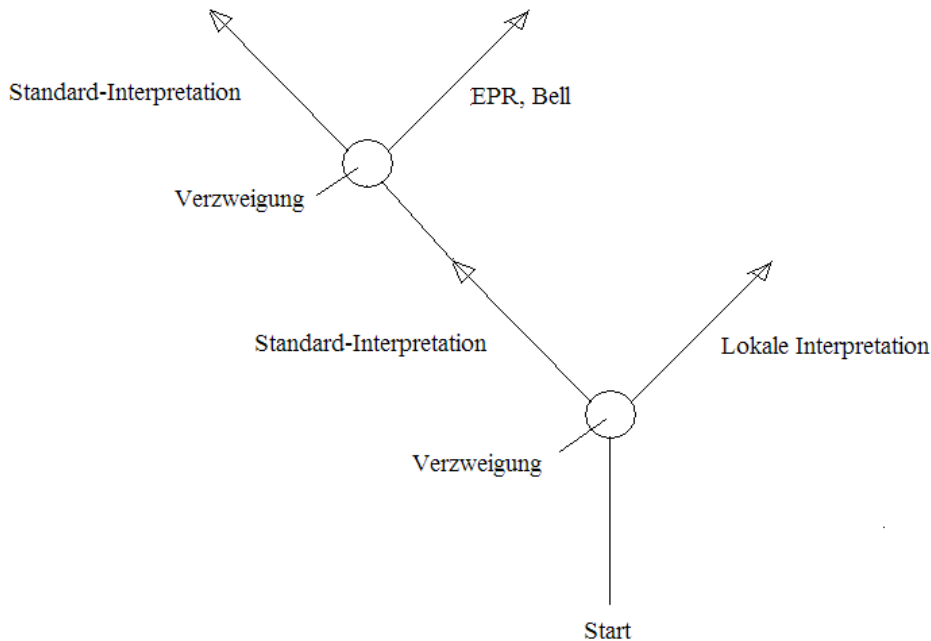
Am Verzweigungspunkt trennen sich dann die Auffassungen auf folgende Weise:

Die Verfechter der Standardinterpretation gehen davon aus, dass die beiden Mess-Ereignisse nicht voneinander getrennt werden können; Einstein, Podolsky und Rosen behaupten dagegen die Getrenntheit der beiden Ereignisse; Auch John Bell nimmt diesen Standpunkt ein, jedoch nur, um daraus einen Widerspruch zur Quantentheorie abzuleiten.

Soweit also das Szenario, in dem die Auseinandersetzung bisher stattgefunden hat.

Meine eigenen Argumente gehören jedoch nicht zu diesem Szenario. Sie greifen tiefer an, an einem Punkt, in dem von der Frage, ob die Messungen voneinander unabhängig sind oder nicht, noch gar nicht die Rede ist.

Die folgende Skizze dient dazu, diesen Sachverhalt zu illustrieren. Das Szenario der vorigen Skizze findet sich im linken oberen Teil wieder. Es ist hier also *nachgeordnet*. Bevor dieses Szenario überhaupt erreicht werden kann, muss erst ein anderes Verzweigungs-Szenario durchquert werden:



(S14)

Ausgangspunkt ist wieder die quantenmechanische Beschreibung eines Paares verschränkter Objekte.

Am ersten Verzweigungspunkt geht es jetzt aber *nicht* um die Frage der Lokalität. Hier muss vielmehr eine Entscheidung darüber getroffen werden, wie der *experimentelle Verlauf* interpretiert wird, und darüber, was ein *Ereignis* ist und wie es zustande kommt.

In der Standard-Interpretation wird jedes Ereignispaar als *selbständiges* Element einer Mess-Serie aufgefasst, das *unabhängig von den vergangenen Ereignissen* und somit auch unabhängig vom Versuchsverlauf ist. Diese Entscheidung führt zum linken Weg, und *erst nach dieser Entscheidung* kann das übliche, bekannte Verzweigungs-Szenario betreten werden.

Tatsächlich ist aber dann auch die Entscheidung über die Frage der Lokalität bereits gefallen, denn es kann ja nicht ernsthaft bezweifelt werden, dass der Weg, den EPR vorgeschlagen haben, durch die Bellsche Ungleichung und zahlreiche Experimente an verschränkten Systemen endgültig versperrt ist.

Daraus folgt, dass auf dem linken Pfad in der Skizze nur noch die Standardinterpretation möglich ist. Hier wird also die Nichtlokalität zur Gewissheit.

Wählt man hingegen die alternative Sichtweise des experimentellen Verlaufs, in der – wie am Beginn dieses Abschnitts beschrieben – die *Reduktion der Wellenfunktion nicht stattfindet* und in der deshalb die Ereignisse stets zu einer spezifischen, *nicht wiederholbaren* Mess-Serie gehören, so dass sie nicht losgelöst davon betrachtet werden können, dann ist man auf dem Pfad rechts in der Skizze, und das übliche Verzweigungs-Szenario wird überhaupt nicht erreicht.

Auf diesem Weg stellt sich die Frage der Nichtlokalität also gar nicht.

In dieser Gegenüberstellung wird auch erkennbar, wie fundamental die für die Bewahrung der Lokalität erforderliche Änderung der Sichtweise der quantenmechanischen Wirklichkeit ist: Sowohl die Definition des *Ereignisses* als auch die des *Objekts* ändern sich. Auch die Definition der *Wechselwirkung* ist betroffen, und diese Aufzählung ließe sich nach Belieben fortsetzen.

2. Die Unabhängigkeit des aktuellen Ereignisses von allen vorhergehenden Ereignissen ist in der Standardinterpretation dermaßen selbstverständlich, dass die Frage, ob sie tatsächlich vorausgesetzt werden kann, niemals gestellt wird.

In der Standardinterpretation existiert das erste Verzweigungsszenario also überhaupt nicht.

Auch in diesem Fall ist der Grund dafür *letztlich* wieder, wie bei allen quantenmechanischen Interpretationsproblemen, die Bindung des Denkens an gegenständliche Analogien. Es sind diese Analogien – vor allem die Vorstellung von *Teilchen* – die die Interpretation in die Irre führen und Artefakte wie Nichtlokalität erzeugen.

Ein Modell des Messprozesses, in dem Objekte als *Teilchen* aufgefasst werden, isoliert den Messprozess und trennt ihn von der Vergangenheit, während das *Wellenmodell* ihn in einen Gesamtprozess integriert, wo jedes Ereignis von den vorausgegangenen Ereignissen abhängt – jedoch nur, wenn die Wellen *real* sind und nicht verschwinden, so dass die Reduktion der Wellenfunktion nicht stattfindet.

## *Doppelte Wunder*

Vor einiger Zeit habe ich gemeinsam mit einem Freund herzlich über einen esoterischen Zeitungsartikel gelacht, in dem von einem doppelten Wunder berichtet wurde:

Bei einer Séance habe sich eine schwere Statue von selbst in die Höhe erhoben und sei auf einem komplizierten Weg mit großer Geschwindigkeit durch das Zimmer geflogen. Aber nicht nur das – obwohl im Zimmer zahlreiche Gegenstände herumstanden, sei es der Statue gelungen, mit schier unglaublichem Geschick jede Kollision zu vermeiden und all diese Hindernisse zu umfliegen, bevor sie sich wieder auf ihrem ursprünglichen Platz niederließ, so dass nach diesem Spuk alles genauso aussah wie vorher – gerade so, als wäre überhaupt nichts geschehen!

Mindestens ebenso sehr haben wir aber schon oft über ein anderes doppeltes Wunder gelacht, das Physiker gern einander und der verblüfften Öffentlichkeit erzählen:

Es gibt, sagen sie, geheimnisvolle Zusammenhänge zwischen beliebig weit voneinander entfernten Objekten: Wenn Alice ein Objekt, das sich bei ihr befindet, auf gewisse Weise manipuliert, dann spürt das ein anderes Objekt, das sich weit weg bei ihrem Freund Bob befindet, und verändert sich sprunghaft.

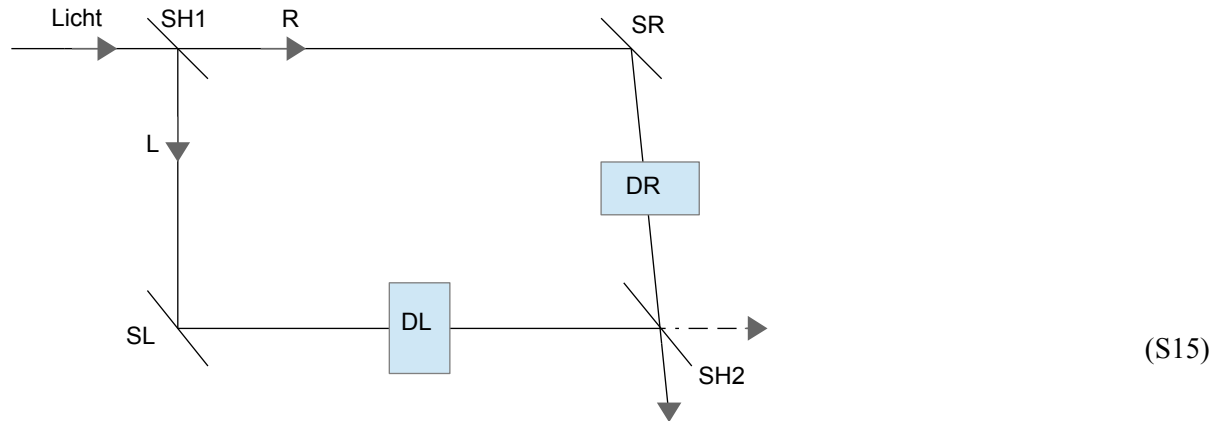
Wahnsinn, denkt die verblüffte Öffentlichkeit, träumt von intergalaktischem Sex und plant den Kauf einer Voodoo-Puppe.

Aber da erzählen die Physiker von einem weiteren Wunder – einer wirklich perfiden Verschwörung: Die Natur zaubert nicht nur solche Voodoo-Zusammenhänge ins Universum, sie arrangiert sie mit schier unglaublichem Geschick noch dazu so trickreich, dass sie keinesfalls zur Übermittlung von Informationen irgendwelcher Art verwendet werden können – gerade so, als gäbe es sie überhaupt nicht!



## Paradoxon der zwei Wege

Das Paradoxon, mit dem das Kapitel über Quantenmechanik begonnen hat, kann auf dieselbe Weise gelöst werden wie das EPR-Paradoxon.



Zur Erinnerung: In der üblichen Sichtweise zeigt der Verlauf des Versuchs folgende Absurdität:

- Wenn sich die Detektoren in den Strahlengängen befinden, so spricht immer nur ein Detektor an: da das Photon unteilbar ist, kann es nur (mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils  $1/2$ ) *entweder* den Weg L *oder* den Weg R wählen.
- Wenn wir aber die beiden Detektoren aus den Strahlengängen entfernen, dann beobachten wir nach dem zweiten halbdurchlässigen Spiegel Interferenz, das heißt: Das Photon bzw. die Lichtwelle muss *beide* Wege genommen haben, im Widerspruch zu a).

Da wir von Wellen ausgehen, muss zu b) nichts gesagt werden. Aufzuklären ist aber, warum bei a) niemals beide Detektoren ansprechen, da wir doch annehmen, dass *immer* auf *beiden* Wegen Wellen laufen.



Dazu benutzen wir das Schema des EPR-Szenarios. Dort waren die Zufallsvariablen  $X$  und  $Y$  durch die Amplitudenquadrate der Wellen auf beiden Seiten definiert. Ihre Beziehung war dadurch bestimmt, dass sich die Polarisationsrichtungen dieser Wellen immer um den gleichen Winkel unterscheiden.

Hier können ebensolche Zufallsvariablen auf folgende Weise definiert werden:

Wir setzen wieder voraus, dass sich die Wellengruppen auf beiden Wegen aus Teilwellen zusammensetzen. Nehmen wir nun an, die Amplitude einer solchen Welle *vor* dem ersten halbdurchlässigen Spiegel sei 1. Wenn sie durch den Spiegel in zwei Wellen mit den Amplituden  $A_L$  und  $A_R$  geteilt wird,

dann gilt 
$$A_L^2 + A_R^2 = 1$$

Diese Bedingung ist erfüllt, wenn

$$A_L = \cos \alpha, \quad A_R = \sin \alpha$$

Die Teilung soll zufällig sein. Wir nehmen also an, dass  $\alpha$  zufällig ist. (Gleichverteilt zwischen 0 und  $2\pi$ .)

Da der Erwartungswert von  $\cos^2 \alpha$  und  $\sin^2 \alpha$  jeweils gleich  $1/2$  ist, beträgt das Amplitudenquadrat auf beiden Wegen im Mittel gleich  $1/2$ , also ist die Ereigniswahrscheinlichkeit gleich  $1/2$ , in Übereinstimmung mit der quantenmechanischen Voraussage.

Sei nun 
$$X_i = \cos^2 \alpha_i$$

– wobei hier  $X_i$  für die Intensität einer Welle steht, die den Weg L entlang läuft. Für  $Y_i$ , das für die Intensität der Welle steht, die auf R unterwegs ist, gilt dann

$$Y_i = \sin^2 \alpha_i = \cos^2 (\alpha_i - 90)$$

$X$  und  $Y$  entsprechen den Zufallsvariablen des vorigen Abschnitts, wenn in (1a') gesetzt wird

$$(\zeta - \delta) = -90^\circ$$

Die Wahrscheinlichkeit gleichzeitiger Ereignisse in beiden Detektoren ist somit nach Gleichung (6) gegeben durch

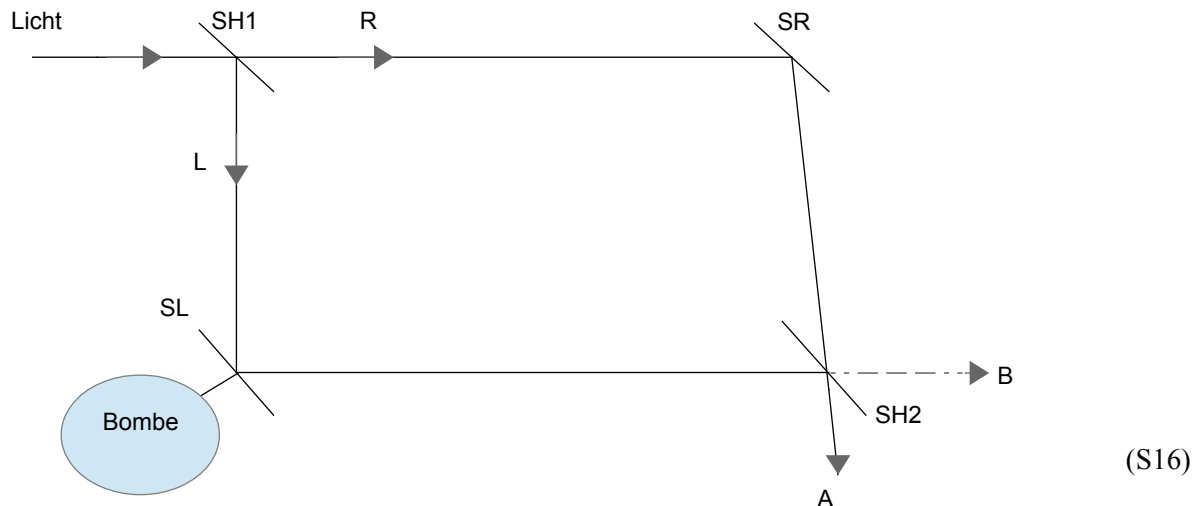
$$W_{LR} = 2 \text{Cov}(X,Y) + 1/4 = 1/2 \cos^2(\zeta - \delta) = 1/2 \cos^2(-90) = 0$$

Das heißt: Obwohl immer auf beiden Wegen Wellen unterwegs sind, sprechen niemals beide Detektoren zugleich an.

### Wechselwirkungsfreie Quantenmessungen

sind in der üblichen Sichtweise Messungen, bei denen *überhaupt nichts* geschieht und dennoch etwas gemessen wird.

Das Szenario ist dem des vorigen Abschnitts ähnlich:<sup>15</sup>



Zunächst wieder die übliche Beschreibung – vorläufig ohne die Bombe links unten:

<sup>15</sup> Es wurde – in geringfügig anderer Form – 1993 von Elitzur und Vaidman vorgestellt. (Elitzur A. C. and Vaidman L. (1993), *Quantum mechanical interaction-free measurements*. Found. Phys. 23, 987-97.)

Ein Photon bewegt sich – links oben beginnend – durch die Versuchsanordnung. Es wird durch den ersten halbdurchlässigen Spiegel SH1 in die 2 Zustände *durchgegangen* und *nicht durchgegangen* aufgespalten, beide mit der gleichen Wahrscheinlichkeit  $1/2$ . Beim zweiten halbdurchlässigen Spiegel SH2 kommt es zur Interferenz der beiden Zustände. Die Längen der Wege sind so aufeinander abgestimmt, dass in Richtung B destruktive Interferenz auftritt. Das Photon kommt also mit Sicherheit bei A an.

Nehmen wir nun an, wir hätten eine Serie von Bomben mit folgendem Zündmechanismus: Ein beweglicher Spiegel, der mit dem Zünder verbunden ist, löst die Explosion aus. Der Mechanismus ist so empfindlich, dass dafür schon der Impuls genügt, den ein einziges Photon auf den Spiegel überträgt, wenn es auf ihn trifft.

Einige Bomben sind defekt: ihr Zündspiegel klemmt. Die Aufgabe ist, eine intakte Bombe zu finden, ohne sie zugleich explodieren zu lassen.

Mit der skizzierten Versuchsanordnung ist das auf folgende Weise möglich:

Man bringt die Bomben, eine nach der anderen, genau so an, dass der Zündspiegel die Stelle des Spiegels SL einnimmt. Wenn es sich um eine defekte Bombe handelt, dann ist der Spiegel fixiert und alles bleibt gleich: das Photon erreicht mit Sicherheit A.

Was ist aber nun, wenn die Bombe einwandfrei funktioniert und der Spiegel beweglich ist? Dann wird die Bombe zu einem *Messgerät*: Sie misst, welchen Weg das Photon nimmt.

Ist das Photon auf dem Weg L unterwegs, dann führt die Wechselwirkung mit dem Spiegel zur Explosion.

Falls es aber *nicht* zur Explosion kommt, dann wurde durch die Bombe gemessen, dass das Photon den anderen Weg genommen hat. Da nun aber eine Messung erfolgt ist, ändert sich die Interferenz bei SH2, und das bedeutet, dass jetzt die Wahrscheinlichkeit, dass das Photon B erreicht, nicht mehr 0 ist.

Wir müssen also nur abwarten, bis ein Photon in B detektiert wird. Die Bombe, die sich gerade in der Versuchsanordnung befindet, ist dann ein funktionsfähiges Exemplar.

In dieser Beschreibung ist also eine Messung durch eine Wechselwirkung erfolgt, die überhaupt nicht stattgefunden hat, mit einem Objekt (Photon), das gar nicht dort war. Wir gewinnen Information aus einer Veränderung, die durch etwas verursacht wurde, was gar nicht geschehen ist.

Jeder, der bis hierher gelesen hat, weiß natürlich, wie sich dieser *unglaublich interessante* Sachverhalt durch die alternative Interpretation in einen *völlig trivialen und verständlichen* Sachverhalt verwandelt, an den kein weiterer Gedanke mehr verschwendet werden muss. Der Vollständigkeit halber will ich es aber dennoch ein weiteres mal vorexerzieren.

Zur Erklärung wird benötigt, dass

1. die Annahme von Lichtteilchen bei der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie überflüssig ist (wie bei der Beschreibung des Lichtelektrischen Effekts und des Compton-Effekts gezeigt wurde).

2. die un stetigen Übergänge, die Photonen genannt werden, durch stetige Akkumulation von Wellenintensitäten verursacht werden.

Daraus folgt, dass nicht etwa *nichts* geschieht oder *nichts* vorhanden ist, wenn kein Übergang erfolgt, sondern dass bloß die Intensität der vorhandenen Wellen nicht ausreicht, um einen solchen Übergang auszulösen.

Bezogen auf das Bomben-Szenario bedeutet das Folgendes:

Falls – in der üblichen Sichtweise – durch die Bombe gemessen wird, dass das Photon den anderen Weg nimmt, so dass sich die Interferenz ändert und das Photon nun B erreichen kann, dann geschieht aus unserer Sicht nicht etwa *nichts*, sondern es treffen Lichtwellen am Bombenspiegel auf, deren Gesamtintensität zwar für eine Zündung nicht genügt (es reicht sozusagen nicht für einen Übergang, also für ein ganzes "Photon"), die aber dennoch den Spiegel ein (winziges) Stück bewegen, wodurch die Weglänge und damit zugleich die Interferenz verändert wird. (Und man sollte hinzufügen, dass das der Fall sein *muss*, wenn es sich um existierende Wellen handelt.)

Von diesem Standpunkt aus stellt sich die übliche Auffassung des Szenarios und die Einbettung in das allgemeine Interpretationsschema also folgendermaßen dar:

Zuerst wird behauptet, dass die un stetigen Übergänge zwischen verschiedenen Zuständen von Elektronenhüllen elementar und *unzerlegbar* sind. Die Differenz zwischen zwei Zuständen wird *Photon* genannt.

Daraus folgt, dass – falls kein *ganzes* Photon vorhanden ist – *überhaupt nichts* vorhanden ist und deshalb auch nichts verursacht werden kann, sodass sich also *nichts* ereignet.

Dann ereignet sich aber *doch* etwas.

Das wird aber nicht etwa als Widerspruch oder wenigstens als Grund zu zweifeln aufgefasst, sondern es folgt bloß großes allgemeines Staunen über dieses weitere Wunder der Natur. Es wird gesagt: "Oh, das ist seltsam – etwas, was gar nicht vorhanden ist, bewirkt eine Veränderung. Etwas, was sich gar nicht ereignet, ist dennoch eine Messung. Das ist wahrlich ein tiefes Geheimnis."

Das kann wohl nur *Eulenspiegelerei* genannt werden. Man stelle sich vor, eine Person A behauptet, die Person B, die sich im selben Raum aufhält, existiere überhaupt nicht. Dann *sagt* B irgendetwas. Daraufhin revidiert A nicht etwa seine Behauptung, er ist bloß verwundert und ruft aus: "Um Himmels Willen, wie kann es sein, dass jemand, der nicht existiert, sprechen kann?"

Das ist aber nun zugleich die Schlusspointe unserer Aufklärung quantenmechanischer Paradoxien. Ruhigen Gewissens beenden wir damit den Rundgang durch die quantenmechanische *Freakshow* – nun, da wir alle Freaks befreit und in normale Wesen zurückverwandelt haben.

### ***3.12. Geschichtlicher Kommentar***

Die Frage drängt sich auf, warum die lokale und objektive Interpretation bisher noch nicht existierte.

Der wichtigste Grund ist zweifellos die historisch gewachsene Bindung der physikalischen Begriffe und Konzepte an die Objektwelt. Diese Bindung erscheint unvermeidlich: die messbare Wirklichkeit präsentiert sich in gegenständlicher Form. Physik muss also mit der Beschreibung der Eigenschaften und des Verhaltens von Objekten beginnen, genau so, wie es sich tatsächlich ereignet hat.

Was ist zu erwarten, wenn die Erforschung der Natur, deren Basis die Gleichung

$$\text{Kraft} = \text{Masse} * \text{Beschleunigung}$$

darstellt, im Zuge ihres immer tieferen Eindringens in die Mikrowelt auf die Tatsache der fundamentalen Wellennatur des Seienden stößt?

Genau das, was zu Beginn des 20. Jahrhunderts geschehen ist: Die Wellennatur des Seienden wird zwar erkannt, aber die Teilchenvorstellung kann nicht aufgegeben werden, *weil das ganze Beschreibungssystem darauf beruht*.

Das führt dann zu der paradoxen und – um es ganz klar zu sagen – *unmöglichen* Vorstellung von Objekten, die Welle *und* Teilchen sind, und daraus folgt dann alles Weitere: Reduktion der Wellenfunktion, objektiver Zufall, Nichtlokalität und was sonst noch an absurden Begriffsbildungen existiert.

Um allerdings das geringe Ausmaß der Gegenwehr zu verstehen, die sich gegen die Absurditäten der neuen Sichtweise formierte, muss man den Bereich der Physik selbst verlassen. Dass Unsinnigkeiten dieser Art nicht nur akzeptiert, sondern sogar als intellektuelle Errungenschaften oder auf irgendeine andere Weise – z.B. als "tiefe Wahrheiten" – verklärt wurden, lässt sich nur vom kulturellen Hintergrund der Zeit aus verstehen, der sich auch in den Biographien der Quantentheoretiker der ersten Generation spiegelt und ihre Überzeugungen mitbestimmt. Die Verachtung, die etwa Heisenberg oder Pauli den Versuchen einer realistischen und verständlichen Interpretation entgegenbrachten, die von Einstein, Schrödinger und de Broglie unternommen wurden, ist von genau derselben Art wie die Verachtung, die ein Dadaist für die realistische Malerei empfand.

Hier ist klar zu sehen, auf welche Weise die kulturelle Entwicklung in die Physik einzudringen vermag: die *formale Struktur* der Theorien bleibt zunächst unangetastet – sie ist der experimentellen Überprüfung verpflichtet, die keine Phantastereien zulässt; die *Interpretation* aber – also der ganze begriffliche Unterbau – wird Teil des historischen Gesamtprozesses und fügt sich den kulturellen Zwängen. In den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts bedeutet das: sie wird "dadaistisch".

Leider ist das aber noch nicht alles. Die Interpretation bestimmt nämlich in jedem Fall ganz wesentlich die künftige Entwicklung. Auf diese Weise dringt der kulturelle Hintergrund also schließlich doch in den formalen Teil der Physik ein, und das ist auch der Grund, weshalb die theoretische Physik in die Sackgasse geraten ist, in der sie sich heute befindet.

Kurz gesagt: Wenn *Teilchen* selbst nicht fundamental sind, dann wird das Ziel der theoretischen Physik – die Theorie von Allem – nicht dadurch erreicht werden können, dass die zwischen Teilchen auftretenden Wechselwirkungen vereinheitlicht werden.

### 3.13. *Schlussbetrachtung*

Wir setzen großes Vertrauen in die Naturwissenschaft und in den rationalen Diskurs. Zu Recht! – es ist das Beste, was wir haben.

Und doch ist es leider eine Tatsache, dass gerade zur Klärung von wirklich grundsätzlichen Fragen eine rationale Argumentation nicht immer ausreicht. Es gibt weltanschauliche Positionen, die ganz offensichtlich unsinnig, aber dennoch unwiderlegbar sind. Eine solche Position ist z.B. der Solipsismus.

Oder betrachten wir zwei andere Beispiele: die Annahme eines "übernatürlichen" Wesens, das "außerhalb" von Raum und Zeit existiert, und die Annahme eines von jeder materiellen Grundlage unabhängigen Geistes. Beide Annahmen sind offenbar unsinnig. Diese Gewissheit steht auch nicht etwa an der äußersten Grenze des Denkens, zu der man erst nach einem langen Weg gelangt – nein, sie folgt aus dem *ersten* Schritt, den das vernünftige Denken auf dem Weg zur Erkenntnis unternimmt: der Feststellung, dass die *Natur* – oder das Seiende, oder wie auch immer man es nennen mag – *in sich geschlossen* ist, mit anderen Worten: dass alles, was sich ereignet, eine natürliche Ursache hat, und dass nichts aus diesem Bereich herausführen kann. Der Versuch, der Naturkausalität ein zweites Erklärungsprinzip zur Seite zu stellen, scheitert augenblicklich und endgültig an der Frage des Zusammenwirkens der beiden Prinzipien: Wo und wie sollte dieses zweite Prinzip Anwendung finden, wenn doch überall und jederzeit die Naturgesetze gelten?

Das bedeutet: Wenn es uns nicht gelingt, das, was existiert und was sich ereignet, in einem natürlichen Zusammenhang zu begreifen, oder wenn unsere Modellbildungen – wie etwa beim sogenannten *Urknall* – über diese Grenze hinaus zu weisen scheinen, dann ist das *niemals* Anlass zu außernatürlichen Begriffsbildungen, sondern immer ein Hinweis auf die Unzulänglichkeit der Modelle oder auf einen Defekt des diesen Modellen zugrunde liegenden Naturbegriffs.

Es gibt also keine Wirklichkeit "außerhalb der Wirklichkeit" oder "hinter der Wirklichkeit". Das ist in trivialer Weise einsichtig und ohne jeden Zweifel gültig. Es stellt, wie gesagt, den *Beginn* des vernünftigen Denkens dar.

Dennoch ist es unmöglich, jemanden durch Argumente zu überzeugen, der diese Selbstverständlichkeit nicht schon selbst erkannt hat. Jeder kann behaupten, in der linken oberen Ecke seines Wohnzimmers schwebe sein Hausgeist *Xupatl*, der ihn vor bösen Dämonen beschützt. Üblicherweise fügt er dann noch hinzu, dass er zwar nicht beweisen könne, dass *Xupatl* existiert, dass aber auch nicht

bewiesen werden kann, dass er *nicht* existiert. Jede weitere Diskussion ist sinnlos. Sie führt niemals zum Erfolg, sondern nur zu einem nervösen Leiden.

In solchen Fällen kann man zwar argumentieren und gute Gründe anführen, aber irgendwann erschöpft sich die Argumentation und es bleibt als letztes Mittel nur der *Appell* an die Vernunft. Wenn sie fehlt – was meistens der Fall ist – dann lässt sich der Unsinn nicht aus der Welt schaffen.

Warum diese Abschweifung?

Weil es sich mit den Fragen der Lokalität, der Objektivität und der Identität genauso verhält.

Es ist *vollkommen selbstverständlich*, dass es nur dann Zusammenhänge zwischen räumlich separierten Objekten gibt, wenn sie durch einen Prozess vermittelt sind, dessen Geschwindigkeit nicht größer ist als die des Lichts. Nichtlokale Zusammenhänge sind schlichtweg Unsinn. Aber natürlich musste, um dies im Horizont gegenwärtiger Überzeugungen aussprechen zu können, erst gezeigt werden, dass der Bellsche Beweis nicht greift und warum das der Fall ist.

Da das aber nun endlich geschehen ist, behaupte ich, dass die Lokalität des Seienden auch schon vorher völlig klar war – eben genau so, wie auch völlig klar ist, dass weder *Xupatl* existiert noch irgendein anderes immaterielles Wesen – und dass die einzig sinnvolle Frage immer schon die nach dem Irrtum in der Beweisführung der Nichtlokalität gewesen wäre.

Ebenso verhält es sich im Fall der *Objektivität* des Existierenden. Es ist *vollkommen selbstverständlich*, dass die Dinge sind, wie sie sind, unabhängig davon, ob es uns gibt oder nicht und ob wir sie beobachten oder nicht. (Ausgenommen natürlich der Einfluss, den der physikalische Prozess der Beobachtung auf das beobachtete Objekt hat. Dieser ist aber analysierbar und in keiner Weise geheimnisvoll.)

Dasselbe gilt schließlich auch für die *Identität*: Die Konsequenzen identischer Sachverhalte müssen wiederum identische Sachverhalte sein, und nicht bloß identische Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Es gibt keinen objektiven Zufall.<sup>16</sup>

---

<sup>16</sup> Eigentlich ist schon die Trennung in Sachverhalte und Folgen falsch. Die Wirklichkeit besteht aus *zeitlichen Abläufen* (Prozessen), deren kleinste Bestandteile keine *Zeitpunkte*, sondern mindestens *Zeitdifferenziale* sind. Wenn es *Zeitpunkte* aber nur in Beschreibungen gibt und nicht in der Wirklichkeit, dann kann ein Prozess nur in *offene Zeitintervalle* unterteilt werden, die sich überlappen. Im Begriff des Prozesses sind dann Sachverhalte und Folgen vereint. Wird der Begriff der Identität nun auf Prozesse angewendet statt auf Sachverhalte, dann verschwindet die Möglichkeit verschiedener Folgen identischer Sachverhalte. Mehr dazu folgt im zweiten und dritten Teil.



Der Verlust dieser drei Grundprinzipien des Weltverständnisses war nur deshalb möglich, weil der Rückzug der theoretischen Physik ins formale Schema so vollständig war, dass jeder Begriff von Seiendem aus der Physik verschwunden ist. Die Wirklichkeit *ist* aber nicht bloß Mathematik; sie *existiert* – wir *müssen* uns also einen Begriff von ihr machen, der über Mathematik hinausgeht. Und wenn wir das tun, dann wird auch die interpretative Vernunft wiederhergestellt, denn jeder *Begriff* der Wirklichkeit hat den Prinzipien Lokalität, Objektivität und Identität zu genügen.<sup>17</sup>

Hat man aber überhaupt keinen Begriff der Wirklichkeit, dann ist *alles* möglich; es gibt dann keine *reductio ad absurdum* mehr, weil das Absurde für wirklich gehalten wird, und der Fall der Vernunft ist nicht mehr aufzuhalten.

Mein Anliegen war, Folgendes zu zeigen:

Wenn es keine Reduktion der Wellenfunktion gibt, dann werden die Prinzipien der Vernunft wieder in ihre Rechte gesetzt.

Dann sind Teilchen keine elementaren substanziellen Entitäten, sondern stationäre Zustände von Wellen bzw. Übergänge zwischen solchen Zuständen, falls sie Teil einer materiellen Struktur sind, und ansonsten auseinanderlaufende Superpositionen von Wellen, woraus wiederum folgt, dass die klassischen Eigenschaften Ort und Geschwindigkeit tatsächlich nicht existieren – jedenfalls nicht in der Weise, wie das bei Objekten, die entweder punktförmig sind oder zu jedem Zeitpunkt ein wohldefiniertes Raumvolumen einnehmen – Teilchen eben – der Fall wäre.

Aus dieser Sicht spielt sich ein Großteil der historischen Diskussion um die Vollständigkeit der Quantentheorie und um die Frage der Lokalität und Objektivität in einem völlig falschen Bereich ab: wenn man in diesen Fragen den Blick rückwärts wendet und versucht, die klassischen Begriffe Ort und Impuls (oder andere klassische Attribute) beizubehalten, dann – und zwar *genau* dann – kann die Bellsche Ungleichung abgeleitet werden, und alle drei Prinzipien, Objektivität, Lokalität und Identität, fallen dieser falschen Sichtweise zum Opfer.<sup>18</sup>

---

<sup>17</sup> Vorstellungen wie *Elektronenwolken* oder *verschmierte Teilchen* verdienen sicher nicht die Bezeichnung *Begriff der Wirklichkeit*, und das gilt auch für *interferierende Wahrscheinlichkeitsamplituden*, *objektive Wahrscheinlichkeiten*, *Reduktion der Wellenfunktion* etc. Die von der quantentheoretischen Interpretation anstelle der Wirklichkeit präsentierte *Black Box* ist einfach das Gegenteil eines solchen Begriffs.

<sup>18</sup> Einstein war bekanntlich der einzige unter den großen Physikern, der das Zepter der Vernunft hochhielt, und es ist tragisch, dass seine Strategie – eben der Versuch, die klassische Teilchenvorstellung in der Form des *objektiven Dualismus* (Teilchen innerhalb von Führungswellen) beizubehalten – schließlich die Preisgabe der Vernunft besiegelt hat, indem sie den Bellschen Beweis der Nichtlokalität ermöglichte.

Werden Objekte aber als stationäre Wellenzustände verstanden – bzw. außerhalb von Materie als (auseinander laufende) Wellengruppen – dann ist es klar, dass die Eigenschaften Ort und Impuls durch eine Unschärferelation begrenzt sind; in einer Welt aus Wellen müssen *alle* Objekt-Eigenschaften durch Wellen definiert sein, und die Tatsache, dass für bestimmte Paare von Eigenschaften eine Unschärferelation gilt – die von der klassischen Physik aus gesehen völlig unverständlich erscheint – wird dadurch zu einem aus der Mathematik bekannten, einsichtigen Sachverhalt.

Bemerkung:

Ich schließe mit einer Bemerkung, die zwar wegen ihrer Selbstverständlichkeit im Grunde überflüssig ist, die mir aber dennoch im Hinblick auf die extreme Verbreitung physikalischer und philosophischer Spekulationen geboten erscheint, die auf die übliche Interpretation der Quantentheorie zurückgehen:

Mit der Wiederherstellung der Objektivität, Lokalität und Identität werden *alle* diese Spekulationen obsolet. Da sowohl die Reduktion der Wellenfunktion als auch die Unschärfe auf einfache und einsichtige Weise erklärt worden sind, ist es nicht länger begründet und somit vollständig überflüssig, dem Akt der Beobachtung bzw. Messung oder dem Geist des Beobachters irgendeine Bedeutung für die Existenz des Beobachteten zuzuschreiben.

Auch die verschiedenen weitergehenden diffusen Vermutungen, dass in den quantenmechanischen Tatsachen das Geheimnis des Geistes verborgen sein könnte – dass also Bewusstsein nur "auf quantenmechanische Weise" entstehen könnte – sind damit hinfällig.

## 4. Abschließende Bemerkungen

### 4.1. Kurze Zusammenfassung

Weder bei der Speziellen Relativitätstheorie noch bei der Quantentheorie kann innerhalb des üblichen Begriffsrahmens geklärt werden, auf welche Wirklichkeit sich der Formalismus bezieht. Im Fall der SR ist die Wirklichkeit von Anfang an mit dem Formalismus verwechselt worden. (Dazu etwa Hermann Minkowski 1909: "Von Stund' an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren.") Im Fall der QT gibt es überhaupt keine Interpretation, sondern nur Erklärungen, warum es keine Interpretation gibt. In beiden Fällen ist die Wirklichkeit verschwunden. Das ist der Grund für interpretative Unklarheiten und für das Auftreten von Paradoxien.

Dieser Mangel ist nun behoben. Bei beiden Theorien hat die Untersuchung der Frage, *welche Wirklichkeit* hinter dem Formalismus steht und ihn begründet, zu einer konsistenten, realistischen und verständlichen Interpretation geführt.

Bei der Relativitätstheorie ist das durch folgenden Gedankengang gelungen:

Die in unterschiedlichen Bezugssystemen gegebenen zeitlichen Beziehungen zwischen verschiedenen Orten werden durch physikalische Prozesse vermittelt. Die dadurch festgelegten Zeiten müssen eindeutig sein, d.h. das Resultat muss – unabhängig vom gewählten Prozess – immer dasselbe sein. Das ist aber nur dann möglich, wenn es *letztlich* nur eine einzige Geschwindigkeit gibt, nämlich Lichtgeschwindigkeit. Daraus folgt unmittelbar, dass alles, was existiert und was sich ereignet, als Überlagerungsphänomen, als Muster aus Wellen mit Lichtgeschwindigkeit verstanden werden muss.

Bei der Quantentheorie war es erforderlich, nachzuholen, was in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts bei der Begegnung mit der Tatsache, dass alles Seiende Wellencharakter hat, verabsäumt worden ist:

Es ist nicht erkannt worden, dass sich durch die Entdeckung des Wellencharakters des Seienden die bis dahin gültige, auf der Teilchenvorstellung aufbauende Naturbeschreibung von einer *fundamentalen* in eine *phänomenale* Darstellung verwandelt hat. Elementarteilchen wurden weiterhin als unteilbare und elementare Entitäten verstanden, die nun aber *zusätzlich* auch Welleneigenschaften besitzen sollten.

Um zu einer objektiven und lokalen Interpretation zu gelangen, ist es jedoch notwendig, Teilchen als stationäre Zustände von Wellen bzw. Übergänge zwischen solchen Zuständen aufzufassen. Auch in dieser neuen Interpretation sind Elementarteilchen unteilbar und elementar, aber nicht *substanziell*, sondern *phänomenal*: Stationäre Wellenzustände sind unteilbare Phänomene, und sie sind auch elementar, aber nur in dem Sinn, dass sie nicht in Phänomene derselben Art zerlegt werden können – ihre Unteilbarkeit ist die von dynamischen Mustern, die *Attraktoren* entsprechen, vergleichbar stehenden Wellen oder Wirbeln in Flüssen.

Es gibt also keine Teilchen mehr, die zwischen zwei Beobachtungen ihre Existenz verlieren, sich in Superpositionen von Zuständen mit verschiedenen Wahrscheinlichkeitsamplituden verwandeln und erst bei der nächsten Beobachtung *als dieselben Teilchen* wieder in der Wirklichkeit auftauchen. An ihre Stelle treten Wellen, die außerhalb von Materie auseinanderlaufen und sich innerhalb von Materie – unter den dort gegebenen Randbedingungen – zu den immer gleichen, *formal identischen stationären Zuständen* organisieren.

Beobachtbare Ereignisse finden immer in materiellen Strukturen statt, so dass die Wellen *in allen Beobachtungen* teilchenartig erscheinen. Deshalb unterliegen wir dem Irrtum, sie wären auch zwischen diesen Beobachtungen *als dieselben Objekte* unterwegs, und würden schließlich *als substanziell identische* Entitäten wiedererscheinen.<sup>19</sup> Dann sind wir wegen des Auftretens von Interferenz gezwungen, diesen "Teilchen" *zusätzlich* Welleneigenschaften zuzuschreiben, und damit verschwindet alles, was geschieht, im Nebel der Unbegreiflichkeit.

Es wäre aber unangemessen, zu behaupten, die Vorgänge, die *zwischen* diesen Ereignissen liegen, seien unbeobachtbar: Sie zeigen sich durch Interferenz, und sie verursachen, wie im Abschnitt 3.6. am Beispiel des Doppelspaltexperiments erklärt, durch die Akkumulation ihrer Intensitäten die un stetigen Übergänge, die wir dann wieder direkt beobachten können.

Ganz unabhängig voneinander führen also die Erklärungen des relativistischen und des quantentheoretischen Formalismus zu der Annahme, dass Wellen die fundamentale Schicht der Wirklichkeit bilden.

---

<sup>19</sup> Ist diese Annahme nicht völlig absurd? Woher diese Überzeugung, dass die Teilchen auch zwischen den Beobachtungen unteilbar sind und daher *substanziell* mit sich identisch bleiben – sie verlieren doch ohnehin ihre Existenz und werden zu Überlagerungen von Wahrscheinlichkeitsamplituden. Im Fall von mehreren Teilchen führt es sogar zu falschen Resultaten, wenn man den Teilchen Individualität zuerkennt. Wozu also dieses Festklammern am Teilchenbegriff, d.h. an der *substanziellen Identität* der beobachteten Phänomene?

## ***4.2. Der Widerspruch zum Standardmodell***

Es ist nun an der Zeit, zu fragen, was sich durch die neue Sicht der Wirklichkeit eigentlich ändert.

Was Relativitätstheorie und Quantentheorie betrifft, ändert sich *formal* überhaupt nichts. Hier bedeutet die neue Sichtweise nur eine andere Interpretation dieser Theorien – wenn auch eine, die die relativistischen und quantentheoretischen Sachverhalte aufklärt und in der alle Absurditäten der bisherigen Sichtweise verschwinden.

Aus der hier präsentierten Änderung der Vorstellung von der Basis der Wirklichkeit folgt jedoch *auch*, dass sich die theoretische Physik seit Relativitätstheorie und Quantentheorie in die falsche Richtung bewegt hat. Am deutlichsten lässt sich das anhand der sogenannten starken Wechselwirkung demonstrieren. Folgendermaßen:

Ein wesentliches Element der neuen Interpretation ist, dass den Wellen, deren Amplituden der Berechnung von Ereigniswahrscheinlichkeiten dienen, *Existenz* zuerkannt wird; Mit anderen Worten, es wird angenommen, dass sie sich nicht einfach in nichts auflösen können und dass die Ereignisse tatsächlich von ihnen *verursacht* werden. Nur dadurch ist es möglich, die Lokalität der Welt wiederherzustellen und zu verstehen, was sich bei quantentheoretischen Messprozessen *wirklich* ereignet.

Wenn wir diese Grundannahme auf die Theorie der starken Wechselwirkung anwenden, gelangen wir zu folgendem Widerspruch:

Zwischen Quarks wirkt die starke Kraft. Sie ist so beschaffen, dass sie mit der Entfernung nicht abnimmt. Deshalb können Quarks nicht voneinander getrennt werden.

Neutronen bestehen aus drei Quarks. In einem Neutroneninterferometer wird durch Streuung an einer Kristallschicht ein Neutronenstrahl in zwei Strahlen geteilt, die sich bis auf eine Distanz von einigen Zentimetern voneinander entfernen. Die beiden Strahlen werden durch Streuung an einer zweiten Schicht wieder zusammengeführt, so dass nach einer dritten Schicht Interferenz beobachtet werden kann.

Die Intensität des Neutronenstrahls wird so gering gewählt, dass sich mit hoher Wahrscheinlichkeit jeweils nur ein Neutron im Interferometer befindet. Es werden also *einzelne Neutronen* geteilt.

Damit erhebt sich die Frage:

### ***Wenn das Neutron geteilt wird – wo sind dann die Quarks?***

Es ist klar, dass in der üblichen Sichtweise diese Frage unzulässig ist: Es ist sinnlos, zu fragen, was zwischen zwei Beobachtungen vorgeht. Die Elemente der Beschreibung sind nur mathematische Hilfsmittel. (Auch hier zeigt sich aber wieder geradezu überdeutlich die Seltsamkeit, um nicht zu sagen: die Verrücktheit dieser Position: Es ist ja nicht zu bezweifeln, dass in beiden Strahlen *irgendetwas* vorhanden sein *muss*, und dann ist die Frage, wo nun die Quarks sein sollen, unvermeidlich und offensichtlich auch unbeantwortbar.)

In der lokalen und objektiven Interpretation sind aber die Amplituden der Neutronenwellen nicht nur mathematische Hilfsmittel – ihnen wird Existenz zuerkannt (die sie durch Interferenz beweisen!).

Unter dieser Voraussetzung ist es jedoch der gegenwärtigen Darstellung der starken Wechselwirkung zufolge unmöglich, dass ein einzelnes Neutron geteilt werden kann, und das bedeutet, dass diese Darstellung ontologisch inadäquat ist: *Sie kann die tatsächlichen kausalen Beziehungen nicht enthalten.*

Wenn aber die Theorie der starken Wechselwirkung falsch ist, dann bricht das ganze Standardmodell zusammen. Es kann dann nicht mehr den Status einer fundamentalen Theorie beanspruchen, sondern bloß den Status einer rein formalen Näherung, vergleichbar dem bekannten Epizykelsystem, das einst zur Beschreibung der Planetenbahnen diente. Damit ist zugleich klar, dass auch alle Versuche, das Standardmodell weiter zu entwickeln, scheitern müssen.

Hier ist erkennbar, wie eine misslungene Interpretation zur Bildung falscher Theorien führt. Solange diese falsche Interpretation fortbesteht, wird es auch nicht möglich sein, die dadurch verursachten Fehler zu korrigieren und besser geeignete Theorien zu entwickeln.

Wir sind also zu folgendem Schluss gelangt:

***Die Alternativinterpretation und das Standardmodell (einschließlich aller Theorien, die darauf aufbauen) widersprechen einander.***

Ein Resultat von außerordentlicher Tragweite! Besteht aber überhaupt die Chance, dass die Alternativinterpretation aus dieser Kontroverse siegreich hervorgehen kann?

Ich denke ja, und zwar aus folgendem Grund: bei den Entscheidungen, die in den vorangegangenen Kapiteln getroffen werden mussten, ging es – jedenfalls in den fundamentalen Fragen – immer um

dieselbe grundsätzliche Art der Wahl: *die Wahl zwischen Sinn und Unsinn*. (Man denke wieder an die Frage, ob Wellen einfach verschwinden oder nicht, oder an die Frage, was beim Doppelspaltexperiment wirklich vor sich geht, oder an die Entscheidung zwischen Lokalität und Nichtlokalität, oder an die völlig absurde Vorstellung von "interferierenden Wurzeln aus Wahrscheinlichkeitsdichten".)

Die Physik der letzten Jahrzehnte ist jedoch aus genau denjenigen Annahmen hervorgegangen, die hier als *Unsinn* diagnostiziert wurden, und deshalb ist es gleichgültig, wie lange ihre Entwicklung schon andauert und wieviel intellektuelle und finanzielle Ressourcen in sie investiert wurden.

Aber nochmals gefragt: Ist es wirklich denkbar, dass das Standardmodell falsch ist, dass hier also tatsächlich ein historischer Irrtum von so unglaublichem Ausmaß vorliegt?

Abermals ja, und die Erklärung dafür beruht eben darauf, dass das ganze Theoriengebäude auf falschen Voraussetzungen errichtet worden ist. Genau jene Mängel und Irrtümer in den Interpretationen von Relativitätstheorie und Quantentheorie, die in den vorangegangenen Kapiteln kritisiert und behoben wurden, sind als Grundannahmen in die neue Physik eingegangen.<sup>20</sup>

Die Chance, Irrtümer zu korrigieren, besteht aber nur eine gewisse Zeit lang. Danach wendet sich die allgemeine Aufmerksamkeit unweigerlich anderen Problemen zu, und die ungeklärten Fragen geraten allmählich in Vergessenheit. Die nächste Chance auf eine Korrektur kommt daher erst dann, wenn die falschen Annahmen, die ins System integriert wurden, schließlich zu Problemen führen, die so gravierend sind, dass sie nicht länger ignoriert werden können. Bleibt die wahre Ursache dann noch immer unerkannt, bricht möglicherweise das ganze System zusammen.

Es ist nicht zu bestreiten, dass die neueste Physik Züge aufweist, die auf einen solchen Zustand hindeuten. Nicht zuletzt ist es die absolute Erfolglosigkeit der Superstringtheorie, die diese Sicht nahelegt.

---

<sup>20</sup> Im Zentrum steht wieder die Teilchenvorstellung. Die neue Physik geht von der Annahme aus, dass die Gruppenstruktur, die von den elementaren Objekten der Wirklichkeit und den mit ihnen durchführbaren Operationen gebildet wird, die *fundamentale* Ebene der Betrachtung darstellt. In diese Annahme gehen genau jene Voraussetzungen ein, die ein Verständnis der Wirklichkeit ausschließen: substantielle Identität der Objekte (– das ist eben die Teilchenvorstellung; mehr dazu im nächsten Abschnitt), Nichtexistenz der Wellen, Unteilbarkeit usw. Die Elemente selbst sowie die Operationen mit ihnen werden vorausgesetzt. Sie sind also aus der Theorie nicht ableitbar.

Diese Vorstellung von der Wirklichkeit steht in maximalem Gegensatz zur hier präsentierten Sicht der Wirklichkeit, in der alle Phänomene dynamische Muster sind.

### 4.3. *Verborgene Ontologie*

Die Probleme beim Verständnis quantentheoretischer Messprozesse, in denen die Wellenfunktion kollabiert, werden durch eine in der Standardinterpretation verborgene ontologische Annahme verursacht. Ihr Inhalt ist genau dasjenige, was hier als *substanzielle Identität der Messobjekte* bezeichnet wurde. Damit ist Folgendes gemeint:

Zunächst wird das Mess-Objekt *erzeugt* (präpariert). Danach durchquert es die Versuchsanordnung. Schließlich wird es *detektiert* (gemessen).

Nun wird aber, nicht nur im Rahmen der Standardinterpretation, sondern tatsächlich von *allen*, die sich je zur Interpretation der Quantentheorie geäußert haben, unbewusst und sozusagen "automatisch" angenommen, dass das, was *erzeugt* wird, und das, was *detektiert* wird, *dasselbe Objekt* ist.

Auch diejenigen, die sich selbst – sei es vor einem pragmatischen oder einem positivistischen Hintergrund – frei von jeder Ontologie wähnen, setzen dennoch voraus, dass es sich beim *erzeugten* und beim *detektierten* Objekt um ein und dasselbe Objekt handelt.

Sogar dann also, wenn man jede ontologische Annahme zu vermeiden versucht und die Phänomene gar nicht als "Teilchen" oder "Wellen" oder sonstwie auffasst, hat man doch eine folgenschwere *ontologische Entscheidung* getroffen: eben genau diejenige, die es, wie im Kapitel 3 gezeigt wurde, unmöglich macht zu begreifen was sich ereignet.

Ich erinnere daran, was beim Doppelspaltexperiment *wirklich* geschieht: Das Messobjekt (z.B. ein Elektron) wird zunächst erzeugt, durchquert danach den Doppelspalt, interferiert mit sich selbst und trifft auf die Detektorplatte – mit einer Intensität, deren Verteilung der (später gemessenen) Verteilung der Ereignisse entspricht.

***Das erzeugte Objekt ist jedoch keineswegs identisch mit dem detektierten Objekt:*** Das detektierte "Objekt" – das eigentlich ein Übergang zwischen zwei Schwingungszuständen ist – verdankt seine Existenz nicht nur der Wellenintensität, die gerade eben am Ort der Detektion vorhanden war, sondern auch denjenigen Wellenintensitäten, die schon früher dort aufgetroffen sind, und auch solchen, die schon vor Beginn des Experiments da waren.

Bei der Beschreibung des Doppelspaltexperiments wurde (unter Bemerkung 1) festgestellt, dass es die unbewusste Anwendung der *Ballwurf-Analogie* ist, die jedes Verständnis verhindert. Diese Analogie ist auch geeignet, die scheinbar vollkommene Selbstverständlichkeit der Annahme *substanzieller*



*Identität* der Objekte zu erklären: es wäre verrückt, die Identität des *geworfenen* und des *gefangenen* Balls zu bezweifeln. Ebenso verrückt ist es aber leider, diese Identität auf atomare und molekulare Gegebenheiten zu übertragen. Wenn dies geschieht – und ich betone nochmals, dass genau das bisher ausnahmslos der Fall war – dann ist eine Erklärung der quantentheoretischen Messprozesse vollständig ausgeschlossen.

Es ist also gleichgültig, was ansonsten noch angenommen wird oder ob überhaupt jede Interpretation vermieden wird; es ist völlig ausreichend, die *substanzielle Identität* des erzeugten und des gemessenen Objekts vorauszusetzen, um ein Verständnis zu verhindern und um die weitere Entwicklung der Physik – wie gerade eben gezeigt wurde – zur Bildung falscher Theorien zu veranlassen und sie solchermaßen in die Sackgasse zu treiben, in der sie gegenwärtig feststeckt.

Ich rede deshalb von *substanzieller Identität* und nicht einfach von Identität, weil hier der wesentliche Punkt die Unterscheidung von *substanzieller* und *formaler* Identität ist. *Substanzielle Identität* ist ein Konzept, das auf makroskopische materielle Objekte anwendbar ist. *Formale Identität* hingegen ist ein Konzept, das auf dynamische Muster zutrifft.

So ist etwa ein Flusswirbel A mit einem anderen Flusswirbel B, der unter identischen Randbedingungen in demselben Flussbett weiter unten auftritt, *formal*, aber natürlich nicht *substanziell* identisch. Das gilt für alle Phänomene, sofern sie als dynamische Muster aufgefasst werden. Z.B. ist im Doppelspaltexperiment das "Elektron", das erzeugt wird, *formal*, aber nicht *substanziell* identisch mit dem Elektron, das detektiert wird. Das detektierte Elektron ist ein Phänomen, das sich – ebenso wie der Flusswirbel – unter identischen Randbedingungen in identischer Gestalt *neu formiert* hat, und dasselbe gilt für das Neutron, das nach dem Interferometer detektiert wird.

In der Alternativinterpretation ist die Welt aus Wellen gebildet. Hier sind daher alle Phänomene stationäre Wellenmuster, und das Konzept der "substanziellen Identität" erweist sich grundsätzlich als ontologisch falsch. Im Bereich der alltäglichen Erfahrungswelt ist seine Anwendung jedoch unproblematisch, weil die Objekte – wie z.B. der geworfene Ball – in den hier vorherrschenden Größenordnungen langfristig stabil sind, so dass sie in allen Prozessen mit sich identisch bleiben.

In atomaren und molekularen Größenordnungen sind die Objekte jedoch nur bedingt stabil. Unter bestimmten Voraussetzungen lösen sie sich in die Wellen auf, aus denen sie bestehen und verlieren so ihre Identität. Diese Wellen können dann später zur Bildung *formal identischer* Objekte beitragen.

Daher kann das Konzept der *substanziellen Identität* nicht auf die Welt des Kleinsten und Allerkleinsten übertragen werden. Wenn dies dennoch geschieht, dann äußert sich seine ontologische Falschheit dadurch, dass die Ereignisse uninterpretierbar werden.

#### 4.4. Ausblick

Wenden wir uns nun der Frage zu, wie die Zukunft der Physik auf Basis der Alternativinterpretation aussehen könnte; In welche Richtung wird die Suche nach Vereinfachung und Vereinheitlichung gehen?

Im folgenden präsentiere ich einige grundsätzliche Überlegungen. Ich fasse mich aber kurz, weil sich die Antwort auf diese Frage von dem bisher erreichten Standpunkt aus nur erahnen lässt, während sie sich von dem Standpunkt aus, der im nächsten Teil der Arbeit eingenommen wird, ganz von selbst und in wesentlich klarerer Form ergibt.

Teilchen tragen Ladungen. Wird ein Teilchen als stationärer Wellenzustand aufgefasst, dann muss die Ladung diesem Wellenzustand zugeschrieben werden. Dadurch ändert sich etwas Wesentliches. Wie schon früher erwähnt, besteht zwischen einem Teilchen und einer Welle ein grundsätzlicher Unterschied: Während ein Teilchen mit seinen Eigenschaften nur *per definitionem verbunden* ist, lassen sich die Eigenschaften einer Welle aus ihrer Dynamik *logisch ableiten*. Wirkungen, die von einem Teilchen ausgehen, sind also bloß Teil seiner Definition, aber Wirkungen, die von einer Welle ausgehen, müssen auf die dynamische Form der Welle bezogen werden. Anders gesagt: die Wellen können nur *als Wellen* wechselwirken, und wenn die Wechselwirkung in den Raum hinausgreift, dann kann das nur *wellenartig* geschehen.

Das bedeutet:

1. Jedes Feld muss auf die Dynamik des stationären Zustands zurückgeführt werden, der die Quelle des Feldes darstellt. Was bei Teilchen bloß ein Akt der Zuordnung ist, verwandelt sich also beim Übergang auf Wellen in eine logische Beziehung.
2. Jedes Feld ist letztlich ein *Wellenfeld*, das durch Frequenzen, Wellenlängen und Phasen definiert ist.

Was ist mit der Vereinheitlichung der Wechselwirkungen? Um dies zu beantworten, muss Folgendes bedacht werden.

Ich wiederhole zunächst die Überlegung aus Abschnitt 2.12:

Es ist unbekannt, was im Fall von Lichtwellen eigentlich schwingt. Die Aussage: *Der elektrische und magnetische Feldvektor* kann nicht als Antwort gelten – das wäre, als würde man im Fall von

Wasserwellen das Wasser entfernen und dann behaupten, kinetische und potentielle Energie würden nun die Stelle des Wassers einnehmen. Das *Subjekt* der periodischen Veränderung, die der Wellenbewegung zugrunde liegt, kann nicht einfach durch allgemeine Beschreibungsgrößen ersetzt werden. Dieselbe Frage stellt sich bei der Quantentheorie: Worauf bezieht sich eigentlich die Amplitude in der Schrödingergleichung? Es gibt keine Möglichkeit, das Subjekt der Schwingung auf irgendeine bekannte physikalische Größe zu beziehen.

Würde man die – unzulässige – Ersetzung des Subjekts der periodischen Veränderung durch Beschreibungsgrößen gelten lassen, dann bestünde die Möglichkeit, verschiedene Ladungen verschiedenen Wellen zuzuordnen.

Die Amplituden müssen sich aber auf *irgendetwas Existierendes* beziehen. Es muss *irgendetwas* geben, *was* schwingt, und dieses existierende "etwas" kann, wie gesagt, nicht durch Beschreibungsgrößen ersetzt werden. Auch wenn wir nicht wissen, was sich da eigentlich periodisch ändert, ist es aufgrund dieser Überlegung doch klar, dass es – als etwas Existierendes – bei allen Wellen *dasselbe* sein muss.

Alle Wellen existieren im selben Raum, und deshalb muss das *Subjekt* der Schwingung bei allen Wellen dasselbe sein, mit anderen Worten: die Amplituden müssen sich bei allen Wellen auf dasselbe beziehen. *Beschreibungsgrößen* können einfach übereinandergelegt werden – aber etwas *Existierendes* kann *nicht* über etwas anderes Existierendes gelegt werden: Was existiert, beansprucht seinen raumzeitlichen Ort exklusiv für sich.

Wir sind also zu dem Schluss gelangt, dass alle Wellen von derselben Art sein müssen – in dem Sinn, dass in allen Wellen *dasselbe* schwingt; Auf dem Grund der Wirklichkeit gibt es keine verschiedenen Arten von Wellen.

Ist es überhaupt denkbar, dass sich die Wechselwirkungen auf diese Art vereinheitlichen lassen? Lässt eine einzige Wellenart genug Spielraum für die Ableitung aller Wechselwirkungen?

Aus Sicht der Alternativinterpretation ist die Frage in dieser Form jedoch gar nicht zulässig, weil ja, wie zuvor gezeigt wurde, die gegenwärtigen Darstellungen von starker und schwacher Wechselwirkung bloß ontologisch inadäquate Näherungen sind und somit ihren Status als fundamentale Theorien verloren haben.

Kehren wir also zu unserem Gedankengang zurück. Wir sind zu dem Schluss gekommen, dass es nur eine einzige Art von Wellen gibt, aus denen daher alle Wechselwirkungen folgen müssen.

Nun sind wir nur noch einen kleinen Schritt vom *Gesetz für Alles* entfernt:

Wenn in allen Wellen dasselbe schwingt, dann müssen alle Wellen demselben Gesetz gehorchen. Und wenn ferner diese Wellen alles sind, was existiert und was sich ereignet, dann gehorcht *alles* ebendiesem Gesetz.

Wir stehen vor dem *Mechanismus des Universums*:

*Es ist das Gesetz, dem die Ausbreitung der Wellen gehorcht.*

Das ist alles – und es ist mit Sicherheit überraschend. Im derzeitigen Interpretationsrahmen erscheint es sogar völlig absurd, aber dieser Rahmen hat sich ja nun auf dramatische Weise verändert, und von der neuen Interpretation ausgehend bedarf es bloß einiger einfacher Denkschritte, um zu diesem überraschenden Ende zu gelangen.<sup>21</sup>

Sonderbar ist auch, dass man mit einem Gesetz dieser Art – mit einer solchen "Weltformel" – eigentlich sehr wenig in Händen hält. In einem Universum aus Wellen ist alles, was existiert, ein *Muster* aus Wellen. Das Gesetz der Ausbreitung einer Störung sagt aber über eine solche Musterbildung überhaupt nichts aus; Muster entstehen erst in Verbindung mit bestimmten Randbedingungen.

Man denke etwa an den Klang eines Gefäßes: die Form des Gefäßes bestimmt das Klangspektrum. Das Wellenmuster ist vollständig durch diese Form festgelegt, das Gesetz der Ausbreitung der Störung bestimmt nur die Geschwindigkeit der Ausbreitung und damit zugleich die Frequenzen der Schwingungen.

Das ist nun auch die zur neuen Interpretation passende Analogie:

*Es gibt nur Wellen. Alles, was existiert und was sich ereignet, ist ein Muster aus Wellen. Das Universum ist einem schwingenden Körper vergleichbar, der sich in Wellenmustern selbst organisiert.*

---

<sup>21</sup> Eigentlich steht dieses Resultat schon allein durch die Erklärung der Speziellen Relativitätstheorie fest. Es folgt direkt aus der Tatsache, dass es nur Lichtgeschwindigkeit gibt und dass deshalb alles, was existiert und was sich ereignet, als Interferenzphänomen, als Muster aus Wellen aufgefasst werden muss. Ohne die Wellen-Interpretation der Quantentheorie bliebe aber völlig unklar, wie eine Wirklichkeit dieser Art beschaffen sein könnte. Die Entfernung zum üblichen physikalischen Denken ist einfach zu groß.

Es ist aber bloß eine Analogie, und sie wird im nun folgenden Teil einer abstrakteren Vorstellung weichen. Aber sie ist doch geeignet, den Gegensatz zur bisherigen Auffassung zu verdeutlichen, die gleich am Anfang dieses Buches durch das Zitat von Feynman zum Ausdruck gebracht wurde:

*Alles ist aus Atomen aufgebaut – aus kleinen Teilchen, die in permanenter Bewegung sind, die einander anziehen, wenn sie ein wenig voneinander entfernt sind, sich aber gegenseitig abstoßen, wenn sie aneinander gepresst werden.*

Der Übergang zwischen den beiden Sichtweisen der Natur lässt sich auf folgende Weise beschreiben:

In der üblichen Sichtweise werden die diskreten, teilchenartigen Phänomene für fundamental gehalten.

In der Alternativinterpretation wird angenommen, dass *unter* dieser Schicht diskreter Phänomene ein stetiges, wellenartiges Fundament der Wirklichkeit existiert, das die eigentlichen kausalen Beziehungen enthält. Diese fundamentale Ebene der Wirklichkeit ist aber keineswegs eine Erfindung der Alternativinterpretation – im quantenmechanischen Formalismus ist sie ja vorhanden; sie wird bloß in der konventionellen Interpretation für nichtexistent erklärt. In der Alternativinterpretation wird dieser Ebene dagegen Existenz zuerkannt.

Und daraus folgt schließlich:

***An die Stelle mehrerer verschiedener Felder, durch die diverse elementare Entitäten miteinander wechselwirken, tritt genau ein fundamentaler Zusammenhang zwischen differenziell benachbarten Punkten.***

Gleich zu Beginn des zweiten Teils werden wir der mathematischen Form dieses Gesetzes begegnen, von dem wir bisher nichts weiter wissen, als dass es existiert.