

Neue Ganzheit – die Quantenwelt ist anders

Jürgen Audretsch

In Diskussionen über Ganzheit oder Holismus stellt man immer wieder fest, dass unterschiedliche Bedingungen dafür angegeben werden, dass ein System ein holistisches System ist. Es soll hier kein Beitrag zu dieser Diskussion geleistet werden.¹ Unser Ziel ist es vielmehr zu zeigen, dass im Bereich der Quantenobjekte eine ganz neue und verblüffende Form von Ganzheit auftritt, die wir von der Physik der Alltagsobjekte und von anderen Ganzheiten z. B. vom sozialen Bereich her nicht kennen. Dabei wollen wir keine komplizierte Definition von Ganzheit an den Anfang stellen, sondern von dem Satz ausgehen, mit dem umgangssprachlich das angedeutet wird, was man unter Ganzheit versteht: „Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“. Damit ist gemeint, dass das Ganze Eigenschaften hat, die man nicht aus den Eigenschaften der Teile „zusammensetzen“ kann, so wie sie schon vorlagen bevor die Teile zu einem Ganzen zusammengefügt wurden. Wir werden sehen, dass das in ganz besonders drastischer Weise für Quantensysteme der Fall sein kann – nicht zuletzt deshalb, weil es eine durchaus problematische Sache sein kann, einem Quantenobjekt überhaupt gewisse Eigenschaften zuzusprechen. Wir wollen also untersuchen, wie sich Ganzheit im Quantenbereich manifestiert und mit Blick auf diese Fragestellung einige Eigenarten der Quantenwelt herausstellen. Damit diese charakteristischen Züge besonders deutlich werden, wollen wir Ganzheit, so wie wir sie oben schlag-

¹ Eine umfangreiche Analyse des Holismus, die auch den quantenmechanischen Holismus mit einschließt, findet sich bei ES-FELD (2002).

wortartig skizziert haben, zunächst im Bereich der klassischen Physik studieren. Auf diesem Hintergrund wird dann die Andersartigkeit der Phänomene im Quantenbereich besonders deutlich werden.

Bevor wir zur Beschreibung konkreter Beispiele übergehen, sind noch einige Vorbemerkungen angebracht. Die ganzheitlichen Phänomene, die bei Quantenobjekten auftreten, sind nicht ganz einfach zu verstehen. Man muss bereit sein, sich das Ungewöhnliche vorzustellen, denn es ist ja gerade das Charakteristische der Quantenwelt, dass sie nicht mit Hilfe der uns mehr oder weniger gut vom Alltag her bekannten Vorstellungen der klassischen Physik beschreibbar ist. Wir müssen also darauf gefasst sein, dass viel gedankliche Phantasie und Flexibilität nötig ist, wenn man mit den ganzheitlichen Quantenphänomenen umgehen will. Die Quantenphysik ist notwendigerweise unanschaulich. Das gehört zu ihrem Wesen, jedenfalls wenn wir unter anschaulich verstehen, dass man die Effekte auf Vorstellung zurückführen kann, die wir aus der Physik des Alltags kennen. Quantenphysik ist ja gerade keine klassische Physik.

Die Quantentheorie behandelt unter anderem die Physik der Atome und Moleküle sowie die der Photonen, also der Elementarteilchen des Lichts. Ganzheitliche Phänomene werden immer dann zu erwarten sein, wenn wir es mit mehreren dieser Quantenobjekte zu tun haben, also diese ganz besonderen „Teile“ in ganz besonderer Weise zu einem „Ganzen“ zusammenfügen. Wir werden das im Einzelnen diskutieren.

Der Rückbezug auf den Holismus, den wir im Quantenbereich finden, ist immer wieder zu weltanschaulichen Zwecken ausgenutzt worden. In der Esoterikdebatte wurde sich häufig auf die Quantentheorie berufen. Etwas verkürzt dargestellt hat man dabei folgendermaßen argumentiert: Die Physiker haben uns gesagt, dass in der Quantenwelt alles mit allem zusammenhängt. Die Objekte unserer Alltagsphysik sind aus Atomen und Molekülen und anderen Quantenobjek-

ten zusammengesetzt. Daher hängt in einer mehr oder weniger geheimnisvollen „quantenmechanischen“ Weise auch im Alltagsgeschehen alles mit allem zusammen. Auf diesem Hintergrund war dann die Versuchung groß, in einem nächsten Schritt auch paranormale Phänomene direkt auf quantenmechanische Effekte zurückzuführen. Aber wie wir oben schon betont haben, kann man das Verhalten von Quantenobjekten nicht auf ein klassisches Verhalten zurückführen. Und umgekehrt zeigen Objekte der klassischen Physik wie Stühle und Bilder an der Wand ein anderes Verhalten als es uns bei ganzheitlichen Quantensystemen begegnen wird. Grenzüberschreitungen in der einen oder in der anderen Richtung führen in aller Regel zu falschen Aussagen.

Einzelobjekte in der klassischen Physik

Doch nun zu konkreten Beispielen. Wir beginnen mit der klassischen Physik. In diesem Physikbereich sind die Teile, aus denen das Ganze zusammengesetzt wird, einzelne Objekte wie zum Beispiel Massen oder geladene Kugeln usw. Betrachten wir also zunächst die Einzelobjekte, die anschließend zu Gesamtheiten zusammengesetzt werden sollen. Von einem Auto, das auf einer Straße fährt, können wir sagen, dass es sich in einem bestimmten Zustand befindet. Wir wollen von allem anderen absehen und nur seinen Bewegungszustand betrachten. Dann hat das Auto in jedem Augenblick die Eigenschaft, eine bestimmte Geschwindigkeit zu haben. Klassische Objekte wie das Auto sind dadurch gekennzeichnet, dass man ihre Zustände mit Hilfe von klassischen Messungen ausmessen kann. So wird zum Beispiel in der Radarfalle die Geschwindigkeit eines Autos bestimmt, indem man einen Radarstrahl an dem Auto reflektiert. Das Auto und der Radarstrahl treten in Wechselwirkung, aber so, dass die Geschwindigkeit des Autos dabei unverändert bleibt. Es geht nicht etwa im Augenblick der

Reflektion des Radarstrahls an der Autooberfläche ein Ruck durch das Auto. Das Auto wird durch die Messung weder abgebremst noch beschleunigt. Charakteristisch für diese Geschwindigkeitsmessung ist es, dass die Geschwindigkeit selber unverändert bleibt. Messung ist also eine Wechselwirkung mit dem klassischen Objekt, ohne dass dabei dessen Zustand abgeändert wird. Man bekommt in der klassischen Messung eine Information über die Größe einer Eigenschaft – z. B. der Geschwindigkeit des Autos – die das Objekt im Augenblick der Messung hat. Die Eigenschaft hatte den gleichen Wert unmittelbar vor der Messung und hat ihn unmittelbar danach.

Ein anderes Beispiel ist ein rotes Tuch. Indem wir es mit weißem Licht beleuchten und das von ihm dabei ausgesandte Licht mit dem Auge registrieren, führen wir eine Farbmessung durch. Die Feststellung, dass das Tuch rot ist, gilt für den Augenblick der Messung, aber das Tuch war auch kurz vorher rot und es wird auch direkt nach der Messung rot sein. Insbesondere kann man sofort wieder hinschauen und wird feststellen, dass es nach wie vor rot ist. Die unmittelbare Wiederholung der Messung der Eigenschaft „Farbe“ führt wieder auf dasselbe Ergebnis. Dem Tuch kommt die Eigenschaft rot zu sein tatsächlich zu. Wir haben also beim klassischen Einzelobjekt, in unserem Beispiel ist das das Tuch, eine eigenständige Realität. Man sagt, dass diese Realität lokal ist, um damit auszudrücken, dass sie sich auf ein Einzelobjekt bezieht. Jedes klassische Objekt besitzt seine Eigenschaften objektiv und real. Wichtig ist dabei, dass es viele seiner Eigenschaften, wie z. B. seine Farbe, unabhängig davon hat, welche weiteren Systeme es noch auf der Welt gibt und welche Eigenschaften diese Systeme haben. In diesem Sinne sind alle diese Eigenschaften klassischer Systeme innere Eigenschaften. Das Tuch ist auch dann rot, wenn in seiner Nähe ein blauer Ball liegt oder ein grüner Ball. Man könnte also die ganze Welt

leer räumen und dennoch würde man bei dem Tuch bei einer Farbmessung feststellen, dass es rot ist.

Zusammengesetzte Systeme in der klassischen Physik

In einem zweiten Schritt werden wir ein klassisches Gesamtsystem aus Einzelobjekten zusammensetzen. Wir wollen ein Beispiel dafür geben, dass das Gesamtsystem Eigenschaften hat, bei denen man nicht einfach die Eigenschaften wieder findet, die seine Teile hatten, als sie noch völlig voneinander isoliert waren. Wir betrachten hierzu zwei verschieden elektrisch geladene Kugeln. Wir können uns vorstellen, dass es zum einen eine Kugel in einer sonst leer geräumten Welt gibt, die mit einer positiven elektrischen Ladung versehen wurde. Und dass es zum anderen eine zweite Kugel in der sonst leer geräumten Welt gibt, die entsprechend mit einer negativen Ladung versehen wurde. Dann kann man die beide in einer sonst leeren Welt zusammenbringen und stellt fest, dass sie sich wechselseitig anziehen. Das beschreiben wir, indem wir sagen, es gibt noch etwas Drittes, nämlich ein elektrisches Feld, das vom Abstand der Ladungen abhängt und mit den beiden Ladungen zusammen das Gesamtsystem bildet. Charakteristisch dabei ist, dass die Wechselwirkung und die daraus resultierende Anziehung durch die Größe der beiden Ladungen bestimmt ist. Die jeweilige innere Eigenschaft Ladung, die schon vorher vorhanden war und auch unverändert weiter vorliegt, führt im zusammengesetzten Ganzen auf die neue Eigenschaft „Wechselwirkung“.

Wir können unser Beispiel noch auf einen anderen Aspekt klassischer Gesamtheit hin auswerten. Wenn wir zum Beispiel die positive Ladung nach außen rücken und damit den Abstand zwischen den Ladungen vergrößern, dann wird die Kraft, die die negative Ladung durch das dann entstehende elektrische Feld erfährt, kleiner. Aber tatsächlich erfolgt

diese Feldveränderung nicht instantan. Sie kann sich maximal mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten und erreicht die zweite Ladung erst nach einer gewissen, allerdings in diesem Falle sehr kleinen Zeit. In dem System aus zwei Ladungen, das unser Ganzes bildet, können Teile aufeinander Wirkungen auswirken. Wir können das in unserem Beispiel auch so interpretieren: Wir haben den Spezialfall einer klassischen Informationsübermittlung vor uns, der zeigt, dass die Informationsübermittlung einen Träger braucht. Der ist in diesem Fall das elektrische Feld, in dem sich eine Änderung ausbreitet. Charakteristisch dabei ist, dass die positive Ladung die Informationen über den neuen Lagezustand der negativen Ladung mit einer zeitlichen Verzögerung erhält. Die Information über den Zustand der Partnerladung wird durch eine in Raum und Zeit fortschreitende Informationsübermittlung gewonnen. Die beiden Ladungen zusammen mit dem Träger der Informationsübermittlung bilden eine Ganzheit.

Klassische Korrelationen und das Handschuhpaar

In einem nächsten Punkt soll demonstriert werden, dass in der klassischen Physik Informationen über entfernte Objekte auch in ganz anderer Weise gewonnen werden können. Ganzheiten können in der klassischen Physik auch ohne Wechselwirkung zwischen Einzelobjekten entstehen. Das hat zur Folge, dass Informationen auch ohne eine Informationsübermittlung mit einem zugehörigen Träger gewonnen werden können. Dass das so ist, kann man an einer ganz banalen Alltagserfahrung demonstrieren. Wir schildern sie wieder im Einzelnen, weil sich die Verhältnisse in der analogen quantenmechanischen Situation davon in charakteristischer Weise unterscheiden. Wir nehmen als Beispiel für ein Gesamtsystem ein Handschuhpaar, bestehend aus einem linken und einem rechten Handschuh. Jeder

Handschuh hat die Eigenschaft, ein rechter oder ein linker Handschuh zu sein, auch schon bevor beide zu einem Paar zusammengefügt wurden. Ein linker Handschuh wird aber erst dann Partner in einem Handschuhpaar, wenn ein rechter Handschuh hinzutritt und umgekehrt. Wir haben zwei Handschuhe eines Pairs ausgewählt und nicht etwa zwei linke oder zwei rechte Handschuhe zusammengefasst. Im Hinblick auf das, was wir später bei Quantensystemen betrachten werden, können wir sagen, wir haben ein 2-Handschuh-System präpariert als ein Handschuhpaar. Damit ein Handschuh Teil eines Handschuhpaares sein kann, muss es einen Partner geben, der von einem speziellen Typ ist. Das Ganze ist in diesem Fall das Paar, und wir werden gleich sehen, dass es im Hinblick auf Information besondere Eigenschaften aufweist, die bei diesem 2-Handschuh-System allerdings wohlbekannt sind.

Wir verfahren dazu mit den Handschuhen folgendermaßen: Ein Handschuh wird in eine Kiste getan und ein anderer Handschuh wird an einen entfernten Ort transportiert. Wir wissen dabei aber nicht, welcher der beiden Handschuhe sich in der Kiste befindet. Wenn wir jetzt die Kiste öffnen und einen linken Handschuh in ihr vorfinden, dann wissen wir augenblicklich und ohne dass eine Informationsübermittlung stattgefunden hätte, dass der Handschuh am entfernten Ort ein rechter Handschuh ist. Durch Messung an einem der Teilsysteme haben wir ohne jede zeitliche Verzögerung sogleich einen Informationsgewinn über die Eigenschaft des anderen Teilsystems erhalten, auch wenn dieses beliebig weit entfernt ist. Die Ursache für diesen Informationsgewinn über ein entferntes lokales System ohne Informationsübertragung liegt darin, dass dieses entfernte System ein Teilsystem des wohlpräparierten Gesamtsystems des Handschuhpaares ist. Hier liegt also Ganzheit durch Präparation vor. Wechselwirkung ist nicht nötig. Die Ganzheit zeigt sich in Korrelationen von Messergebnissen: Immer wenn sich in der Kiste ein linker Handschuh befindet, dann

finden wir am entfernten Ort mit Sicherheit einen rechten Handschuh und umgekehrt.

Wir wollen noch darauf hinweisen, dass wir mit unserem Beispiel des Handschuhpaares offenbar den Bereich der klassischen Physik nicht verlassen haben. Die Eigenschaft eines Handschuhs, ein rechter Handschuh zu sein, ist eine innere Eigenschaft, die die ganze Zeit über festliegt. Sie bleibt während unserer Ermittlung, um welchen Handschuh es sich handelt, unverändert. Sie hängt insbesondere auch nicht davon ab, ob der zweite Handschuh ein linker Handschuh ist oder fälschlicherweise ebenfalls ein rechter Handschuh. Wieder handelt es sich um selbstverständliche Eigenschaften klassischer Objekte, wie wir sie aus der Alltagsphysik kennen. Wir haben sie wiederum nur aufgeführt, um später deutlich machen zu können, welche Strukturen sich im Quantenbereich in ganz analoger Weise wieder finden und was neu und überraschend ist, wenn man zusammengesetzte Quantensysteme untersucht.

Messung an isolierten einzelnen Quantensystemen

Im Quantenbereich taucht eine neue Form von Ganzheit auf. Teilweise ähnelt sie dem, was wir bei den Handschuhen gesehen haben und wird durch Korrelationen beschrieben, andererseits geht sie darüber hinaus, weil die Realität der Quantenobjekte nicht mit der Realität von Handschuhen übereinstimmt. Ein wesentlicher Grund ist der, dass die inneren Eigenschaften den klassischen Objekten zum einen fortdauernd zugeschrieben werden können, und zum anderen ohne Abänderung in einer Messung festgestellt werden können. Beides ändert sich in der Quantenwelt.

Wir haben auch hier Einzelsysteme wie das einzelne Photon, das einzelne Elektron, das einzelne Atom usw. Wir werden Photonen untersuchen. Wie stellt man fest, dass eine Anlage einzelne Photonen produziert? Dazu baut man

einen Schirm auf und beobachtet bei geeigneter Einstellung der Anlage, dass immer einzelne Blitze auf dem lichtempfindlichen Schirm aufleuchten. Bei dieser Einstellung der Anlage wird man sagen, dass sie in wohlbestimmten größeren Abständen ein einzelnes Photon erzeugt. Entsprechende Anordnungen gibt es für Atome. Man kann einzelne Atome statt sie zu registrieren auch in einer Falle einfangen und dort speichern. Es macht also Sinn, von einzelnen Quantenobjekten zu sprechen. Wir haben daher im Quantenbereich Teile, aus denen wir etwas zusammensetzen können. Die Physik dieser Teile wollen wir zunächst anschauen, bevor wir wieder zu Gesamtheiten übergehen.

Bereits diese Teile haben, verglichen mit dem, was wir von der klassischen Physik her gewohnt sind, neue Eigenschaften und Verhaltensweisen. Wir betrachten speziell als einzelnes Quantenobjekt ein linear polarisiertes Photon. Zunächst: Was ist ein Photon? Wenn man bei Licht bzw. bei elektromagnetischen Feldern allgemein „genauer hinschaut“, dann stellt man fest, dass aus diesen Feldern Energie und auch Impuls nur in „Paketen“ entnommen werden kann. Es gibt eine kleinste Menge, in der Energie abgegeben werden kann, geringere Mengen sind nicht möglich. Weiterhin kann Energie nur aufgenommen werden, wenn diese Energiemenge oder ein Vielfaches davon zur Verfügung steht. In diesem Sinne sind Energie und auch Impuls gequantelt. Man spricht daher davon, dass ein oder zwei oder drei usw. Photonen aus dem elektromagnetischen Feld entnommen wurden oder in das Feld eingespeist wurden. Diese Energiepakete sind außerordentlich klein gemessen an den Energiemengen, die wir aus der Alltagsphysik kennen. Daher haben wir bei der Aufnahme und Abgabe von elektromagnetischer Energie den Eindruck, dass sie quasi kontinuierlich erfolgt. Es gibt also eine gewisse Berechtigung, auch bei Photonen von kleinen „Teilchen“ zu sprechen. Dabei darf man aber nicht vergessen, dass Photonen keine Massen haben. Sie beschreiben nur den Austausch von Energie und Impuls.

Das elektromagnetische Feld kann in einer speziellen Richtung schwingen. Da es sich gleichzeitig in einer Richtung ausbreitet, liegt über diesen beiden Richtungen eine Schwingungsebene fest.² Man sagt dann, das Licht sei linear polarisiert. Auch die Photonen, die dieses Lichtfeld aufbauen, haben die entsprechende lineare Polarisierung. Wir ordnen ihnen daher neben der Ausbreitungsrichtung, also der Richtung, in der sie fliegen, noch eine Polarisationsrichtung zu. Es gibt Analysatoren, die feststellen können, in welcher Richtung das Licht polarisiert ist. Ein solcher Analysator ist schematisch in *Abbildung 1* dargestellt. Wenn Photonen mit der Polarisationsrichtung \underline{a} auf den Analysator treffen, dann lässt er sie mit dieser Polarisationsrichtung weiterfliegen. Wenn Photonen mit einer Polarisierung in der dazu senkrechten Richtung $\perp \underline{a}$ auftreffen, so werden sie ebenfalls mit unveränderter Polarisationsrichtung durchgelassen. Hinter dem Analysator stellen wir uns einen Detektor vor, der auf Photonen der Polarisierung \underline{a} und der Polarisierung $\perp \underline{a}$ getrennt anspricht und anzeigt, welche Polarisierung jeweils vorgelegen hat.

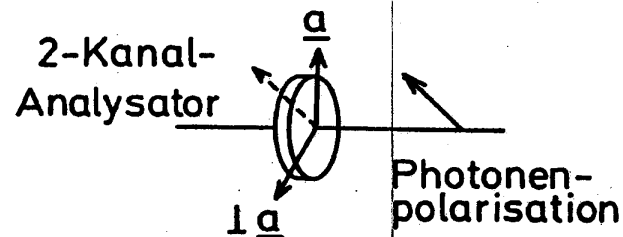


Abb. 1: Linear polarisiertes Licht läuft auf einen 2-Kanal-Analysator mit den Analyserichtungen \underline{a} und $\perp \underline{a}$ zu

Man könnte versuchen, sich im Rahmen der klassischen Physik etwas Ähnliches vorzustellen. Dann würde man an einen Analysator denken, der einen Schlitz hat in Richtung von \underline{a} und einen anderen von $\perp \underline{a}$. Wenn nun kleine Stäbe

auf ihn zufliegen, werden nur die mit der Orientierung \underline{a} bzw. $\perp \underline{a}$ durchgelassen. Dahinter gibt es ein Messgerät, das feststellt welche der beiden Orientierungen bei den durchgelassenen Stäben vorliegt. Aber Photonen sind keine klassischen Objekte. Sie verhalten sich anders als kleine Stäbe und daher machen wir im entsprechenden Experiment auch noch ganz andere Beobachtungen.

Wir hatten gesehen: Wenn bei Photonen die Polarisierung \underline{a} vorliegt, dann spricht nur der dazugehörige Detektor an. Bei einer Polarisierung $\perp \underline{a}$ entsprechend. Bei Photonen tritt aber zusätzlich ein weiteres Phänomen auf, das es für Stäbe und Schlitze nicht gibt. Wenn das Photon weder die Polarisierung \underline{a} noch die Polarisierung $\perp \underline{a}$ hat, wenn also eine Richtung schräg dazu vorliegt, wie sie in *Abbildung 1* gestrichelt eingezeichnet ist, dann wird das Photon trotzdem hinter der Anlage beobachtet. Es spricht dann mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit der Detektor zur Richtung \underline{a} und mit einer anderen Wahrscheinlichkeit der Detektor zu $\perp \underline{a}$ an. Einer der beiden Detektoren reagiert aber auf jeden Fall. Bei vielen Photonen hintereinander klickt unregelmäßig manchmal der eine Detektor und manchmal der andere. Wesentlich ist, dass gemäß der Anfangspolarisation das Klicken der Detektoren mit einer wohlbestimmten Wahrscheinlichkeit stattfindet. Das kann zum Beispiel bedeuten, dass in 40 % der Fälle die Richtung \underline{a} anspricht und in 60 % der Fälle die Richtung $\perp \underline{a}$. Die Wahrscheinlichkeiten wären dann $2/5$ bzw. $3/5$.

Im Einzelnen wird die Situation durch die *Abbildung 2* beschrieben. Der Polarisationsvektor, dem wir die Länge Eins geben, liegt wieder schräg. Dann gibt das Quadrat der Länge der Projektion des Vektors auf eine Richtung direkt die Wahrscheinlichkeit an, dass der entsprechende Detektor anspricht. Für den in *Abbildung 2* eingezeichneten Polarisationsvektor wird der Detektor hinter \underline{a} sehr viel häufiger ansprechen als der hinter $\perp \underline{a}$. Wir stellen also fest, das Photon hatte vor der Messung weder die Polarisierung \underline{a} noch die

² Vgl. auch die Darstellung in AUDRETSCH/MAINZER (1996).

Polarisation $\perp \underline{a}$. Hinterher hat es aber mit Sicherheit entweder die Polarisation \underline{a} oder die Polarisation $\perp \underline{a}$. Dass das tatsächlich so ist, kann man bestätigen, indem man einen zweiten Analysator mit gleicher Orientierung aufbaut und noch einmal dieselbe Messung an dem Photon durchführt, das bereits durch den ersten Analysator z. B. mit der Polarisation \underline{a} hindurchgetreten ist. Wenn man in diesem Fall danach noch einmal misst, klickt mit Sicherheit der Detektor zu \underline{a} . Die erste Messung hat also präparierend gewirkt. Daraus sieht man, dass die quantenmechanische Messung in der Regel den Zustand des Quantenobjektes abändert. Der Zustand des Quantenobjektes ist nach der Messung ein anderer als vorher. Im Allgemeinen entstehen Eigenschaften des Quantensystems – in unserem Fall die Eigenschaft, entweder in der Richtung \underline{a} oder $\perp \underline{a}$ polarisiert zu sein – überhaupt erst in der Messung.

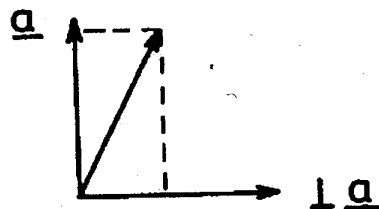


Abb. 2: Zerlegung des Vektors der linearen Polarisation

Weder-Noch-Objekt

Ebenso hat ein Atom im Allgemeinen weder einen Ort noch einen Impuls. Erst als Ergebnis einer Ortsmessung hat es einen Ort und ist also mit Sicherheit an dem Ort zu finden, den das Messergebnis angibt. Wenn man sofort wieder eine Ortsmessung macht, wird man mit Sicherheit das Teilchen wieder dort finden. Aber es verliert in der Ortsmessung die Eigenschaft, einen Impuls zu haben. Umgekehrt verliert es die Eigenschaft Ort nach einer Impulsmessung. Anders als

bei klassischen Objekten werden die meisten Eigenschaften von Quantenobjekten erst in der Messung produziert. Wenn man nach der Messung auf die Quantenobjekte einwirkt, gehen diese Eigenschaften auch wieder verloren. Etwas überspitzt könnte man sagen: Quantenobjekte sind vor einer Messung Objekte ohne Eigenschaften. Das stimmt nicht ganz, denn mindestens eine Eigenschaft müssen sie haben, denn man muss ja immer noch sagen können, dass sich im Apparat das eine Photon befindet. Diese Existenzeigenschaft geht nicht verloren. Aber Eigenschaften wie „hat einen bestimmten Ort“, „hat eine bestimmte Polarisation“ usw. können verloren gehen.

Wir wollen versuchen, diese uns von der klassischen Physik her ganz ungewohnte Besonderheit der Quantenobjekte zu veranschaulichen. Die quantenmechanischen Objekte sind zumeist in einem Zustand, indem sie „Weder-Noch-Objekte“ sind. Sie haben im Allgemeinen z. B. weder einen Ort noch einen Impuls. Die *Abbildung 3* zeigt ein solches Weder-Noch-Objekt. Es hat nämlich weder die Form von zwei Kästen noch die Form von drei Röhren. Wenn man aber richtig hinguckt und z. B. nur das obere Ende betrachtet, dann besteht das Objekt aus drei Röhren. Entsprechend sind es zwei Kästen, wenn man nur das untere Ende betrachtet. Das abgebildete Objekt ist ein Versuch, die quantenmechanischen Verhältnisse klassisch darzustellen. Und wie man klar sieht, misslingt dieser Versuch. Quantenobjekte sind anders.

Verschränkte Quantensysteme

Wir kommen nun zu Systemen in der Quantenwelt, die einen ganzheitlichen Charakter haben. Es handelt sich um die so genannten verschränkten Quantensysteme. Dieser Begriff wurde vor etwa 70 Jahren von Erwin SCHRÖDINGER eingeführt, hat aber lange Zeit in der Forschung keine große

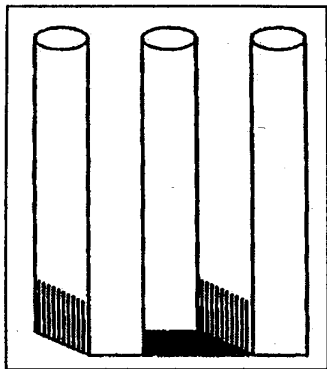


Abb. 3: Ein klassisches Weder-Noch-Objekt.

Rolle gespielt, da es experimentell nicht ganz einfach ist, verschränkte Quantensysteme herzustellen. Wir haben quantenmechanische Einzelsysteme bereits kennen gelernt. Jetzt betrachten wir zwei Einzelsysteme, z. B. zwei Photonen, die in einem einzigen physikalischen Gesamtprozess präpariert wurden. Ganzheitlichkeit erfordert eine spezielle Präparation. Wir wollen das noch einmal besonders herausstellen: Es gibt im Hinblick auf Verschränkung verschiedene Typen von 2-Photonen-Systemen. Wir haben einmal den Fall, dass die beiden Photonen völlig unabhängig voneinander präpariert worden sind. Es gibt dann keine Beziehung zwischen ihnen. Jedes verhält sich so, als ob es das andere Photon gar nicht gäbe. In diesem Fall sind die beiden Photonen nicht verschränkt. Es gibt aber auch in Folge geeigneter Präparation verschränkte Photonenpaare, bei denen man nicht sagen kann, dass jedes Photon sich in einem eigenen ihm zugeordneten Zustand befindet. Vielmehr befinden sich beide Photonen in einem gemeinsamen 2-Photonen-Zustand. Die Photonen haben ein Ganzes gebildet und wir werden gleich sehen, worin sich diese Ganzheit äußert. Der 2-Photonen-Zustand ist in diesem Fall dem Gesamtsystem zugeordnet. Die beiden Untersysteme befinden sich also nicht unabhängig voneinander jeweils in einem eigenen Zustand. Die Untersysteme haben auch keine voneinander unabhängigen Eigenschaften mehr. Auch das werden wir gleich zeigen.

Wir verwenden den in *Abbildung 4* dargestellten experimentellen Aufbau. Eine speziell konstruierte Quelle erzeugt Photonenpaare, die sich jeweils in demselben verschränkten Gesamtzustand befinden. Ein Photon eines solchen Paares fliegt nach links (Photon I), das Partnerphoton (Photon II) fliegt nach rechts. Sie treffen jeweils auf einen Analysator. Die Analysatoren sind parallel ausgerichtet. Wir messen die Polarisierungen der einzelnen Photonen und vergleichen die Messwerte. Dabei stellen wir fest, dass die Situation des linken Photons nicht unabhängig ist von der des rechten Photons. Wir wollen aber zunächst nur die Photonen betrachten, die nach links fliegen und den jeweiligen Partner nicht beachten. Dann stellen wir wieder mit einer gewissen Häufigkeit die Polarisation \underline{a} und mit einer entsprechenden Häufigkeit die Polarisation $\perp \underline{a}$ fest. Ein nach links fliegendes Photon aus einem Paar verschränkter Photonen befindet sich erst vor der Messung weder im Zustand \underline{a} noch im Zustand $\perp \underline{a}$. Die Messung überführt es in den Zustand mit der Polarisation \underline{a} oder $\perp \underline{a}$. Am Photon II führen wir ebenfalls Polarisationsmessungen durch und registrieren auch hier die Ergebnisse. Wieder soll es sich dabei um die Polarisationsrichtungen \underline{a} und $\perp \underline{a}$ handeln. Wir wiederholen dann das Experiment sehr oft mit vielen Paaren verschränkter Photonen und vergleichen die Ergebnisse der Messungen an den jeweiligen Partnern eines Paares. Dabei stellen wir Folgendes fest: Immer wenn das Photon I durch die Messung in den Zustand \underline{a} überführt wurde, was wir am entsprechenden Messwert ablesen können, dann finden wir mit Sicherheit beim Photon II ebenfalls die Polarisationsrichtung \underline{a} vor. Das heißt, ausschließlich der dazugehörige Detektor spricht an und nie der zu $\perp \underline{a}$ gehörige Detektor. Wird umgekehrt das Photon I in den Polarisationszustand $\perp \underline{a}$ überführt, dann registrieren wir am Photon II ohne Ausnahme ebenfalls die Polarisation $\perp \underline{a}$. Wenn wir uns also die Messergebnisse an den Paaren anschauen, dann finden wir immer nur die Kombination $(\underline{a}, \underline{a})$ oder die Kombination $(\perp \underline{a}, \perp \underline{a})$. Es liegt also eine 100 %-ige Korrelation der Messergebnisse vor.

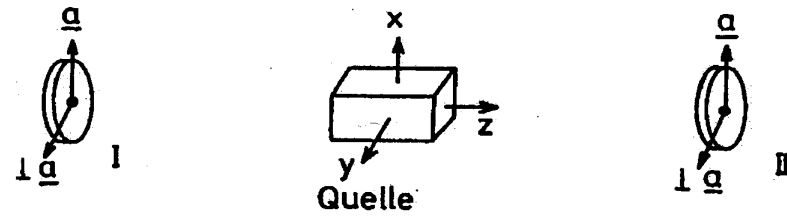


Abb. 4: Polarisationsmessungen an 2-Photonen-Zuständen mit parallel ausgerichteten Analysatoren I und II

Wie kann man die bisherigen experimentellen Erfahrungen auf der Grundlage dessen verstehen, was wir über die quantenmechanische Messung gesagt haben? Die 100 %-ige Korrelation ermöglicht eine sichere Prognose. Wenn am Photon I die Polarisation \underline{a} gemessen wird, dann wird man mit Sicherheit am Photon II ebenfalls die Polarisation \underline{a} messen. Wenn aber eine solche sichere Vorhersage getroffen werden kann, dann muss sich das Photon II bereits vor dem Auftreffen auf den Analysator im Zustand der Polarisation \underline{a} befunden haben, wenn wir einmal annehmen, dass die Messung am Photon I zuerst erfolgte. Das erzwingt eine weitreichende Aussage: Die Messung am Photon I hat nicht nur dieses Photon in den Polarisationszustand \underline{a} versetzt, sondern auch damit zugleich das sich an einem ganz anderen Ort befindende Photon II, und dieses Photon ist in diesem Zustand auf den Analysator zugeflogen. Die entsprechende Aussage gilt, wenn die Messung am Photon I auf die Polarisation $\perp \underline{a}$ geführt hat.

Wenn wir für diese spezielle experimentelle Anordnung (vgl. Abb. 4) nur die Messergebnisse und ihre Korrelation betrachten, finden wir offenbar eine ganz ähnliche Situation vor wie bei den Handschuhpaaren. Wenn man an einem Ort den linken Handschuh findet, dann wird man sicher an dem anderen Ort den rechten Handschuh finden. Es liegt dennoch bei den verschränkten Quantenobjekten eine andere Form von Ganzheit vor. Der Unterschied zu den Handschuhpaaren besteht darin, dass die Handschuhe die Eigenschaft, ein rechter Handschuh oder ein linker Handschuh zu sein, schon die ganze Zeit vor der Messung hatten und dass

diese Eigenschaft in der Messung auch nicht abgeändert wird. Hingegen erwirbt das eine Photon die Polarisation \underline{a} erst dadurch, dass das andere die Polarisation \underline{a} erwirbt. Wir haben eine Relationalität von in der Messung erst erzeugten Eigenschaften statt einer Relationalität vorgefundener Eigenschaften. Wenn man versuchen würde, sich das für klassische Objekte vorzustellen, dann bestünde ein vergleichbarer Vorgang darin, dass an zwei Orten Leder deponiert wird, dann an einem Ort ein linker Handschuh genäht wird und dass dadurch das Leder am anderen Ort in einen rechten Handschuh übergeht. Das ist klassisch unmöglich. Möglich ist nur, dass die Handschuhe von vorne herein als ein linker und als ein rechter Handschuh fabriziert werden und dann als Gesamtheit zu einem wohl bestimmten Handschuhpaar zusammengeführt werden.

Die verschränkten Quantenobjekte bilden offenbar eine Gesamtheit mit ganz neuen Qualitäten. Sie hat allerdings einen wichtigen Punkt mit den Handschuhpaaren gemeinsam. Die Ganzheit zeigt sich ohne jeden Austausch von Wechselwirkungen. Es wird keine Information über das Messergebnis am Photon I, in welcher Weise auch immer, über eine Wechselwirkung an das Photon II übermittelt. Wir können die Messungen an den beiden Photonen auch gleichzeitig durchführen. Selbstverständlich kann man ebenso zuerst am Photon II messen, dann übertragen sich alle bisher gemachten Aussagen. Wir müssen nur die Nummerierung I mit II vertauschen. Von der Theorie her gibt es keine Einschränkungen an den Abstand der beiden Messgeräte. Tatsächlich sind Messungen durchgeführt worden, bei denen die beiden Analysatoren an den gegenüberliegenden Ufern des Genfer Sees standen. In diesem Fall hatte also das verschränkte Quantensystem räumlich die entsprechenden Ausmaße.

Wir versuchen wieder, das typisch Quantenmechanische in einem analogen aber klassisch unmöglichen Vorgang zu veranschaulichen. Dazu kann der NECKERSCHE Würfel dienen (vgl. Abb. 5). Zwei Ecken des Würfels sind durch Krei-

se gekennzeichnet. Man kann bei der Betrachtung des NECKERSCHEN Würfels das Bild „springen“ lassen. Einmal ist es ein Würfel, bei dem man die Unterfläche sieht, dann sind die beiden Kreise hinten. Man kann aber auch erreichen, dass man die obere Fläche des Würfels sieht, dann sind die eingekreisten Ecken vorne. Vor unserer Betrachtung sind die eingekreisten Ecken weder vorne noch hinten. Erst durch unsere Betrachtung entsteht der eine oder der andere Würfel. Aber immer dann, wenn eine der Ecken springt, springt notwendigerweise auch die Partnerecke. Das stellt eine gewisse Analogie zur Verschränktheit dar.

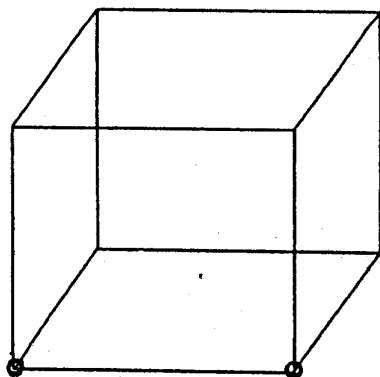


Abb. 5: Der Neckersche Würfel

Es lässt sich noch in einer anderen Weise demonstrieren, dass die quantenmechanische Ganzheit des Zwei-Photonen-Systems sich von der klassischen Ganzheit des Handschuhpaares deutlich unterscheidet. Wir hatten schon betont, dass eine Messung an einem Quantensystem einen Eingriff darstellt und den Zustand abändert. Wenn wir also die Eigenarten der quantenmechanischen Ganzheit besonders stark herausstellen wollen, werden wir bei den Messapparaten ansetzen. Bei sonst gleichem Aufbau wie oben verdrehen wir dazu die Analysatoren gegeneinander (vgl. Abb. 6) und wiederholen die Experimente mit vielen gleich präparierten verschränkten Photonenteams.

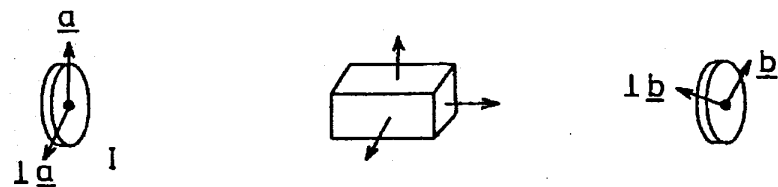


Abb. 6: Polarisationsmessungen an 2-Photonen-Zuständen mit gegeneinander gedrehten Analysatoren I und II

Wir übertragen das Erklärungsschema, das wir oben schon einmal erfolgreich benutzt haben, auf die neue Situation und wagen eine Prognose: Wenn das Photon I auf den Analysator trifft und z. B. durch die Messung in einen Zustand mit einer Polarisation \underline{a} übergeht, dann haben wir gesagt, dass auch das Photon II, das noch auf seinen Analysator zufliegen soll, augenblicklich ebenfalls in den Polarisationszustand \underline{a} übergeht. Es läuft jetzt aber auf einen verdrehten Analysator zu, der die Richtungen \underline{b} und $\perp \underline{b}$ hat. Auch diese Situation haben wir schon kennen gelernt. Es wird in diesem Fall mit gewissen Wahrscheinlichkeiten einmal der Analysator \underline{b} und ein anderes Mal der Analysator $\perp \underline{b}$ ansprechen. Die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten ergeben sich aus dem Drehwinkel Θ (vgl. Abb. 7). Sie sind wiedergegeben durch die Quadrate der Projektionen des Vektors \underline{a} mit der Länge eins auf die Richtungen \underline{b} bzw. $\perp \underline{b}$.

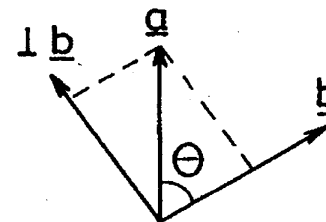


Abb. 7: Polarisations- und Analyserichtungen beim 2-Photonen-Experiment

Wir wiederholen dieses Experiment sehr oft und prüfen nach, ob die jeweiligen relativen Häufigkeiten des Anspre-

chens unsere behaupteten Wahrscheinlichkeiten wiedergeben. Das ist tatsächlich der Fall. Wiederum kann die Anlage auch so aufgebaut sein, dass die Messung zuerst am Photon II erfolgt, dann wird das Photon II zum Beispiel in den Polarisationszustand \underline{b} versetzt. Es läuft dann auf den dagegen gedrehten Analysator mit den Richtungen \underline{a} und $\perp \underline{a}$ zu. Wir führen unsere Prognose wieder nach dem gewohnten Schema durch, und erneut wird sie durch das Experiment bestätigt. Es kommt tatsächlich auch in diesem Fall nur auf die Korrelationen der Messergebnisse am Photon I und Photon II an. Die Messungen können auch gleichzeitig erfolgen. Die instantane Änderung des Partnerphotons geschieht ohne jede Wechselwirkung. Es wird kein Signal ausgetauscht. Dieses Signal müsste ja auch mit Überlichtgeschwindigkeit propagieren und gemäß der Speziellen Relativitätstheorie gibt es solche Signale nicht.

Wir erwähnen schließlich noch, dass die Verschränkung ein zentrales neues technisches Hilfsmittel ist. Sie spielt eine Schlüsselrolle beim Bau von Quantencomputern und in der Quanten-Informationstheorie, die u. a. die Quanten-Kryptographie als Teilgebiet enthält. Hier befasst man sich mit der abhörsicheren Übertragung von Botschaften mit Hilfe von verschränkten Quantensystemen.³

Wie erzeugt man verschränkte Zustände? Wir können hier nicht in die technischen Details von experimentellen Aufbauten gehen. Nur so viel sei gesagt: Wechselwirkung zwischen einzelnen unverschränkten Quantensystemen überführen im Allgemeinen im Laufe der dynamischen Entwicklung in ein verschränktes Gesamtsystem. Diejenigen Wechselwirkungen, die es nicht tun, sind ein besonderer Spezialfall. Verschränkung ist daher für Quantensysteme das „Normale“. Man kann also mit einem gewissen

³ Ein Überblick über die aktuelle Forschung im Zusammenhang mit verschränkten Quantensystemen findet sich in AUDRETSCH (2002).

Recht sagen, dass die Quantenwelt überwiegend holistisch strukturiert ist. Verglichen damit ist die Welt im Anwendungsbereich der klassischen Physik nur in einem sehr viel schwächeren Sinne in gewissen Situationen ganzheitlich organisiert. Verglichen mit dem Photonenpaar ist es eher ein recht formaler begrifflicher Zugang, wenn man ein Handschuhpaar als eine Gesamtheit ansieht. Es ist ein offenes Problem, und wird entsprechend als ein aktuelles Forschungsprogramm an vielen Orten verfolgt, warum die klassischen Objekte wie z. B. Handschuhe keine Verschränktheit zeigen können, obwohl ja Handschuhe aus Atomen und Moleküle aufgebaut sind.

Wir fassen zusammen: Wenn quantenmechanische „Teile“ in einem verschränkten Zustand zusammengefügt werden, dann bilden sie ein „Ganzes“, das in ganz besonderer Weise mehr ist als die „Summe seiner Teile“.

Literatur

- AUDRETSCH, Jürgen/MAINZER, Klaus (Hg, 1996): *Wie viele Leben hat Schrödingers Katze*, Heidelberg.
- ESFELD, Michael (2002): *Holismus in der Philosophie des Geistes und in der Philosophie der Physik*, Frankfurt a. M.
- AUDRETSCH, Jürgen (Hg., 2002): *Verschränkte Welt – Faszination der Quanten*, Weinheim.