

Jürgen Audretsch

„Wenn wir aus atomaren Erscheinungen auf Gesetzmäßigkeiten schließen wollen, so stellt sich heraus, dass wir nicht mehr objektive Vorgänge in Raum und Zeit gesetzmäßig verknüpfen können, sondern [nur] Beobachtungssituationen. Die mathematischen Symbole, mit denen wir [...] Beobachtungssituation[en] beschrieben, stellen eher das Mögliche, als das Faktische dar. In der Regel [...] [erlauben] sie nur Schlüsse auf die Wahrscheinlichkeit eines zukünftigen Ereignisses.“<sup>1</sup>

Das Mögliche ist das Realisierbare, aber noch nicht Realisierte. Wie kann das Mögliche trotzdem wirklich sein? Fasst man das Mögliche als das auf, was sein könnte, aber noch nicht ist, dann ist die Frage negativ beantwortet. Trotzdem können in den Ängsten eines Menschen Möglichkeiten zur bedrückenden Wirklichkeit werden. Menschen leben in der Gegenwart und der präsenten Vergangenheit sowie der möglichen Zukunft. Freien Willen gibt es nur in Bezug auf Möglichkeiten.

Wir wollen uns im Folgenden nur am Rande auf die Rolle des Möglichen im existentiellen menschlichen Bereich beziehen. Es geht also weder zentral darum, was der Mensch sich antizipierend vorstellen kann, noch was im Menschen angelegt ist und hervorgerufen werden kann. Wir diskutieren keine Aussagen wie z. B. die, dass der Mensch durch das charakterisiert ist, was ihm möglich ist.

Wir beziehen uns in erster Linie auf das Mögliche und Wirkliche im „Materiellen“, auf das der Mensch allerdings entscheidenden Einfluss hat. Eingriffe, also Handlungen, werden für

uns auch in der Physik von zentraler Bedeutung sein. Gibt es in der Physik eine Wirklichkeit des Möglichen? Wie so oft, so wird auch bei dieser Problemstellung allgemein vermutet, dass die über die klassische Physik hinausgehende Quantenphysik einen neuen Zugang zur Beantwortung der Frage eröffnet. Ist das so? Wir wollen das Verhältnis von Wirklichkeit und Möglichkeit in der klassischen Physik dem Verhältnis im Bereich der Quantenphysik gegenüberstellen. Der Quantenbereich ist dadurch definiert, dass er gerade nicht mit Bezug auf die Theorie der klassischen Physik erklärt werden kann. Eigenschaften werden eine wichtige Rolle spielen.

Hierzu eine einfache Vorbemerkung: Man muss unterscheiden zwischen einer Eigenschaft eines Objekts, z. B. der „eine Temperatur zu haben“, und dem Wert der Eigenschaft, z. B. 21 Grad Celsius. Gibt es Eigenschaften ohne Werte? Formal nicht. Dass eine Blume schön ist, scheint eine Eigenschaft ohne Eigenschaftswert zu sein. Tatsächlich kann man z. B. durch Hinzunahme der Negation „nicht schön“ sofort die Eigenschaft „schön oder nicht schön“ zu sein konstruieren, die bei der Blume den speziellen Wert „schön“ hat.

## Klassische Physik

Wir betrachten zunächst die klassische Physik. Ein Keramiker kann einem Tonklumpen in einem Akt freien Willens die Gestalt eines Würfels, einer Kugel oder eine andere Gestalt geben. Die Eigenschaft eine Gestalt zu haben, hatte der Ton aber bereits vor diesem menschlichen Eingriff. Nur der „Wert“ der Eigenschaft wird geändert. Der Töpfer kann Kugel oder Würfel anschließend noch dem Eingriff durch den Regen aussetzen mit dem Erfolg, dass sich auch so die Gestalt des Tons ändert. Selbstverständlich kann der Töpfer auch alle diese Prozesse durch Betrachten gewissermaßen messend verfolgen. Diese Messung hat keinen Einfluss auf das Geschehen. Es

<sup>1</sup> WEINER HEISENBERG, Der Teil und das Ganze, 1969.

ist typisch für die klassische Physik, dass solche Messungen durchführbar sind.

Wenn wir eine Kugel hochheben und fallen lassen, dann wird sie sich auf einer geraden Linie beschleunigt abwärts bewegen. Die Gesetze der Gravitationstheorie spezifizieren unendlich viele wohlbestimmte Bahnen, auf denen die Kugel fliegen könnte. Das sind Möglichkeiten in Form möglicher Prozesse. Die vom Beobachter gewählte spezielle Präparation stellt eine von ihm durch einen Eingriff gesetzte Anfangsbedingung dar. Sie bestimmt die anschließend realisierte räumliche Bahn und zu jeder Zeit die Fluggeschwindigkeit. Das physikalische Gesetz für die „Bewegung einer Kugel im Gravitationsfeld“ legt in unserem Beispiel die möglichen Prozesse fest.

Wichtig ist die folgende erkenntnistheoretische Einsicht: Was physikalisch wirklich ist, bestimmt die verwendete Theorie zusammen mit Art und Umfang ihrer physikalischen Interpretation. Referenten von Erfahrungstermen wie Längen, Zeiten und Geschwindigkeiten sind wirklich. Auch theoretischen Termen wie z. B. dem Gravitationsfeld können – wenn man das denn will – Referenten zugesprochen werden. Sie gehören dann zu einer durch die Theorie erschlossenen Wirklichkeit. Nach allgemeiner Auffassung schreibt man aber physikalischen Gesetzen selber eine solche Wirklichkeit nicht zu. Es gibt für sie keinen Referenten in der Wirklichkeit. Die in den Gesetzen zusammengefassten Möglichkeiten sind daher nicht Teil der Wirklichkeit.

Dem gegenüber sind der Radius der Kugel, ihre Farbe, der Ort an dem sie sich gerade befindet, ihre Geschwindigkeit usw. Eigenschaften, die zu jeder Zeit real vorliegen. Sie haben einen Wert, der vor der Messung vorliegt und sich ohne abändernden Eingriff bestimmen lässt. Die Wirklichkeit bleibt dabei unverändert. Die anfängliche Präparation der Kugel durch Loslassen beruht auf dem freien Willen des Beobachters. Er hätte eine andere Bahn im Gravitationsfeld wählen können. Die verschiedenen Lösungen der Differentialgleichung sind

ihm im Prinzip bekannt. Für ihn sind die Möglichkeiten real. Allerdings handelt es sich beim Experimentator nicht um einen Teil der Physik. Er steht der physikalisch beschriebenen Natur, in diesem Fall der Gravitation, als Eingreifender gegenüber und legt die Art der Präparation und das was gemessen werden soll fest. In der Quantenphysik spielt der Experimentator insbesondere deshalb eine noch größere Rolle, weil auch die Messung selber einen abändernden Einfluss hat.

### Quantenphysik

Wir beschreiben zunächst was man in grundlegenden Experimenten mit einzelnen Photonen beobachten kann. Wir haben auf einem Tisch mehrere Apparate aufgebaut. Links in *Abbildung 1* steht eine Ein-Photon-Quelle. Wenn man den Knopf drückt, wird genau ein Photon emittiert und dabei zugleich so präpariert, dass es vertikal (V) polarisiert ist. Woher wissen wir, dass es vertikal polarisiert ist? Das nachfolgende rechte Messgerät in *Abbildung 1* kann zwei Messwerte durch Blinken von Lampen anzeigen: den Messwert H oder den Messwert V. Es ist ein H-V-Messgerät. Der Messwert H heißt horizontal und der Messwert V heißt vertikal. Wir wiederholen das Experiment sehr häufig mit jeweils einem neuen Photon und stellen fest, dass ohne Ausnahme der Messwert V angezeigt wird. Das berechtigt dazu, den präparierten Photonen die Eigenschaft V zuzusprechen. Die Ein-Photon-Quelle präpariert vertikal polarisierte Photonen.

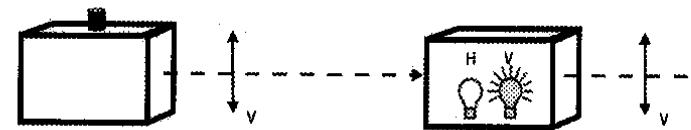
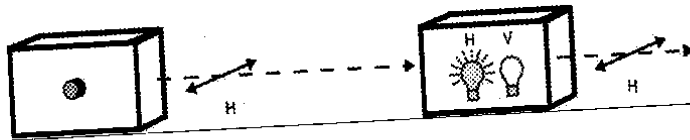


Abb. 1: Eine Ein-Photon-Quelle präpariert ein Photon mit vertikaler Polarisation V. Mit einem Horizontal-Vertikal-Messgerät wird die Polarisation gemessen und der Messwert angezeigt.

Wir beginnen danach eine neue Serie von Präparationen mit nachfolgenden Messungen, die aber mit einem Präparationsgerät durchgeführt werden, das um  $90^\circ$  gedreht ist (vgl. *Abb. 2*). Wieder werden einzelne Photonen erzeugt und mit demselben Messgerät gemessen. In diesem Fall leuchtet ohne Ausnahme die linke Lampe auf. Wir können von den einzelnen Photonen sagen, dass sie in der Quelle ein Präparationsverfahren für horizontale Polarisation durchlaufen haben. Das Messgerät ist also tatsächlich ein Gerät, das die Eigenschaft misst, horizontal oder vertikal polarisiert zu sein (H-V-Messgerät). Die möglichen Werte dieser Eigenschaft sind „horizontal“ beziehungsweise „vertikal“.

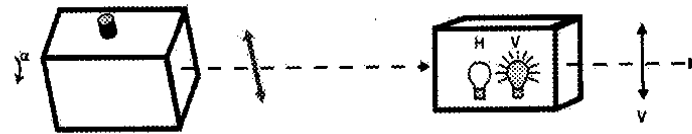


*Abb. 2:* Die Ein-Photon-Quelle ist um  $90^\circ$  gedreht.

Wir gehen einen Schritt weiter und lassen zu, dass das Messgerät das Photon auch wieder austreten lässt. In *Abbildung 1* und *Abbildung 2* ist das bereits eingezeichnet. Es ist eine weitere Eigenschaft des H-V-Messgeräts, dass das austretende Photon je nach Messergebnis horizontal oder vertikal polarisiert ist. Das wiederum kann man einfach feststellen, indem man dieses Photon in ein weiteres H-V-Messgerät einlaufen lässt und die Messung wiederholt. Ergänzt man die Messung noch um eine Selektion, indem man nur mit Photonen weiterarbeitet, die z. B. zu dem Messwert V gehören, dann hat sich ein Präparationsverfahren für die vertikale Polarisation ergeben.

Die Besonderheiten der Quantenphysik zeigen sich, wenn man das Präpariergerät um einen Winkel  $\alpha$  dreht (vgl. *Abb. 3*). Jetzt präpariert es das einzelne Photon offenbar mit einer um den Winkel  $\alpha$  gegen die Vertikale gedrehten Polarisation. Wir messen an vielen Einzelphotonen wieder mit dem unveränderten

H-V-Messgerät. Als Ergebnis zeigt sich, dass unregelmäßig mal der Messwert H und mal der Messwert V angezeigt werden. Es ist Zufall, welcher Wert im Einzelfall angezeigt wird. Eine Gesetzmäßigkeit und damit eine Prognosemöglichkeit ist nicht zu erkennen.



*Abb. 3:* Die Ein-Photon-Quelle ist um den Winkel  $\alpha$  gedreht. Zufällig hat sich der Messwert V ergeben.

Allerdings finden wir für eine andere Größe eine strenge Gesetzmäßigkeit. Wir wiederholen den Versuch in der Anordnung von *Abbildung 3* sehr oft mit vielen Photonen und bestimmen mit welchem Bruchteil der Fälle, also mit welchen relativen Häufigkeiten H bzw. V gemessen wird. Das Ergebnis könnte z. B.  $1/3$  und  $2/3$  lauten. Man sagt dann auch, dass die Ergebnisse H bzw. V mit der Wahrscheinlichkeit  $1/3$  bzw.  $2/3$  eintreten. Die wesentliche Beobachtung ist nun, dass sich bei derselben Anlage in einem zweiten Durchgang mit vielen Photonen genau dieselben relativen Häufigkeiten für H und V ergeben. Sie sind vollständig durch den Versuchsaufbau determiniert. Soweit die Versuche. Wir kommen zur Theorie.

Wie lassen sich die relativen Häufigkeiten berechnen? Das hängt von der Theorie ab, die wir für den Quantenbereich verwenden. In der Standard-Quantentheorie, die allgemein verwendet und gelehrt wird, ist die Berechnung im vorliegenden Fall sehr einfach. Dem Präparationsverfahren mit dem um den Winkel  $\alpha$  gedrehten Gerät ordnen wir mathematisch (wie in *Abb. 4* dargestellt) einen um  $\alpha$  gegen die Vertikalenrichtung V gedrehten Pfeil der Länge eins zu. Er wird (in irreführender Weise) Zustandsvektor genannt. Wir „projizieren“ diesen Pfeil senkrecht (Punkte in *Abb. 4*) auf die Richtungen V bzw. H. Die

Quadrate der Längen dieser Projektionen geben dann die Häufigkeiten des Auftretens des Messergebnisses  $V$  bzw.  $H$  an.

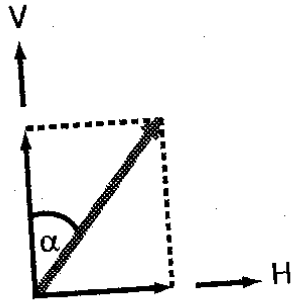


Abb. 4: Die relativen Häufigkeiten der Messwerte „horizontal“ bzw. „vertikal“ ergeben sich nach der Projektionsregel. Der Zustandsvektor (fett) beschreibt das Präparationsverfahren von *Abbildung 3*.

Man kann auch wie in *Abbildung 5* das bisher benutzte Messgerät um einen Winkel  $\beta$  drehen. Das so entstandene neue Messgerät misst eine neue Eigenschaft, nämlich die Eigenschaft des Photons, die „Polarisation  $H^*$  oder  $V^*$ “ zu haben. Es ist also ein anderes Messgerät. Das Präparationsgerät ist in *Abbildung 5* auf die Polarisation  $H$  eingestellt. Es wird nacheinander an vielen Photonen gemessen. Die Ergebnisse  $H^*$  und  $V^*$  treten wieder völlig zufällig auf. In der in *Abbildung 5* dargestellten Situation liegt der Zustandsvektor in  $H$ -Richtung (vergl. *Abb. 6*). Die relativen Häufigkeiten liegen auch in diesem Fall völlig fest. Sie werden in der Standard-Quantentheorie nach der Projektionsregel analog zum Verfahren in *Abbildung 4* als Quadrate der Projektionen von Vektor  $H$  auf die Richtungen  $V^*$  bzw.  $H^*$  berechnet.

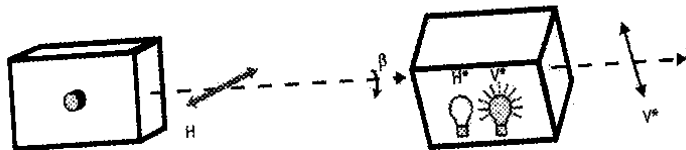


Abb. 5: Das Messgerät ist um den Winkel  $\beta$  gedreht.

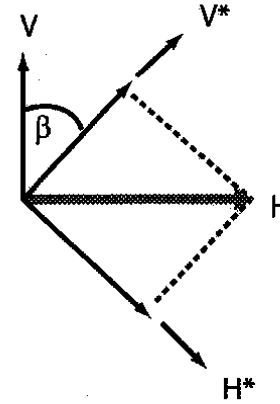


Abb. 6: Projektionsregel angewandt auf das Experiment von *Abbildung 5*.  $H$  ist der Zustandsvektor.

Auch in diesem Fall wird wie im Versuchsaufbau von *Abbildung 4* die anfangs präparierte Polarisation zerstört und das Photon mit einer neuen Eigenschaft, der  $H^*$ - $V^*$ -Eigenschaft, ausgestattet, die im Beispiel den Wert  $V^*$  hat.

### Möglichkeiten

Die Wirklichkeit des Möglichen, was lässt sich dafür am Beispiel der einzelnen Photonen ablesen? Das einfachste Szenario der Quantenphysik, wie wir es oben beschrieben haben, ist aus drei Elementen aufgebaut: dem vom Experimentator ausgewählten Präparationsgerät, dem von ihm ausgewählten Messgerät und dem einzelnen Photon. Die Auswahl des jeweiligen Geräts beruht auf dem freien Willen des Experimentators. Sie realisiert Möglichkeiten, die er hatte. Da wir nach der physikalischen Wirklichkeit fragen, ist es nicht unsere Aufgabe, zu beurteilen, ob diese Möglichkeiten selber gewissermaßen „im Beobachter“ real waren.

Ist möglicherweise der Zustandsvektor das mathematische Objekt, von dem man ausgehen muss, wenn man die ontologische Wirklichkeit der Möglichkeit(en) in der Standard-Quantentheorie aufzeigen will? Wir haben oben betont: Der Referent des Zustandsvektors, also das entsprechende Element in der Wirklichkeit, sind nicht die reinen Möglichkeiten, sondern ist ein Präparationsverfahren. Das wird im Prinzip durch ein spezielles physikalisches Gerät realisiert. Vermutlich hatte Heisenberg in dem Eingangszitat mit dem mathematischen Symbol, das das Mögliche darstellt, den Zustandsvektor gemeint. Dann wäre ihm nicht zuzustimmen.

In der Standard-Quantentheorie gibt es den unhintergehbaren Zufall. Die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Werten einer Eigenschaft charakterisiert die Wechselwirkung zwischen Quantenobjekt und Messgerät und ist dem Einfluss des Experimentators entzogen. Wahrscheinlichkeit als relative Häufigkeit ist nicht dem einzelnen Quantenobjekt zugeordnet, sondern vielen Quantenobjekten. Es steht beim einzelnen Quantenobjekt keine als real annehmbare Wirklichkeit hinter der Möglichkeit des Eintretens eines bestimmten Messwertes.

Welche Messwerte möglich sind, ist durch das Messgerät festgelegt. Mit welcher Eigenschaft (z. B. H-V-Eigenschaft) das Quantenobjekt durch die Wechselwirkung im Messprozess ausgestattet wird, bestimmt das Messgerät (im Beispiel das H-V-Messgerät) und damit der, der es auswählt und zum Einsatz bringt. Das Realwerden der Eigenschaft zusammen mit dem Aufheben der Eigenschaft, die vorher vorgelegen hat, beruht auf dem freien Willen des Experimentators. Welchen Wert diese Eigenschaft im Einzelfall annimmt (z. B. V), liegt aber im Allgemeinen vorher nicht fest, ist also zufällig. Fest liegen nur die relativen Häufigkeiten der Messwerte. Und die hängen davon ab, welches Präparationsverfahren die Quantenobjekte durchlaufen haben. Beschrieben wird das in der Standard-Theorie durch den Zustandsvektor. Das Präparationsverfahren wählt der Experimentator aus.

Wir vergleichen mit der klassischen Physik. Eine analoge Situation liegt bei der auf eine bestimmte Bahn präparierten Kugel vor. Eine Ortsmessung beantwortet die Frage „wo ist die Kugel?“. Wenn man sie zu einem bestimmten Zeitpunkt durchführt, dann liegt das Messergebnis fest. Das ist bei einer Quantenmessung anders. Wenn der Experimentator das H-V-Messgerät auswählt, dann sind die möglichen Messwerte H oder V. Beim einzelnen Photon ist dann aber bei gegebenem Präparationsverfahren (vergl. *Abb. 3*) noch völlig offen, welcher der beiden Messwerte angezeigt wird und welche der beiden Eigenschaften (H oder V) das Photon nach der Messung haben wird. Da der einzelne Messprozess gemäß der Beschreibung in der Standard-Quantentheorie nicht determiniert abläuft, bleiben Möglichkeiten. Auch bei abgeänderter Präparation bleiben für den Ausgang des Messprozesses beide Möglichkeiten. Nur die relativen Häufigkeiten für die Ergebnisse der Messungen an vielen gleich präparierten Photonen liegen fest. Wenn man also die Frage nach der Wirklichkeit des Möglichen in der Quantenphysik beantworten will, dann muss man auf das Messgerät und nicht auf den Zustandsvektor zeigen. Das ist unser Ergebnis.

Allerdings ist dies eine wenig befriedigende Antwort, weil in der Standard-Quantentheorie gerade der Messprozess nur mit seinen Ergebnissen postuliert, aber nicht im dynamischen Ablauf im Detail beschrieben wird. Wir machen somit einen „schwarzen Kasten“ zum Träger der Potentialität. Es bleibt bei einer phänomenologischen Aussage. Allerdings spricht vieles dafür, dass die Quantentheorie sich folgendermaßen in der Zukunft entwickeln wird: Je besser wir die Abläufe im „Kasten“ verstehen, desto geringer wird die Rolle sein, die die Möglichkeiten spielen. Am Schluss wird sich dann möglicherweise Potentialität, so wie wir sie oben am Beispiel der Experimente beschrieben haben, als eine reine *façon de parler* herausstellen, sich also auf eine aus pragmatischen Gründen verwendete abkürzende Redeweise reduzieren, für die es keine ontologische Entsprechung in der physikalischen Wirklich-

keit gibt. Das zeigt sich schon heute darin, dass man auf diese Redeweise vollständig verzichten kann, ohne dadurch Erklärungsmöglichkeiten zu verlieren. Oder sollte umgekehrt der Nutzen der Frage nach der Wirklichkeit des Möglichen in der Quantenphysik gerade darin bestehen, dass sie zum Nachdenken darüber anregt, ob eine rein phänomenologische Beschreibung des Messprozesses (d. h. „schwarzer Kasten“) in jeder Quantentheorie grundsätzlich unvermeidlich ist?

Und schließlich: Könnte es der existentiellen Wirklichkeit des Möglichen „im Experimentator“ bei genauerer Betrachtungsweise ähnlich ergehen? Ist auch das nur eine pragmatische Redeweise?