



EPIPHANIA · EGREGIA

Herausgegeben von
Barbara Hallensleben, Guido Vergauwen, Nikolaus Wyrwoll
in Zusammenarbeit mit dem
Institut für Ökumenische Studien der Universität Freiburg Schweiz

Dieter Hattrup /
Antoine Weis / Todorka L. Dimitrova

Physik und Theologie

– gestern und heute

Herausgegeben von
Barbara Hallensleben

Aschendorff Verlag

Münster 2017

Bibliografische Informationen der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Veröffentlicht mit Unterstützung des Hochschulrates
der Universität Freiburg Schweiz.

Die Druckvorlagen der Textseiten
wurden vom Institut für Ökumenische Studien
als pdf-Dateien zur Verfügung gestellt.

© 2015 Institut für Ökumenische Studien
der Universität Freiburg Schweiz

ISBN ...
ISSN 1664-2325

INHALT

<i>Barbara Hallenleben</i> Vorwort: „Gott würfelt doch!“	1
<i>Dieter Hattrup</i> Physik und Theologie – gestern und heute	5
<i>Antoine Weis / Todorka L. Dimitrova</i> Licht – Wellen oder Teilchen?	19
<i>Antoine Weis / Todorka L. Dimitrova</i> Quantenphysik – Vom subjektiven zum reinen Zufall ...	27
Veröffentlichungsverzeichnis	34
Autorenverzeichnis	35



Barbara Hallensleben

VORWORT:
„GOTT WÜRFELT DOCH!“

Ein nicht alltägliches Ereignis fand am Mittwoch, dem 1. Juni 2016, im Großen Hörsaal der Physik der Universität Fribourg Schweiz statt: Prof. Dr. Dr. Dieter Hattrup hielt – nach elf Jahren Tätigkeit als Gastprofessor der Dogmatik an der Theologischen Fakultät – seine Abschiedsvorlesung vor einem gemischten Publikum aus der Theologischen und der Naturwissenschaftlichen Fakultät. Die Gastfreundschaft von Antoine Weis, Professor der Physik, machte das Ereignis zu einer Sternstunde. Prof. Weis präsentierte in gut nachvollziehbarer Weise, die doch die Komplexität seines Fachgebiets erahnen ließ, einen von Experimenten begleiteten Vortrag zum Thema „Wellen oder Teilchen? Die duale Natur des Lichts“.

Das Ergebnis hat nicht nur physikalische, sondern auch philosophische, ja theologische Bedeutung: Im Bereich der Quantenphysik beruht der Zufall nicht auf unserer Unkenntnis bzw. auf mangelhaften Messmethoden. Hier gilt das Prinzip des „reinen Zufalls“, den Physiker im Laufe des 20. Jahrhunderts entdeckten und nur widerwillig hinnahmen: „Gott würfelt doch!“ Die Forschungen zeigen: 1) In Bezug auf das Licht: Man kann nicht vollständig voraussagen, wie sich in verschiedenen experimentellen Anordnungen die Photonen des Lichts verhalten werden. 2) Allgemeiner: Gleiche Anfangszustände in der Vergangenheit können zu verschiedenen Endzuständen in der Zukunft führen. 3) Die Physik muss sich aufgrund eigener Ergebnisse von dem mechanischen Weltbild einer kausal determinierten Natur verabschieden.

Unter diesen Bedingungen wird Freiheit in der Natur wieder denkbar. Hier konnte Herr Hattrup mit seinem Vortrag anknüpfen. Er tat dies unter Bezug auf eine Aussage von Werner Heisenberg, der um 1970 sagte: „Sie wissen ja, dass durch die Atomphysik und durch das, was man in ihr gelernt hat, sehr allgemeine Probleme anders aussehen als früher, etwa das Verhältnis von Naturwissenschaft zur Religion, allgemeiner zur Weltanschauung. Das sieht jetzt anders aus, seit wir wissen, dass selbst in der Atomphysik die Beziehung zwischen Subjekt und Objekt nicht mehr so einfach aussieht wie in der klassischen Physik“.¹

Die Zuhörenden lernten, dass die Physik in der Tat in der Theologie ernsthaft mitzureden hat: „Wenn die Wissenschaft zeigen kann, in der Natur sei Freiheit nicht zu denken, dann müssten wir den personalen Gott aufgeben“ (Hattrup). Doch sie lernten auch, dass es heute mit der Physik einfacher ist, an Gott zu glauben, als ohne oder gar gegen sie. Die Aussagen des Theologen Hattrup standen in einem bemerkenswerten Einklang mit den Ergebnissen des Physikers Weis: „Im Gegensatz zum *subjektiven (kausalen)* Zufall in der klassischen Physik haben wir es in der Quantenwelt mit einem *objektiven (akausalen)* Zufall zu tun“ (Weis). Der „echte Zufall“, den Einstein um jeden Preis vermeiden wollte („Gott würfelt nicht!“), ist noch kein Gottesbeweis. Doch das Schattenspiel von Zufall und Notwendigkeit, die beide nachweisbar sind, kann als Widerschein einer Freiheit interpretiert werden, die sich unserem Begreifen entzieht; es ist die Bedingung der Möglichkeit, um von Freiheit in der Natur sprechen zu können. Damit wird auch der Vorrang des Personalen vor dem anonymen Gesetz plausibel. Mit der Freiheit Gottes, in der Welt zu handeln, ist auch die Freiheit des Menschen wieder aussagbar – und der „akausale Quantenzufall gesteht uns eine offene Zukunft zu“ (Weis; siehe unten S. 33).

1 <https://www.youtube.com/watch?v=MbV4wjKYtYc> (ab 1:21:26).

Für diese Publikation wurde der Vortrag von Dieter Hattrup zusammen mit zwei Beiträgen veröffentlicht, in denen Antoine Weis für das Magazin UNIVERSITAS der Universität Fribourg die Forschungsergebnisse der Quantenphysik auf populärwissenschaftliche Weise und mit einem Ausblick auf die weltanschaulichen Konsequenzen dargelegt hat. Diese Beiträge entsprechen inhaltlich seinem Vortrag am 1. Juni 2016.

Wer sich in das Verhältnis von Theologie und Naturwissenschaft einarbeiten und dabei interdisziplinär vorgehen will, wird viel Zeit und Energie aufwenden müssen. Die Theologie ist nicht selten geneigt, das freie Handeln Gottes in der Schöpfung einfach zu postulieren und sich anthropologisch mit dem „Bewusstsein der Freiheit“ zufriedenzugeben. Die Naturwissenschaft sieht meist wenig Anlass, sich über die Komplexität der Forschungsfelder hinaus mit den weltanschaulichen Konsequenzen ihrer Ergebnisse zu befassen.

In Fribourg trafen zwei Meister ihres Faches zusammen, bereit und fähig, über die Grenzen ihrer Wissenschaften hinauszublicken. Dieter Hattrup, Professor der Dogmatik an der Theologischen Fakultät Paderborn, hat vor seinem Theologiestudium Mathematik und Physik studiert. Seine erste Dissertation (1978) trägt den Titel *Der δ -Operator auf Produkten streng pseudokonvexer Gebiete*. Für ihn war dieses Studium nötig, um seinen Glauben und seine Berufung angesichts des modernen Weltbildes verantworten zu können. Der Physiker und Philosoph Carl Friedrich von Weizsäcker (1912-2007) wurde ihm dabei zum Vorbild. Dieter Hattrup gibt sich nicht zufrieden mit einer Bewusstseinstheologie; er will „Freiheit in der Natur“ denken und so die Bedingung der Möglichkeit der Theologie sichern. „Freiheit“ wird für die Theologie gerade in dem Moment zum Schlüsselbegriff, wo die „neuen Atheisten“, die sich als konsequente Naturalisten gebärden, das Freiheitsprojekt der Moderne zur Illusion erklären.

Antoine Weis hat seine Forschungsschwerpunkte in der Atom- und Molekularphysik, der Optik und der Quantenphysik. Darüber hinaus ist er ein passionierter Fotograf, der

bereits mehrfach internationale Preise gewonnen hat. Das Foto des Titelbildes stammt aus einem Film, in dem er den Hochzeitstanz eines Schwanenpaares aufgenommen hat.² Dabei entstehen Wasserwellen, die sich in ihrer Interferenz teils verstärken, teils neutralisieren, ähnlich wie beim Doppelspaltexperiment das Licht, insofern es sich wellenförmig verhält. Als Physiker nimmt Antoine Weis die Bedeutung seiner Experimente für unsere gesamte Weltanschauung wahr. Er fragt nach der Reichweite unserer Begriffe und Einsichten für eine kohärente Kosmologie.

Nach Dieter Hattrup war die mechanische Naturwissenschaft die (einzig plausible) Quelle des Atheismus in der Neuzeit. Wenn heute auf neue Weise ein angeblich „wissenschaftlicher Atheismus“ proklamiert wird, dann sollten Theologen und Theologinnen vielleicht einfach die Physiker sprechen lassen – noch besser: mit ihnen sprechen?! Wer die Konvergenz zwischen dem Theologen Hattrup und dem Physiker Weis auf den folgenden wenigen Seiten und in einer verständlichen Sprache gelesen hat, der wird zumindest wissen, dass der naturalistische Determinismus aus naturwissenschaftlichen Gründen kein glaubwürdiger Gesprächspartner mehr ist. Die Konvergenz zwischen Physik und Theologie läuft in der Tat auf eine wahre Revolution der Weltanschauung hinaus, deren Folgen noch nicht ausgelotet sind.



2 <https://www.youtube.com/watch?v=ttwuiku50qA&feature=youtu.be>

Dieter Hattrup

PHYSIK UND THEOLOGIE
– GESTERN UND HEUTE

1. Persönliches

Der Titel unterstellt, Physik und Theologie stünden in einer Beziehung, in der Vergangenheit wie in der Gegenwart. Aber stimmt das wirklich? Ein katholischer Theologe wie Karl Rahner verneint das: „Theologie und Naturwissenschaft können grundsätzlich nicht in einen Widerspruch untereinander geraten, weil beide sich *von vornherein* in ihrem Gegenstandsbereich und ihrer Methode unterscheiden“.¹ Der reformierte Theologe Karl Barth redete übrigens ganz ähnlich, ebenso der lutherische Theologe Rudolf Bultmann. Hier ein indirekter Beleg: „Christlicher Glaube bezog sich für [Bultmann] nur auf die Existenz ... Die Natur hingegen warf er der Naturwissenschaft zum Fraß hin“.²

Ich nehme an, diese Theologen waren gebrannte Kinder, sie fühlten die Kränkungen in ihrer Seele, die bis heute mit den Namen von Galilei und Darwin verbunden sind. Eine neuerliche Schmach wollten sie deshalb von vornherein ausschließen und sprachen sich für die strikte Trennung der Parteien aus. Denn obwohl sie im 20. Jahrhundert lebten, haben sie den Wandel in der Physik dieses Jahrhunderts nicht mitbekommen, der ihnen viel von ihrer Angst hätte nehmen können.

1 Karl Rahner, Schriften zur Theologie, Band XV, Einsiedeln 1982, 26.

2 Carl Friedrich von Weizsäcker, Wahrnehmung der Neuzeit, München 1983, 374.

Merkwürdig – wie anders sprechen zur gleichen Zeit die Physiker, die mitten in diesem Wandel standen und ihn sogar bewirkt haben, über dieselbe Beziehung. Etwa um 1970 sagt Heisenberg, der mit seinen Unbestimmtheitsrelationen die Quantentheorie vollendet hat: „Sie wissen ja, dass durch die Atomphysik und durch das, was man in ihr gelernt hat, sehr allgemeine Probleme anders aussehen als früher, etwa das Verhältnis von Naturwissenschaft zur Religion, allgemeiner zur Weltanschauung. Das sieht jetzt anders aus, seit wir wissen, dass selbst in der Atomphysik die Beziehung zwischen Subjekt und Objekt nicht mehr so einfach aussieht wie in der klassischen Physik“.³

Die gleiche Aussage macht Einstein, jedoch im Modus der Abwehr. Er will nicht sehen, was er zu sehen bekommt, und er sieht es doch: „Ich kann mir keinen persönlichen Gott denken, der die Handlungen der einzelnen Geschöpfe direkt beeinflusste oder über seine Kreaturen direkt zu Gericht säße. Ich kann es nicht, trotzdem die mechanistische Kausalität von der modernen Wissenschaft bis zu einem gewissen Grade in Zweifel gestellt wird“.⁴

Dieses Zitat übrigens hat mich zum Theologen gemacht. Als ich vor etwa 50 Jahren anfang, über die Wirklichkeit nachzudenken, in die ich durch die Geburt geworfen bin, boten sich mir zwei Möglichkeiten an, die Welt zu deuten: entweder Gott oder die Natur, obwohl kein Mensch ganz genau wusste, was das eine und was das andere ist. In der Wissenschaft gab es ein beständiges Agieren für die Natur und gegen Gott. Ausdruck dieses allgemeinen Lebensgefühls war zum Beispiel das Drei-Stadien-Wort von Auguste Comte, der 1842 gesagt hat: Erst kommt das Stadium der kindlichen Religion, dann die jugendliche Metaphysik, schließlich die erwachsene positive

3 <https://www.youtube.com/watch?v=MbV4wjYtYc> (gegen Ende des Beitrags: ab 1:21:26).

4 Albert Einstein, Briefe, Zürich 1981, 63.

Wissenschaft, welche die beiden ersten Stadien verschwinden lässt.⁵

Das habe ich als Schüler gehört, und es hat mich nachdenklich gemacht. Ja, es könnte wahr sein, Comte könnte recht haben, die Erfolge der Wissenschaft sind wirklich enorm. Ich bin zwar ein religiöser Mensch, ein *homo naturaliter religiosus*, denn da ich mich nicht selbst erschaffen habe, sollte ich diejenige Wirklichkeit anerkennen, die mich in der Hand hat und die nicht ich in der Hand habe. Aber natürlich, das könnte ein falsches Gefühl sein, die Wissenschaft verspricht ja seit ihren Anfängen, der Mensch könne die Natur, also vielleicht alle Wirklichkeit, in die Hand bekommen. Schon 1637 hat Descartes das den Menschen zugesichert, die er als zukünftige Herren und Meister der Natur anredet, „comme maîtres et possesseurs de la nature“.⁶

Als Jugendlicher war ich also in einen Konflikt gestellt, deshalb musste ich, wenn überhaupt Theologie, dann erst Naturwissenschaften studieren, um zu sehen, ob Descartes und Comte recht hatten oder nicht. Und siehe da, bei der Rede Einsteins über den Gegensatz von persönlichem Gott und mechanistischer Kausalität hatte ich zum ersten Mal das Gefühl, die beiden selbstsicheren Franzosen könnten ihr Haus auf Sand gebaut haben. Ich fühlte die gleiche Frage wie Einstein in mir: Ist die letzte Wirklichkeit eine Person oder ist sie ein sachhaftes Gesetz? Und auch in der Methode stimmte ich mit Einstein überein: Die Naturwissenschaft hat in dieser Frage ernsthaft mitzureden. Wenn die Wissenschaft sagt, in der Natur sei Freiheit nicht zu denken, dann müsste ich wohl den personalen Gott aufgeben. Eben dieses war im 19. Jahrhundert Darwin geschehen, der 150 Jahre vor mir geboren ist. Er hatte als Theologe angefangen, aber weil er in den „fixed laws“ der Mechanik, wie er sie nannte und die er auch auf

5 Auguste Comte, Discours sur l'esprit positif, 1842; deutsche Ausgabe: Rede über den Geist des Positivismus, Hamburg 1994.

6 René Descartes, Discours de la méthode VI,2.

seine Evolutionslehre anwandte, keinen Ausweg fand, endete er als Agnostiker: „Everything in nature is the result of fixed laws“.⁷

Nur in einem dritten Punkt unterschied ich mich von Einstein. Dieser fürchtete sich vor dem Ende der mechanistischen Kausalität, während ich eher Freude darüber empfand. Denn es ist doch wohl so: Wer einigermaßen frei ist in der Berufswahl, der macht seine Berufung zum Beruf. Man setzt sein ganzes Leben in der Welt nur für das ein, was man für das Ganze der Welt hält. Bei Einstein ist das deutlich zu sehen. Um 1950 schreibt er dem Dichter Hermann Broch: „Ich bin fasziniert von Ihrem Vergil und wehre mich beständig gegen ihn. Es zeigt mir das Buch deutlich, vor was ich geflohen bin, als ich mich mit Haut und Haar der Wissenschaft verschrieb: Flucht vom Ich und vom Wir in das Es“.⁸

Dieses Es ist der Gott Spinozas, zu dem sich Einstein oftmals bekannt hat, aber dieser Gott ist keine Person, sondern eher ein kosmisches Naturgesetz. Dieser Gott konnte deshalb nicht mehr mein Gott sein, die Natur konnte ich wegen der Quantentheorie nicht mehr für das Ganze halten. Die Natur ist nicht alle Wirklichkeit. Also konnte die Naturwissenschaft nicht mehr die Abbildung des Ganzen sein, also konnte ich trotz des *Doctor rerum naturalium* kein Naturwissenschaftler werden.

2. Das mechanische Zeitalter. Die Geschichte gestern

Wie sollen wir heute das Verhältnis von Gott und Natur denken, und wie konnte es zu diesem immensen Konflikt kommen? Wie können wir der raunenden Ahnung Heisenbergs gerecht werden, der von einem neuen Verhältnis von Natur-

7 Vgl. Charles Darwin, *The Autobiography of Charles Darwin*, London 1982, 87.

8 Banesh Hoffmann, *Albert Einstein. Schöpfer und Rebell*, Zürich 1976, 298.

wissenschaft zur Religion spricht, bewirkt durch die Atomphysik, also durch die Quantentheorie?

Wenn wir unseren Blick zurück auf die letzten 400 Jahre lenken, so hatten Physik und Theologie viel miteinander zu schaffen, zunächst aber nur negativ. Ich spreche vom mechanischen Zeitalter, beginnend mit dem Todesjahr des Kopernikus 1543, bis zum Jahr 1900, in dem Max Planck das Quantum entdeckte, also den Zufall in die Wissenschaft eingeführt hat.

Nur negativ war zunächst die Beziehung, etwa im Jahr 1610, als Galilei sein nachgebautes Fernrohr auf den Himmel richtet. Er sieht, wie irdisch es am Himmel zugeht. Er schaut auf die Sonne, und die hat plötzlich Flecken. Das war schändlich, denn nach der alten Metaphysik geht es am Himmel immer vollkommen zu, das Sternenzelt sollte aus dem unirdischen Stoff der *Quinta essentia* gebildet sein, und alle Körper sollten am Himmel auf Kreisbahnen umlaufen. Aber plötzlich hat die Sonne dunkle Flecken, und die Venus hat Phasen, sie leuchtet einmal auf der linken und einmal auf der rechten Seite, je nach dem Stand der Sonne. Und mit seinem Fernrohr erkennt Galilei Berge und Täler auf dem Mond, ganz wie auf der Erde. Und vor allem der Jupiter! Galilei sieht vier Monde, die um den Planeten kreisen, was doch unmöglich ist, wenn Aristoteles und Ptolemäus recht haben, welche die Planeten an Sphären hängen ließen, die sich um die Erde drehen. Galilei schreibt ein Büchlein darüber, „Sidereus nuncius“, der Sternenbote genannt, das im März 1610 erscheint. Plakativ gibt Bertolt Brecht in seinem Drama über Galilei dem Physiker einen Stift in die Hand und lässt ihn schreiben: „Heute ist der 10. Januar 1610. Die Menschheit trägt in ihr Journal ein: Himmel abgeschafft“.⁹

Tatsächlich empfanden die wachen Zeitgenossen die Beobachtungen Galileis als die Vertreibung Gottes aus der Natur.

9 Bertolt Brecht, Leben des Galilei, 1945, 3. Bild.

Kardinal Bellarmin schreibt bald darauf, etwa 1614, ein Gegenbuch mit dem Namen „Die Himmelsstiege oder die Erhebung der Seele zu Gott durch die Betrachtung der erschaffenen Dinge“. Aber der Kardinal und seine späteren Mitstreiter in der Physiko-Theologie haben dem mechanischen Weltbild nichts Ernsthaftes entgegenzusetzen, da sie über die Grenzen der Mechanik damals nichts wissen konnten.

Ja, es kommt noch schlimmer. Denn jetzt kommt Isaac Newton und sein Buch von 1687 über die „Mathematischen Grundlagen der Naturphilosophie“, oder die „*Philosophiae naturalis principia mathematica*“. Damit scheint der Damm gebrochen zu sein, die Mechanik scheint den vollkommenen Sieg errungen zu haben, weil sie alle Bewegungen in der Natur zu erklären unternimmt. Zwar waren die Natur des Lichts und vieles andere noch nicht erklärt, aber es schien nur eine Frage der Zeit zu sein, bis alles mit Stoß und Druck nach den mechanischen Grundsätzen der Schwerkraft gedeutet ist. Ein mechanischer Träumer war dann im 19. Jahrhundert Pierre Laplace, der sich in Begeisterung über die Newton'sche Physik nicht genug tun konnte: „Alle Ereignisse, selbst jene, welche wegen ihrer Geringfügigkeit scheinbar nichts mit den großen Naturgesetzen zu tun haben, folgen aus diesen mit derselben Notwendigkeit wie die Umläufe der Sonne“.¹⁰ Und weil er die Vorhersage am Himmel gleich auch auf die Erde verlegt, kann er zu Napoleon sagen, als dieser ihn nach Gott fragt: „Sire, je n'avais pas besoin de cette hypothèse-là“ – diese Hypothese brauchte ich nicht.

Doch es gab auch Skeptiker. Der erste, der skeptisch auf Newtons System blickte, war Newton selbst. Nicht sofort 1687, aber zehn oder zwanzig Jahre später merkte er, was er angerichtet hatte: Er hatte das Handeln Gottes in der Welt

10 „Tous les événements, ceux même qui par leur petitesse, semblent ne pas tenir aux grandes lois de la nature, en sont une suite aussi nécessaire que les révolutions du soleil“: Pierre-Simon Laplace, *Philosophischer Versuch über die Wahrscheinlichkeit* (1814), Leipzig 1932, 1.

unmöglich gemacht und damit Gott seiner Freiheit beraubt – und den Menschen gleich mit dazu. Deshalb konnte 1748 ein Arzt namens Julien Offray de La Mettrie ein Buch mit dem Titel „L’homme machine“ schreiben. Zugleich hatte Leibniz in Hannover das Problem bemerkt. Beide, Newton und Leibniz, haben auch eine Lösung der Freiheitsfrage versucht, beide auf merkwürdig konstruierte Weise, die hier nicht dargelegt werden kann. Übrigens sind Newton und Leibniz über diese Frage in einen bitterbösen Streit geraten, mit zornigen Briefen, in denen einer dem anderen vorwarf, den Atheismus zu befördern.¹¹ Was uns interessieren muss, ist nicht ihre Antwort, sondern ihre Frage. Denn beide stellten die richtige Frage, sie stellten die Gottesfrage als Freiheitsfrage: Ist in der Natur, wie wir sie kennen, Freiheit möglich?

Ein halbes Jahrhundert später sah sich Immanuel Kant vor die gleiche Frage gestellt, und er hat die für die damalige Zeit vielleicht beste Antwort gefunden. Newton hat nach Kant zwar Recht mit seiner Physik, aber seine Mechanik gilt nur für die äußeren Erscheinungen, für das Ding an sich soll sie nicht gelten. Deshalb kann oder muss Kant in der „Kritik der reinen Vernunft“ von 1787 so seltsame Sätze sagen wie: „Ich musste also das *Wissen* aufheben, um zum *Glauben* Platz zu bekommen“ (B XXX). „Denn, sind Erscheinungen Dinge an sich selbst, so ist Freiheit nicht zu retten“ (B 564).

Gemeint ist die Aufhebung des Wissens einer allzuviel wissenden Metaphysik, aber auch einer allzuviel wissenden Physik wie im Fall von Laplace. Kant hatte allerdings nicht das Glück, verstanden zu werden, da die späteren Philosophen seinen physikalischen Hintergrund nicht im Blick hatten, etwa Fichte, der Kant verbessern wollte, was dieser sich entschieden verbat. Hier die Einschätzung meines Lehrers von Weizsäcker: „Kants Argumente konnte man nicht wider-

11 Vgl. Samuel Clarke, Der Briefwechsel mit G.W. Leibniz von 1715/16, Hamburg 1990.

legen, aber mit ihren Folgerungen zu leben, war für den klassischen Entwurf der Philosophie unerträglich. So wurde das grandiose Abenteuer des deutschen Idealismus gewagt“.¹²

3. Die Lage heute

Lassen wir uns anregen von Leibniz, Newton und Kant, und gehen wir heute auf die Suche nach der verlorenen Freiheit, verloren oder stark gefährdet durch die mechanische Physik.

Diese Physik ändert sich plötzlich um das Jahr 1900, von niemandem erwartet und von nur wenigen begrüßt, am wenigsten von dem Entdecker Max Planck, der das Quantum in die Physik eingeführt hat. Damit hat er gegen einen alten Grundsatz der Metaphysik und der Physik verstoßen: *Natura non facit saltus* – Die Natur macht keine Sprünge. Doch leider ist der Grundsatz im Unrecht, und Planck, der sich lange gegen die Sprünge gewehrt hat, ist im Recht, wenn auch wider Willen: „Durch mehrere Jahre hindurch machte ich immer wieder Versuche, das Wirkungsquantum irgendwie in das System der klassischen Physik einzubauen. Aber es ist mir das nicht gelungen“.¹³

Auch der junge Einstein beteiligte sich zunächst an der Physik der Quanten, etwa als er im Alter von 26 Jahren den photoelektrischen Effekt mit Hilfe des Wirkungsquantums erklärte. Damals merkte er noch nichts. Zwanzig Jahre später ist er über die neue Theorie entsetzt. 1927 schreibt er in einem Brief: „Lebendiger Inhalt und Klarheit sind Antipoden, einer räumt das Feld vor dem andern. Das erleben wir gerade jetzt tragisch in der Physik“.¹⁴

12 Carl Friedrich von Weizsäcker, *Zeit und Wissen*, München 1992, 531.

13 Max Planck, *Vorträge und Erinnerungen*, Darmstadt 1970, 27.

14 Max Born/Albert Einstein, *Briefwechsel 1916-1955*, Hamburg 1972, 102.

Tragik in der Physik? Ja, das ist möglich, wenn man sein Herz an ein Bild der Natur gehängt hat, dem die Natur widerspricht. Bis 1930 hatte sich Einstein zu helfen versucht, indem er die Quantentheorie als in sich widersprüchlich erklärte. Insbesondere ging er immer wieder leidenschaftlich gegen die Unbestimmtheitsrelationen von Heisenberg vor. Gott würfelt nicht! – war sein Kampfruf. Nachdem er jedoch den Titanenkampf gegen Bohr auf der Solvay-Konferenz von 1930 verloren hatte, änderte er seine Taktik. Er meinte, die Quantentheorie habe keine inneren Widersprüche, doch in der vorliegenden Form sei sie noch nicht vollständig. Nebenbei schlug er Heisenberg für den Nobelpreis vor, den dieser 1932 auch erhielt. Einstein blieb hartnäckig: Die fehlenden verborgenen Parameter zur Wiederherstellung der vollen Kausalität müssten und könnten gefunden werden. In dem Versuch, diese Parameter zu finden, leitete Einstein allerdings selbst seine endgültige Niederlage ein.

Das EPR-Experiment, das Einstein 1935 zusammen mit Podolsky und Rosen vorschlug, war zwar zunächst nur ein Gedankenexperiment, aber dem Physiker John Bell gelang es in den 1960er Jahren, ein ausführbares Experiment daraus zu entwickeln, denn Bell war selbst an der Existenz der verborgenen Parameter zur Wiederherstellung der vollen Kausalität in der Natur interessiert. Auch für ihn kam es anders.

Einstein hatte mit dem EPR-Paradoxon zeigen wollen, wie sehr die Unbestimmtheit der Quantentheorie gegen den gesunden Menschenverstand verstößt. Seine Prinzip lautete: Lokale Realität bestimmt die Natur. Jeder physikalische Vorgang soll an einem bestimmten Ort und zu einer bestimmten Zeit stattfinden. Wenn dieses Prinzip nicht vollständig gilt, dann gilt das Kausalgesetz nicht mehr vollständig, denn dann sind Ursache und Wirkung nicht sauber voneinander zu unterscheiden. Man spricht von verschränkten Teilchen. Und John Bell hatte eine glänzende Idee, wie man die Frage nach der lokalen Realität im Experiment entscheiden kann. Sein Wunsch allerdings geht nicht in Erfüllung. Alle Ergebnisse

sprechen eindeutig gegen die lokale Realität. Im Jahr 2017 haben chinesische Forscher sogar einen neuen Rekord in der Distanz der Teilchen aufgestellt. „Verschränkte Photonenpaare zeigen ihr spukhaftes Verhalten sogar, wenn sie 1200 Kilometer entfernt sind“.¹⁵

Wer etwas mehr von dem Paradoxon verstehen möchte, muss sich mit den Bell’schen Ungleichungen beschäftigen. Stellen wir uns zum Beispiel die Mitarbeiter einer Firma vor. Jedem Mitarbeiter können wir feste Eigenschaften zuschreiben. Nehmen wir exemplarisch die folgenden drei Merkmale:

- männlich oder weiblich (m oder nicht m),
- treibt Sport oder treibt nicht Sport (s oder nicht s),
- hat New York City besucht oder nicht (n oder nicht n).

Lokale Realität meint dann: Jeder Angehörige hat die Eigenschaft oder hat sie nicht, losgelöst davon, ob eine andere Person diese Eigenschaft hat. Offenbare, lokale Parameter – legen bei den Leuten der Firma diese Eigenheiten fest. Wir führen folgende Schreibweisen ein: $A(m, s)$ sei die Anzahl der Mitarbeiter, die männlich sind und Sport treiben, $A(s, \text{nicht } n)$ sei die Anzahl derer, die Sport treiben, doch nicht in New York waren, und so weiter.

Dann gilt die folgende Ungleichung:

$$A(m, s) \leq A(m, n) + A(s, \text{nicht } n).$$

Die Anzahl der Leute im Betrieb, die männlich sind und Sport treiben, ist kleiner oder gleich der Anzahl von Leuten, die männlich sind und in New York waren, vermehrt um die Anzahl von Leuten, die Sport treiben und nicht in New York waren. Der Beweis ist einfach: Die Leute, die bei $A(m, n)$ im Vergleich mit $A(m, s)$ wegfallen, sind unter solchen zu finden, die männlich sind, Sport treiben und nicht in New York waren. Diese finden wir alle unter $A(s, \text{nicht } n)$ wieder; in dieser Gruppe sind sogar noch die sportlichen weiblichen Mitglieder mit dieser Eigenschaft enthalten. Ungleichungen

15 FAZ vom 21. Juni 2017, Seite N1.

dieser Art werden ganz allgemein Bell'sche Ungleichungen genannt. Und diese Ungleichung, die doch für den Verstand sehr einleuchtend ist, gilt nicht in der Quantentheorie. Denn den kleinsten Teilchen lassen sich keine festen, lokal eindeutig bestimmbar Parameter zuordnen. Das allerdings muss in mühsamer Laborarbeit gezeigt werden.

Ich beschränke mich auf das Ergebnis, wie es bei Paul Davies zu lesen ist: „Aus Einsteins Gedankenexperiment sind jedenfalls inzwischen eine Reihe wirklicher Experimente geworden, deren Ergebnisse bestätigt haben, dass Bohr eindeutig recht hatte und Einstein bedauerlicherweise unrecht“. „Es herrscht Unbestimmtheit, was bedeutet, dass einige Ereignisse ‚einfach geschehen‘, spontan sozusagen, ohne vorherige Ursache im üblichen Wortsinn“. ¹⁶ Oder wir können den großen Physiker Feynman hören, der auf die lange Geschichte der Physik zurückblickt und seufzt: „Ja! Die Physik *hat* aufgegeben. *Wir wissen nicht, wie man vorhersagen könnte, was unter vorgegebenen Umständen passieren würde*, und wir glauben heute, dass es unmöglich ist – dass das einzige, was vorhergesagt werden kann, die Wahrscheinlichkeit verschiedener Ereignisse ist“. ¹⁷

So lautet das Ergebnis von 400 Jahren extremer Anstrengung in der Physik: Es gibt in der Natur den Zufall und die Notwendigkeit, beides, das eine ist so echt wie das andere, und sie sind nicht unter ein gemeinsames Prinzip zu bringen. Und mit Zufall und Notwendigkeit, diesem widerspenstigen Paar, finden wir die Parallele und Differenz der Physik zur Theologie. Die Theologie, wie jede gesunde Philosophie, ist auf Freiheit angewiesen, deren Möglichkeit erst einmal nachgewiesen werden muss, bevor sie überhaupt loslegen kann, von Schöpfung und Offenbarung zu sprechen. Ich rede von einer Freiheit in der Natur, denn der Mensch ist ein leibhaf-

16 Paul Davies, *Die Unsterblichkeit der Zeit*, Bern 1995, 208 und 219.

17 Richard P. Feynman, *Vorlesungen über Physik*, Bd. III (1965), München 1992, 30.

tiges Wesen, er ist nicht Geist außerhalb der Welt, wie das vielleicht Descartes mit seiner *res cogitans* gemeint hätte. Der Mensch ist Geist in Welt und in der Natur.

Wie also können wir von der Freiheit sprechen? Jetzt kann ich keine Zitate mehr bringen, das Folgende muss ich selbst verantworten. Doch beginnen wir mit einem weiteren Zitat, das zeigt, wie man mit Zufall und Notwendigkeit nicht umgehen sollte. Der Amerikaner Edward O. Wilson sagt: „If humankind evolved by Darwinian natural selection, genetic chance and environmental necessity, not God, made the species. – Wenn der Mensch durch die Darwin'sche natürliche Selektion entstanden ist, dann haben genetischer Zufall und von der Umgebung erzeugte Notwendigkeit, nicht Gott, die Arten geschaffen“.¹⁸

Wilson begeht einen Denkfehler, indem er Zufall und Notwendigkeit wie ein einziges Prinzip behandelt. Es sind aber zwei, deren Einheit unseren Begriffen nicht zugänglich ist, d.h. dem Begreifen schlechthin unzugänglich bleibt. Notwendigkeit ist ein Wissensprinzip, das Ursache und Wirkung verbindet, und Zufall ist ein Nichtwissensprinzip, das die Verbindung von Ursache und Wirkung auflöst. Und Hüh und Hott sind nicht in ein einziges Wort zu bringen. Wir müssen uns vor diesem Denkfehler hüten und stattdessen transzendental vorgehen.

Fragen wir nach den Bedingungen: Was muss in der Natur realisiert sein, damit Freiheit in ihr denkbar ist? Nun, zum einen muss Notwendigkeit da sein, viele kausale und verlässliche Gesetze muss es geben, mit denen Gott und der Mensch ihre Freiheit betätigen. Es müssen die Gesetze der Schwerkraft, der Optik, der Wärmelehre erfüllt sein, damit ich auch nur einen Schritt nach vorne gehen kann. Der alte Gegensatz von Freiheit und Notwendigkeit ist oberflächlich. Er hat nur insofern recht, als die kausale Notwendigkeit nicht ganz mei-

18 Edward Osborne Wilson, *On Human Nature*, Cambridge 1978, 1.

nen Willen, einen Schritt nach vorne zu tun, bestimmen darf. Denn sonst wäre mein Wunsch nur das Ergebnis feuerner Neuronen und anderer Vorgänge in mir. Die physikalische Notwendigkeit muss in der Natur ihre Grenze finden, aber das tut sie auch. Wie jetzt im 21. Jahrhundert wohl endgültig feststeht, ist der Zufall in der Natur echt und nicht nur ein subjektives, vorläufiges Unwissen. Diese transzendente Überlegung ist zwar kein Beweis für die Existenz der Freiheit, jedoch ein plausibler Aufweis für die Spuren der Freiheit in der Naturforschung selbst, insofern diese am Ende auf Zufall und Notwendigkeit hinausläuft.

Was wir in der Physik gesehen haben, wiederholt sich in der Evolutionslehre mit Mutation und Selektion, worauf ja schon Wilson mit „genetic chance and environmental necessity“ hingewiesen hat, wenn auch in unzulänglicher Form. Die gleichen Bruchstücke von Freiheit finden sich in der Neurobiologie, denn auch dort lassen sich Bereitschaftspotential und Bewusstseinspotential als Spiel zwischen Zufall und Notwendigkeit deuten. Das gleiche wird wohl auch von der Kosmologie gelten. Wenn gewisse Leute den Kosmos eine Quantenfluktuation des Nichts nennen und von einer Schöpfung ohne Schöpfer sprechen, so ist auch da die Quantentheorie im Spiel, damit auch Zufall und Notwendigkeit, und wiederum stoßen wir auf die Bruchstücke der Freiheit. Und dann kann man selbst im Urknall den Finger eines personalen Schöpfers erkennen, der in Freiheit tätig ist. Man kann das sehr gut tun, ganz zwingend ist es nicht. Aber das ganz Zwingende wäre ja wiederum mit der Freiheit nicht vereinbar, und wir haben es mit dem echten Zufall aus der Naturwissenschaft ausschließen können.

So komme ich abschließend zu meinen beiden Hauptsätzen: „Natur ist diejenige Wirklichkeit, die ich ergreifen kann, Gott diejenige Wirklichkeit, die mich ergreift.“ Diesem Satz hätten natürlich auch Descartes, Laplace und Einstein zugestimmt, nur hätten sie gerne die Wirklichkeit, die mich ergreift, zu einer leeren Menge erklärt. Der zweite Satz lautet:

„Freiheit ist das Schattenspiel von Zufall und Notwendigkeit.“
 Wer diesem Satz zustimmt, weiß ich nicht genau, jedenfalls
 zähle ich diese Personen dann zu meinen engsten Freunden.

Bücher von Dieter Hatrup zur Thematik:

- Einstein und der würfelnde Gott. An den Grenzen des Wissens in Naturwissenschaft und Theologie, Herder: Freiburg i.Br. 2001; 4. Auflage 2008.
- Die Wirklichkeitsfalle. Vom Drama der Wahrheitssuche in Naturwissenschaft und Philosophie, Herder: Freiburg i.Br. 2003.
- Carl Friedrich von Weizsäcker – Physiker und Philosoph, WBG: Darmstadt 2004.
- Frankenberger, Gottbekenntnisse großer Naturforscher. Erweitert und kommentiert von D. Hatrup, Paulinus: Trier 2005.
- Der Traum von der Weltformel oder Warum das Universum schweigt, Herder: Freiburg i.Br. 2006.
- Darwins Zufall oder Wie Gott die Welt erschuf, Herder: Freiburg i.Br. 2008.
- Freiheit als Schattenspiel von Zufall und Notwendigkeit – Vier Dialoge, Herder: Freiburg i.Br. 2009.
- Darwin als Kirchenvater 1: Stephen Jay Gould. Verlag CreateSpace 2014, ISBN-13: 978-1503144491.
- Darwin als Kirchenvater 2: Albert Einstein u.a. Verlag CreateSpace 2014, ISBN-13: 978-1503144934.
- Darwin als Kirchenvater 3: Thomas von Aquin. Verlag CreateSpace 2014, ISBN-13: 978-1503234444.



Antoine Weis / Todorka L. Dimitrova

LICHT – WELLEN ODER TEILCHEN?

Ein Einblick in die wundersame Welt der Quantenmechanik

Die Diskussion um die Natur des Lichts hat eine lange Geschichte. Licht besteht aus starren Korpuskeln – so postulierte Isaac Newton im 17. Jahrhundert, eine Hypothese, die auf keinerlei experimentellen Grundlagen beruhte. Diese Interpretation wurde aufs heftigste von Newtons Zeitgenossen Hooke und Huygens angegriffen. Sie behaupteten, Licht sei eine Wellenerscheinung. Erst Thomas Young gelang Anfang des 19. Jahrhunderts der Nachweis, dass das Licht die Eigenschaften einer Welle hat. Das Young'sche Experiment brachte die Diskussion zu einem vorläufigen Abschluss, bis gegen Ende des 19. Jahrhunderts der photoelektrische Effekt entdeckt wurde; er besteht darin, dass ultraviolettes Licht aus einer Metallplatte Elektronen herausschlägt. Die Interpretation dieses Effekts – ohne den wir heute keine Digitalkameras, Videokameras und andere Lichtdetektoren hätten – entzog sich jedem Erklärungsversuch mit den Methoden der zur Jahrhundertwende bekannten Physik.

1905 stellte Albert Einstein die 1921 mit dem Nobelpreis ausgezeichnete revolutionäre Hypothese auf: Man kann den Photo-Effekt erklären, wenn man annimmt: Das Licht besteht aus einem Strom von Teilchen – später Photonen genannt. Die unwiderruflichen Beweise sowohl für die Teilchennatur als auch für die Wellennatur des Lichts stellten die Physiker vor ein großes Dilemma. Die Interpretation dieses Paradoxes geht auf Niels Bohr zurück, der das Komplementaritätsprinzip aufstellte. Nach diesem Prinzip kann ein physikalisches System sehr wohl zwei sich gegenseitig ausschließende Eigenschaften haben; sie können nicht gleichzeitig beobachtet wer-

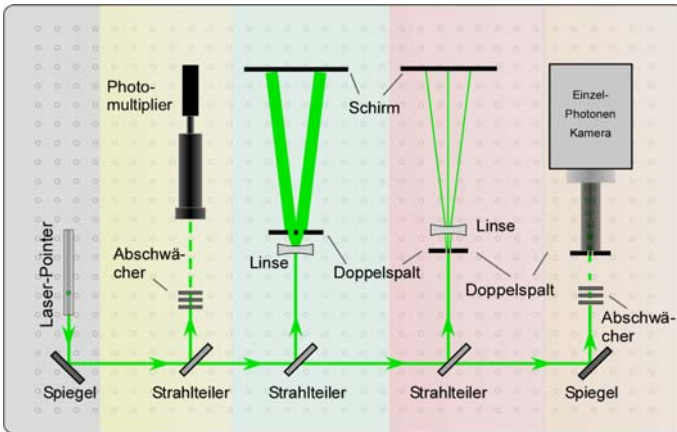
den, sind jedoch beide nötig, um das System vollständig zu beschreiben. Das universelle Prinzip spielt auch in vielen anderen Disziplinen eine wichtige Rolle, um nur die fernöstlichen Philosophien zu nennen (Yin-Yang).



Diese Auflösung des Paradoxes ist heute als *Welle-Teilchen-Dualismus* des Lichts bekannt. Das Licht verhält sich wie eine Welle, und das Licht verhält sich wie Teilchen, aber nie gleichzeitig. Was man beobachtet, hängt von dem durchgeführten Experiment ab: Während seiner Ausbreitung offenbart das Licht seine Wellennatur, wohingegen sich beim Nachweis des Lichts der Teilchencharakter zeigt. Erst die Theorie der Quantenmechanik vereint beide Aspekte in einer einzigen kohärenten Beschreibung, indem sie den Lichtteilchen (Photonen) eine Welleneigenschaft zuordnet: die quantenmechanische Wellenfunktion.

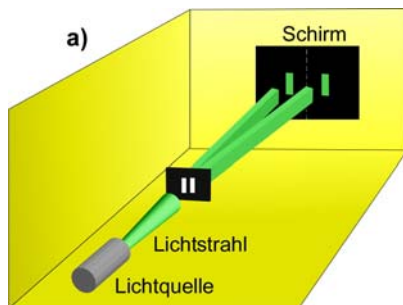
DEMONSTRATIONSEXPERIMENT

Vor kurzem habe ich ein von den Departementen für Physik und Chemie finanziertes Demonstrationsexperiment zur Illustration des Welle-Teilchen-Dualismus realisiert. Ein grüner Laserpointer dient hierbei als Lichtquelle, sein Strahl wird durch Spiegel auf vier verschiedene Experimente gelenkt, wie die folgende Abbildung zeigt.

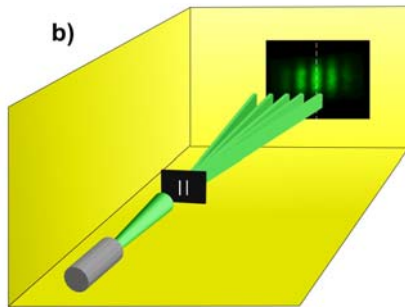


Photonen hören: Der Lichtstrahl wird so stark abgeschwächt, dass nur wenige Photonen pro Sekunde auf einen Detektor (Photomultiplier) treffen, in dem jedes Photon einen elektrischen Impuls erzeugt, der als Knackern in einem Lautsprecher hörbar gemacht wird.

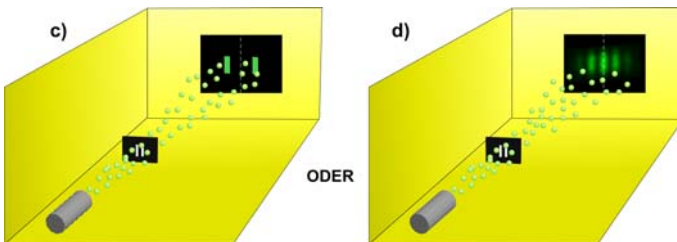
Strahlen sehen: Beleuchtet man zwei breite Spalte in einer sonst undurchsichtigen Scheibe, sind auf dem dahinter liegenden Schirm die Bilder der beiden Spalte mit einem dunklen Bereich in der Mitte zu sehen (Abb. a). Dies ist das Verhalten von Licht-Strahlen.



Wellen sehen: Macht man die beiden Spalte sehr dünn und bringt sie sehr nahe aneinander, so zeigt das Bild auf dem Schirm ein ganz anderes Verhalten. Zu beobachten sind mehrere Streifen und zudem in der Mitte ein heller Streifen (Abb. b). Dies ist der Doppelspalt-Versuch von Young, bei dem das charakteristische Streifenmuster die Wellennatur des Lichts beweist.



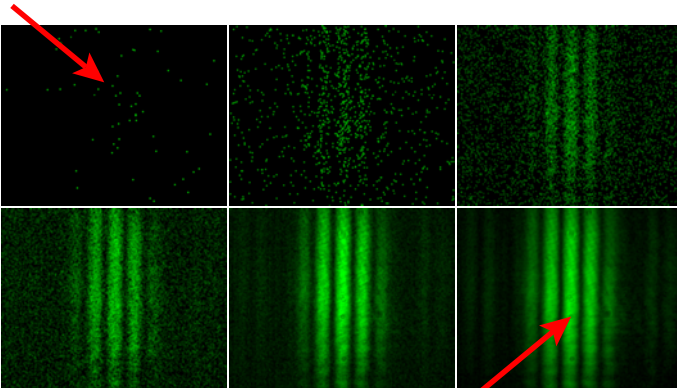
Photonen und Wellen sehen: Es stellt sich die von Einstein mit Bohr intensiv diskutierte Frage, was passiert, wenn man den Young'schen Versuch mit einem stark abgeschwächten Lichtstrahl durchführt, so dass in jedem Augenblick nur ein einzelnes Photon durch den Spalt fliegt. Wird man dann auf dem Schirm ein Muster sehen, das Licht-Strahlen entspricht (Abb. c), oder ein solches, das Licht-Wellen entspricht (Abb. d)?



Im Demonstrationsversuch wird eine hochempfindliche Kamera, die einzelne Photonen als helle Punkte darstellen kann, eingesetzt, um das Resultat zu zeigen. Auf jedem Einzelbild der Kamera erzeugt der stark abgeschwächte Lichtstrahl etwa zehn scheinbar zufällig verteilte helle Punkte, welche die Auftreff-Orte der Photonen darstellen und so den Teilchencharakter des Lichts demonstrieren.

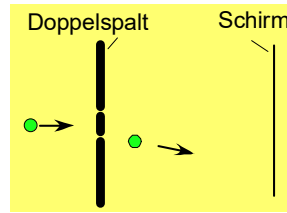
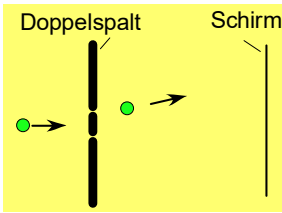
Überlagern sich viele solcher Bilder, so sieht man, wie sich mit der Zeit das für Wellen charakteristische Streifenmuster herausbildet, was wiederum den Wellencharakter des Lichts demonstriert. Die Tatsache, dass in der Mitte des Schirms ein heller Streifen auftaucht, obwohl die Photonen einzeln durch die Spalte fliegen, lässt sich nur durch die Annahme erklären, dass jedes einzelne Photon gleichzeitig durch beide Spalte fliegt.

Die Teilchen-Natur des Lichts offenbart sich im Moment des Licht-Nachweises (einzelne Punkte):

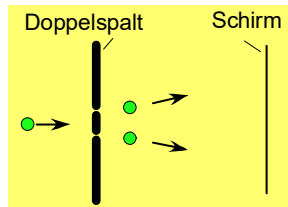


Die Wellen-Natur des Lichts offenbart sich während der Licht-Ausbreitung.

Welchen Spalt durchfliegt also beim Doppelspaltexperiment das Photon? In der klassischen Mechanik erwartet man, dass das Photon den einen *oder* den anderen Spalt passiert.



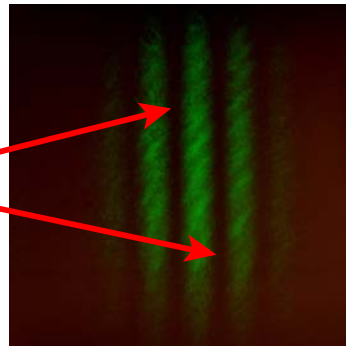
In der quantenmechanischen Beschreibung, die erforderlich ist, um die Phänomene zu erklären, passiert jedes Photon *gleichzeitig* beide Spalte!



Und was geschieht, wenn man einen Spalt schließt?

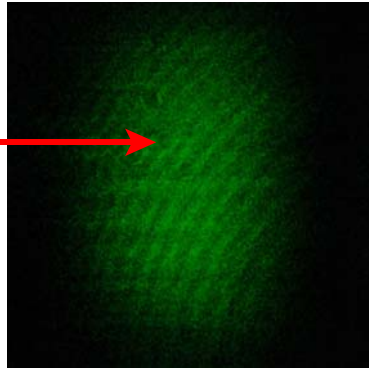


Sind beide Spalte geöffnet, entstehen „verbotene Zonen“, an denen das Photon nie erscheint.



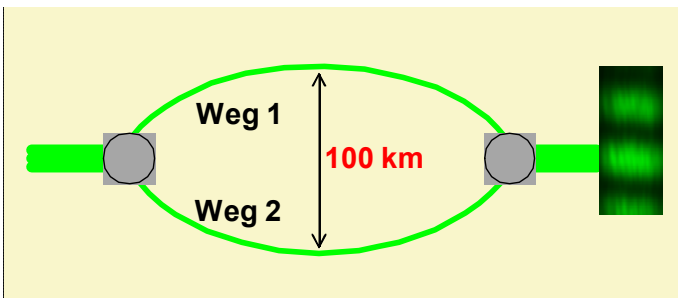


Ist hingegen ein Spalt geschlossen, tauchen solche „verbotenen Zonen“ nicht auf.



Die Schlussfolgerung lautet: Das Photon, das einen der Spalte durchquert, „weiß“ offenbar, ob der andere Spalt offen ist oder nicht. Das wiederum lässt sich nur dadurch erklären, dass das Photon gleichzeitig durch beide Spalte fliegt.

Ein möglicher Einwand könnte lauten: Das Photon ist „groß“, und die Spalte liegen so nahe nebeneinander, dass das Photon leicht gleichzeitig durch beide Spalte fliegen kann. Doch physikalische Experimente zeigen: Man kann die Versuchsanordnung auch so gestalten, dass die beiden Wege mehrere 100 km weit voneinander entfernt liegen – und das Ergebnis bleibt das gleiche.



Das sonderbare Verhalten, dass Teilchen bis zu dem Moment ihres Nachweises delokalisiert sind, bildet eine der Grundlagen der Quantenmechanik.

Die nicht nur physikalische, sondern zugleich weltanschauliche Bedeutung der Ergebnisse wird im nächsten Beitrag dargestellt.

Das Demonstrationsmodul wurde an den Tagen der offenen Tür der Naturwissenschaftlichen Fakultät am 20. und 21. Mai 2005 einer breiteren Öffentlichkeit vorgestellt und stieß auf reges Interesse. Im Juli 2005 wurde es bei der Ausstellung «einsteinheute» in Bern gezeigt.



Antoine Weis / Todorka L. Dimitrova

QUANTENPHYSIK –
VOM SUBJEKTIVEN ZUM REINEN ZUFALL

Angeblich zufälliges Verhalten beruht im Bereich der klassischen Physik ausschließlich auf unserer Unkenntnis bzw. auf mangelhaften Messmethoden. Anders im Reich der kleinsten Teilchen, der Quantenphysik: Hier gilt das Prinzip des „reinen Zufalls“. Physiker gewähren Einblick in eine der wichtigsten Entdeckungen der Physik des 20. Jahrhunderts.

Im 17. Jahrhundert formulierte Isaac Newton die Gesetze der Mechanik, welche die Bewegung der Körper auf der Erde und im Universum bestimmen. Der spektakuläre Erfolg dieser Gesetze, insbesondere in der Astronomie, führte Pierre-Simon Laplace 1814 dazu, sich eine „Intelligenz“ vorzustellen – später „Dämon“ genannt –, die aufgrund der Kenntnis der Positionen und Geschwindigkeiten aller Teile des Universums die Zukunft des Universums voraussagen kann. Diese Aussage führt notgedrungen zu der schwer akzeptierbaren Schlussfolgerung, dass alle Ereignisse – so auch Wissen, Verhalten und Entscheidungen des Menschen – auf deterministische Weise kausal mit vorangegangenen Ereignissen verknüpft sind.

Streng genommen gibt es in der deterministischen Welt des Laplace'schen Dämons keinen Platz für den Zufall. In der Wissenschaft ist der Begriff „Zufall“ eng mit der Wahrscheinlichkeit verbunden, dass ein gewisses Ereignis eintritt. Ob eine hochgeworfene Münze mit Kopf oder Zahl nach oben landet, ist durch die Geschwindigkeit und Rotation der Münze beim Abwurf bestimmt, und allein die unbekanntenen Anfangsbedingungen verhindern eine Voraussage des Resultats. Trotzdem

können wir sagen, dass jedes der beiden Resultate mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% eintritt. Anhand einer Videoaufnahme des Abwurfs kann ein Computer den Ausgang vorausberechnen und bereits vor der Landung der Münze anzeigen. Der deterministische Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung der Newton'schen Gesetze bedingt, dass die Münze vom Moment ihres Abwurfs an die Information über den Ausgang des Wurfs in sich trägt. In der klassischen Physik hat der Zufall einen rein subjektiven Charakter, da er auf unserer Unkenntnis der Anfangsbedingungen beruht, die wir nur in einfachen Fällen bestimmen können.

TIEFGREIFENDER PARADIGMENWECHSEL

Die Quantenmechanik wurde am Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelt, um verschiedene experimentelle Beobachtungen zu beschreiben, deren Deutung sich den Gesetzen der Mechanik und der Elektrodynamik entzieht. So postuliert die Quantenmechanik z.B., dass sich Licht gleichzeitig als Welle und als Strom von Quantenteilchen (Photonen) beschreiben lässt. Die Quantenmechanik führte zu einem Paradigmenwechsel, der das allumfassende Wissen des Laplace'schen Dämons prinzipiell verunmöglicht und uns zur Aufgabe eines streng deterministischen Weltbildes zwingt.

Der Zufall spielt in der Quantenmechanik eine herausragende Rolle, vor allem in der breit akzeptierten Kopenhagener Interpretation. Die Quantenmechanik beschreibt die Position eines Teilchens durch eine mathematische „Wellenfunktion“, deren Quadrat die Wahrscheinlichkeit angibt, mit der man das Teilchen an einem bestimmten Ort antrifft.

Eine wesentliche Grundlage für die Verwerfung des Determinismus bildet Heisenbergs Unschärferelation, die (vereinfacht) besagt: Wir können nicht gleichzeitig Ort und Geschwindigkeit eines leichten Teilchens kennen: je größer die Ortsunschärfe, desto kleiner die Geschwindigkeitsunschärfe und umgekehrt. Im Alltag ist die Unschärfe wegen der großen

Masse der Objekte unmessbar klein. Hingegen ist das Verhalten der extrem leichten Teilchen in der subatomaren Welt vollkommen durch diese Unschärfen bestimmt, daher der Ausdruck „Quantenwelt“. So ist die Größe eines Atoms dadurch bestimmt, dass die Natur versucht, die Unschärfen des Orts und der Geschwindigkeit seiner Elektronen gleichzeitig klein zu halten. Unschärfe bedeutet hier, dass Ort und Geschwindigkeit per se unbestimmt sind, nicht etwa, dass es nur technisch unmöglich wäre, sie genau zu messen. Diese Verschwommenheit ist ein spezifisches Merkmal der Quantenmechanik.

Das bedeutet: Gleiche Ausgangszustände in der Vergangenheit können zu verschiedenen Endzuständen in der Zukunft führen. Damit aber lässt sich kein eindeutiger Kausalzusammenhang mehr zwischen Vergangenheit und Zukunft herstellen, wie die klassische Mechanik ihn postuliert hatte.

Als Albert Einstein sagte: „Gott würfelt nicht!“, wollte er – gleichsam im Widerstand gegen seine eigenen Forschungsergebnisse – darauf bestehen, dass alle Ereignisse der Zukunft sich wenigstens prinzipiell streng determiniert aus den Gegebenheiten der Vergangenheit herleiten lassen. „Gott würfelt doch!“, so müssen wir aufgrund der Einsichten der Quantenmechanik nun sagen. Denn die Beschreibung durch Quantenwahrscheinlichkeiten weist dem Zufall in der Quantenwelt eine fundamentale Rolle zu. Im Gegensatz zum *subjektiven* (*kausalen*) Zufall in der klassischen Physik haben wir es in der Quantenwelt mit einem *objektiven* (*akausalen*) Zufall zu tun, wie folgendes Beispiel belegt:

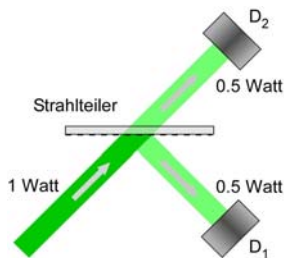


Abb. 1

Betrachten wir eine halbversilberte Glasplatte (Strahlteiler), die 50% eines einfallenden Lichtstrahls reflektiert und 50% durchlässt (Abb. 1), sodass die Detektoren D1 und D2 gleiche Intensitäten messen. Fasst man den Lichtstrahl als Strom von Photonen auf, registriert jeder Detektor im Mittel $N/2$ Photonen, wenn N Photonen auf den Strahlteiler gesandt werden (Abb. 2).

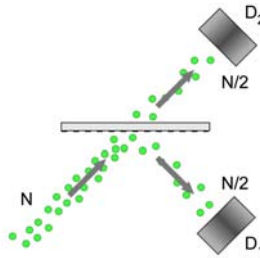


Abb. 2

Schicken wir nur ein einzelnes Photon auf den Teiler, können wir nicht mehr vorhersagen, welcher Detektor das Photon registrieren wird (Abb. 3). Dies ist ein kompletter Zusammenbruch der Kausalität, da eine gegebene Ursache (Photon trifft Strahlteiler) zwei unterschiedliche Wirkungen (Nachweis durch D1 oder D2) haben kann.

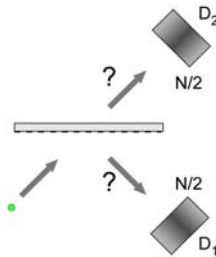


Abb. 3

Die Quantenmechanik erlaubt uns keine Aussage für Einzelereignisse, sondern sagt lediglich voraus, dass bei vielfacher Wiederholung die Hälfte der Photonen von D1 und die andere von D2 nachgewiesen werden.

Man würde erwarten, dass jedes Photon mit einer 50-prozentigen Wahrscheinlichkeit vom Strahlteiler reflektiert oder durchgelassen wird. Die Quantenmechanik hingegen lehrt uns: Jedes Photon wird sowohl reflektiert als auch durchgelassen. Bis zu seinem Nachweis bleibt das Photon delokalisiert, d.h. seine Wellenfunktion besteht aus zwei miteinander verknüpften Teilen, die sich gleichzeitig auf die Detektoren zubewegen. Beim Nachweis des Photons fällt die Wellenfunktion sozusagen in einem der Detektoren in sich zusammen, man spricht von einem Kollaps der Wellenfunktion.

Um die Kausalität zu retten, wurde spekuliert, ob das Photon, ähnlich wie die hochgeworfene Münze, eine verborgene Information über den einzuschlagenden Weg in sich trägt (*hidden variable*). Durch zahlreiche Experimente konnte jedoch die Existenz solcher verborgenen Variablen widerlegt werden (Bell'sche Ungleichungen).

Dass das Photon beide Wege gleichzeitig nimmt, ist keine abstrakte Hypothese, sondern eine physikalische Realität, welche sich mit einer von den Autoren entwickelten Apparatur sogar in der Vorlesung demonstrieren lässt.

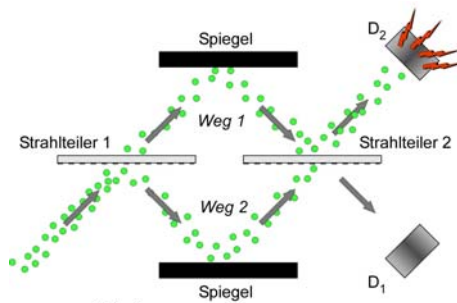


Abb. 4

Hinter dem Strahlteiler 1 werden die Lichtwege mit Spiegeln umgelenkt und durch einen zweiten Strahlteiler wieder vereinigt. Jedes Photon kann somit auf zwei verschiedenen Wegen zu einem gegebenen Detektor gelangen. Falls die Wege gleich lang sind, werden alle Photonen vom Detektor D2

registriert, und keines der Photonen fällt auf den Detektor D1. Dieses Phänomen der destruktiven Interferenz ist bekannt bei starken Lichtstrahlen und dient als Beweis für die Wellennatur des Lichts. Bei einzelnen Photonen kann deren Abwesenheit in D1 nur durch die Annahme erklärt werden, dass jedes Photon, d.h. seine Wellenfunktion, beide Wege gleichzeitig genommen hat. Im Verschwinden der Photonen äußert sich die destruktive Interferenz der beiden Teilwellen. Zwingt man das Photon, einen spezifischen Weg einzuschlagen, indem man den andern Weg blockiert (Abb. Fig.5), macht man die seltsam anmutende Beobachtung, dass der Detektor D1 wieder Photonen registriert. Das Photon, welches den oberen Weg nimmt, „spürt“ somit, ob der untere Weg offen ist oder nicht.

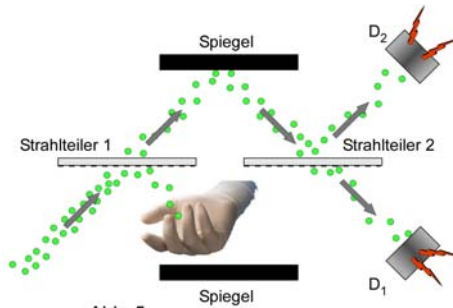


Abb. 5

QUO VADIS?

Resümieren wir kurz die wichtigsten Ergebnisse der Quantenmechanik, die seit den Anfängen des 20. Jahrhunderts in Geltung ist:

- Das Postulat der Quantisierung des Lichts in Form von Korpuskeln (Photonen) markiert die Geburtsstunde der Quantenmechanik.
- Die Welt des Aller kleinsten (atomare und sub-atomare Skala) wird durch die Gesetze der Quantenmechanik regiert.

- Diese Gesetze beinhalten z.B., dass ein Objekt gleichzeitig an zwei Orten sein kann.
- Dadurch ist die Möglichkeit einer Weltformel in Form einer geschlossenen Kausalkette naturwissenschaftlich widerlegt.

Die Gesetze der Quantenmechanik, so bizarr sie auch scheinen mögen, stellen die physikalische Realität dar – und fast alle modernen Technologien (Mikro-Elektronik, Handy, Computer, medizinische Bildgebung, Laser, digitale Photographie, usw.) beruhen auf Anwendungen der Gesetze der Quantenmechanik.

Unlängst konnten Physiker den quantenmechanischen Zufall „zähmen“ und ihn einsetzen, um Nachrichtenübertragungen auf absolut sichere Art zu verschlüsseln. In Zukunft werden Quantencomputer, in denen der Quantenzufall eine fundamentale Rolle spielt, möglicherweise eine neue technologische Revolution bewirken.

Kausalzusammenhänge behalten weiterhin ihren Stellenwert in den sogenannten exakten Naturwissenschaften. Sie beschreiben die Wirklichkeit jedoch nicht vollständig. Der akausale Quantenzufall gesteht uns eine offene Zukunft zu.



VERÖFFENTLICHUNGSNACHWEIS

Die Abschiedsvorlesung von Prof. Dieter Hattrup ist in zwei Teilen in der „Schweizerischen Kirchenzeitung“ abgedruckt: SKZ 29-30/2016 und SKZ 31-32/2016.

Die Beiträge von Antoine Weis und Todorka L. Dimitrova wurden im Magazin UNIVERSITAS der Universität Freiburg Schweiz veröffentlicht:

- Licht: Wellen oder Teilchen?, in: UNIVERSITAS Juni 2005, 36-38.
- Quantenphysik: vom subjektiven zum reinen Zufall, in: UNIVERSITAS Dezember 2007, 25-26.

Der Inhalt beider Artikel bildete die Grundlage für den Vortrag von Antoine Weis am 1. Juni 2016. Für die Publikation in diesem Band wurden die beiden Texte sprachlich leicht überarbeitet und aufeinander abgestimmt. Sie sind durch Graphiken zum Vortrag vom 1. Juni 2016 ergänzt.



AUTORENVERZEICHNIS



Dieter HATTRUP studierte Mathematik, Physik und Theologie. Er promovierte in Mathematik und Theologie und habilitierte sich für Dogmatik. Er ist Priester der Erzdiözese Paderborn und Professor für Dogmatik und Dogmengeschichte an der Theologischen Fakultät Paderborn. Von 2005 bis 2016 war er Gastprofessor für Dogmatik an der Theologischen Fakultät der Universität Freiburg Schweiz.

Todorka L. DIMITROVA ist assoziierte Professorin für Experimentalphysik an der Paisii Hilendarski-Universität in Plovdiv (Bulgarien) und seit 2009 als Gastprofessorin an der Universität Freiburg Schweiz tätig. Sie forscht über moderne Optik, medizinische Physik, Polymerphysik und Wissenschaftskommunikation. Sie schreibt Poesie und ist in der Enzyklopädie „Notable people of Plovdiv“ aufgeführt.



Antoine WEIS ist Professor für Atomphysik/Quantenoptik an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Freiburg Schweiz. Er leitet die Forschungsgruppe *Fribourg Atomic Physics*. Seine Arbeiten werfen u.a. neues Licht auf die Abwesenheit von Antimaterie im Kosmos und die Natur der dunklen Materie im Universum.



EPIPHANIA · EGREGIA

- 13 Dieter HATTRUP / Antoine WEIS, Physik und Theologie – gestern und heute, hg. von Barbara Hallensleben. 34 S. EUR 8.- / CHF 9.-.
- 12 Einheit in Synodalität. Die offiziellen Dokumente der Orthodoxen Synode auf Kreta. 18. bis 26. Juni 2016, hg. von Barbara Hallensleben. IV + 112 S. 2016. EUR 12.- / CHF 14.-.
- 11 Jürg MEIER, Trauerfeiern. 114 S. 2016. EUR 9,80 / CHF 12.-.
- 10 Barbara HALLENSLEBEN / Simon HELBLING, Wie durch Feuer. Leben und Sterben des Jan Hus. Theaterstück und szenische Lesungen nach einem Hörspiel von Edzard Schaper. 77 S. 2015. EUR 8,80 / CHF 9,80.
- 9 Cinzia MINERVINI JORDAN, Being and Becoming. Reading Arthur Miller's *Focus* and "The Crucible" through Giorgio Agamben. Edited and with a preface by Thomas Austenfeld. 116 S. 2012. EUR 10,80 / CHF 13,80.
- 8 Wilm SANDERS, O komm, Immanuel! 50 Aspekte zur Advents- und Weihnachtszeit. 152 Seiten. 2015, EUR 12,- / CHF 15,-.
- 7 Hugo RAHNER, Maria und die Kirche. Vorreden zur Sophiologie. Herausgegeben von Klaus Wyrwoll. Mit einem Vorwort von Yves Congar und einem Geleitwort von Barbara Hallensleben. 111 + XIII Seiten, 2011. EUR 10,80/CHF 13,80.
- 6 Gemeinsamer Glaube und pastorale Zusammenarbeit. 25 Jahre Seelsorgegemeinschaft zwischen der Syrisch-Orthodoxen Kirche und der Römisch-Katholischen Kirche. Herausgegeben von Johannes Oeldemann. 99 Seiten, 2011. EUR 8,80 / CHF 12,80.

- 5 Fairy von Lilienfeld. 1917–2009. Herausgegeben von Ruth Albrecht und Ruth Koch. 143 Seiten, 2011. EUR 12,80 / CHF 15,80.
- 4 Maja TSCHUMI – SIMON HELBLING, APOKALYPSE. Das Theater / Giorgio AGAMBEN, Kirche und Herrschaft. 64 Seiten, 2011. EUR 7,80 / CHF 11,80.
- 3 Walter NIGG, Ein Wörtlein über meine Bücher – und andere autobiographische Texte. Herausgegeben von Barbara Hallensleben und Uwe Wolff. 119 Seiten, 2010. EUR 9,80 / CHF 14,80.
- 2 Wilm SANDERS, Epiphanie. Eine Wiederentdeckung in 40 Aspekten. Mit einer Meditation von Uwe Wolff. Herausgegeben von Nikolaus Wyrwoll und Barbara Hallensleben. 148 Seiten, 2010. EUR 9,90 / CHF 14,80.
- 1 Edzard SCHAPER, Händel-Brevier. Aus dem unvollendeten, unveröffentlichten Roman. Zusammengestellt von Paul Hostettler. Eingeleitet von Uwe Wolff und Luca Zoppelli. Herausgegeben von Barbara Hallensleben. 145 Seiten, 2009. EUR 19,80 / CHF 28,00.