



Lothar Kolditz (MLS)

Über Entwicklung von Erkenntnis und rational wissenschaftlicher Denkweise

Vortrag in der Klasse für Naturwissenschaften und Technikwissenschaften am 8. Februar 2018

Veröffentlicht: 10.02.2018

Die Anfänge

Als bei der Gattung *homo* nach und nach die Herausbildung von Bewusstsein erfolgte, war auch der Grund gelegt für weitere Fragestellungen, das gesamte Dasein betreffend.

Die Ereignisse in der Natur ringsum waren nicht direkt zu verstehen, also wurden Antworten außerhalb der Natur, im Übernatürlichen gesucht. Es kam zum Glauben an übernatürliche Mächte, an Götter. Die Ursprünge der Religionen und Mythen entstanden. Lebenserfahrungen fanden dabei ihren Ausdruck, sie wurden zu Verhaltensregeln verdichtet, die für ein gedeihliches Zusammenleben nützlich sein sollten, aber zunächst noch von der Furcht vor unbekanntem Mächten geprägt waren, die von Göttern ausgeübt wurden. Die Götter sollten besänftigt werden: Menschenopfer; aber auch Tier-, und Sachopfer, wurden als geeignete Maßnahmen angesehen, um das Wohlwollen der unbekanntem Macht zu erreichen.

Erfahrungen und evolutionsmäßige Weiterentwicklungen trugen auch in den Religionskonzepten zu Fortschritten bei. Es erfolgte ein Wandel in der Opfertätigkeit und zum Teil ein Übergang zum Monotheismus.

Die Abkehr von Menschenopfern wird z. B. geschildert in der Geschichte von Abraham und der Opferung Isaaks, wie sie in der Genesis [1] festgehalten ist. Gott wollte Abraham prüfen und befahl ihm, seinen einzigen Sohn Isaak an einem Ort, den Gott ihm zeigen wollte, zu opfern. Abraham spaltete Holz zum Brandopfer, gürtete seinen Esel und nahm seinen Sohn Isaak mit. Er ging zur Brandopferstelle, schichtete das Holz auf und bereitete alles vor, band seinen Sohn und legte ihn auf das Holz. Als er das Messer fasste, um seinen Sohn zu opfern, hielt der Engel des Herrn Abraham von weiterem Tun ab und sagte, dass Gott nun wisse, dass Abraham Gott fürchte. Abraham sah einen Widder mit seinen Hörnern in der Hecke hängen und opferte nun ihn an Stelle von Isaak.

Dass in den religiösen Schriften Erinnerungen an Katastrophen verwertet wurden, wird deutlich in der Schilderung von besonderen Ereignissen in der Bibel, wie der Sintflut und auch des Untergangs von Sodom und Gomorra, deren Analogien auch in anderen Religionen und Mythen zu finden sind.

Die Erkenntnisentwicklung im religiösen Gebiet sollte aber nur gestreift werden, ausführlichere Betrachtungen gelten der Entwicklung der rational wissenschaftlichen Denkweise.

Übergang zu wissenschaftlicher Denkweise

Es brauchte natürlich eine geraume Zeit, bis rationale wissenschaftliche Erklärungen der natürlichen Vorgänge gegenüber dem von Mythen und Göttern geprägten Weltbild in den Vordergrund rückten. Das ist selbst heute in den religiösen Vorstellungen trotz des Einflusses der Wissenschaft und trotz der Erfolge der Naturwissenschaften nicht erreicht.

Es gibt eine Reihe von Kriterien, mit Hilfe derer die Entwicklung des wissenschaftlichen Denkens verfolgt werden kann. In diesem Vortrag wird dazu die Auffassung von Raum und Zeit ausgewählt und als Beispiel für Europa und Vorderasien zunächst die Entwicklung der Geometrie in der Antike betrachtet.

Es war die Beschäftigung mit Mathematik, besonders mit Geometrie, die im alten Ägypten, Babylonien und in Griechenland das rationale wissenschaftliche Denken förderte. Von den Vorsokratikern sind in dieser Hinsicht vor allem *Thales von Milet* (624/3 - 548/4 v.u. Z.) und *Pythagoras von Samos* (570 - 510 v.u.Z.) zu nennen, deren Lehrsätze auch heute noch Bestand haben. *Thales* hat die Tatsache genutzt, dass zu der Zeit, wenn ein senkrechter Stab einen Schatten von gleicher Länge wie seine Höhe liefert, auch die Höhe von größeren Bauwerken, wie z. B. den Pyramiden, durch Messung der Schattenlänge zu ermitteln ist. Hierbei wird deutlich, wie die Abstraktion in die Denkweise einzieht und systematische und genaue Beobachtung Besitz ergreift.

Pythagoras verdanken wir auch Grundlagen der Musiktheorie, die Darstellung der harmonischen Intervalle durch einfache Zahlenverhältnisse.

Die Entwicklung der Geometrie und der Zahlentheorie in der Antike wurde von *Euklid von Alexandria* im 3. Jahrhundert v.u.Z. zu dem Wissenschaftszweig zusammengefasst, der heute noch gilt.

Es sei auch an *Eratosthenes von Kyrene* (276/3 - 194 v.u.Z.) [2] erinnert, der die Bibliothek von Alexandria ein halbes Jahrhundert leitete und den Erdumfang durch Messung der Schattenlängen bzw. der Schattenwinkel zur Sommersonnenwende in Alexandria und in Syene (heute Assuan) bestimmte. Er nahm an, dass beide Orte auf demselben Längengrad liegen. Die Schattenzeiger seines Gerätes zeigten Mittags in Syene keinen Schatten, in Alexandria wich die Sonne zu diesem Zeitpunkt um 7° 12' vom Zenit ab. Die Entfernung zwischen Alexandria und Syene ließ er durch Schrittzähler bestimmen. Die Übertragung seiner Angaben in heutige Werte ergibt für seine Bestimmung des Erdumfangs einen Fehler von 4,2%.

Das Weltbild

Es sind stets gleitende Übergänge in der immer stärker werdenden rationalen wissenschaftlichen Betrachtung der Welt vorhanden. Die scharfen Überlegungen der mit Geometrie befassten Denker verursachten schließlich die Herstellung größerer Zusammenhänge und die immer deutlicher werdende wissenschaftliche Ausrichtung der Denkweisen.

Es sei auf *Demokrit von Abdera* (460/59 bis 371 v.u.Z.) hingewiesen, der das unteilbare Atom als kleinsten Baustein der Welt propagierte und so mit dem Atomismus eine neue Qualität der Denkrichtung schuf, die weit über seine Zeit hinaus wirkte. Er beeinflusste *Epikur* (341 - 271 v.u.Z.), der seine Lehren weiterführte.

Bei *Sokrates* (470 - 399 v.u.Z.) und seinem Schüler *Platon* (428/7 - 348/7 v.u.Z.) und dessen Schüler *Aristoteles* (384 bis 322 v.u.Z.) wird die Weiterentwicklung des Weltbildes offensichtlich. Das sind auch die Philosophen, die die wissenschaftliche Denkweise ausschließlich bis zum Mittelalter geprägt und dominiert haben.

Arabische Mathematiker traten vor allem um die Jahrtausendwende mit astronomischen Beiträgen in Erscheinung. Sie fußten auf der antiken Mathematik Griechenlands und vertraten die Ansichten von *Aristoteles*. *Dieter B. Herrmann* hat ihre Rolle in seinem Buch „Die Harmonie des Universums“ ausführlich beschrieben [3].

Im Mittelalter aber sorgten Fortschritte in den Naturwissenschaften und in der Mathematik für einen neuen Impuls.

Galileo Galilei (1464-1542) hat mit seinen Experimenten, genauen Beobachtungen, quantitativem Messen und mathematischer Berechnung die naturwissenschaftliche Methode begründet. Die Beobachtung der vier Jupitermonde mit einem von ihm hergestellten Fernrohr in Anlehnung an die Erfindung in Holland und die Entdeckung der Venusphasen führten ihn zur Ablehnung des ptolemäischen geozentrischen Weltbildes und zur Befürwortung des kopernikanischen heliozentrischen Weltbildes, das ihm die Verurteilung durch die Inquisition der Kirche einbrachte. Dieses Urteil wurde erst 1992 unter *Papst Johannes Paul II.* aufgehoben.

Nikolaus Kopernikus (1473-1543) beschrieb in seinem Hauptwerk *De revolutionibus orbium coelestium* das heliozentrische Weltbild, allerdings mit kreisförmigen Planetenbahnen.

Johannes Kepler (1571-1630), der von *Tycho de Brahe* (1546-1601) nach Prag eingeladen worden war und dessen genaue Beobachtungen der Planetenbahnen auswertete, ersetzte die Kreisbahnen von *Kopernikus* durch Ellipsen (*Keplersche Gesetze*), was die Planetenbahnen richtig wiedergibt. Mit *Newtons* Gravitationsgesetz war dann auch die Erklärung der Keplerschen Gesetze gegeben.

René Descartes (1596-1650) ist Begründer der analytischen Geometrie. Durch sein rationalistisches Denken (*cogito ergo sum*) kann er zu den Wegbereitern der Ideen von *Leibniz* gerechnet werden.

Aufbruch in eine neue Zeit

Europa wurde auch in dieser Zeit nicht nur vom Fortschritt geprägt, sondern stand gleichfalls unter dem Einfluss der Religion, bzw. der auf sie aufbauenden Macht der Kirche, die sich durch Engstirnigkeit und Machtmissbrauch ihrer hohen Vertreter als wenig förderlich erwies.

Dennoch war die wissenschaftliche Erkenntnis in ihrem Voranschreiten nicht aufzuhalten, was am Beispiel von *Gottfried Wilhelm Leibniz* (1646 - 1716) und *Isaac Newton* (1643 - 1727) deutlich wird. Die Auffassungen von *Leibniz* sind wohl am umfangreichsten in seiner *Theodizee* vorhanden, *Newton* hat seine Ideen in den *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* und in den *Opticks* niedergelegt.

Beide gerieten nicht in Verdacht, abtrünnige Lehren zu verbreiten, weil sie ihre Überlegungen auch mit theologischen Formulierungen verbanden. Die Ausführungen von *Leibniz* und *Newton* zur Physik und zum Charakter von Raum und Zeit wurden immer unter Einbeziehung der Allmacht Gottes geführt.

Bei allen Betrachtungen wurde der theologische Unterbau herangezogen, so die *Leibnizsche* Grundauffassung, dass Gott die beste aller möglichen Welten geschaffen hat.

Ihren deutlichen Ausdruck finden die naturphilosophischen Ansichten von *Leibniz* und *Newton* in dem Briefwechsel zwischen *Leibniz* und *Samuel Clarke* (1675 - 1729). *Leibniz* schrieb seine Briefe in französischer Sprache. Es gibt eine Reihe von Veröffentlichungen zu diesem Briefwechsel. Ich beziehe mich auf die englische Übersetzung von *Jonathan Bennett* [4], der auch Übersetzungsfehler von *Clarke* berücksichtigt und kommentiert hat. Unter den zahlreichen Ausführungen zum Briefwechsel sollen noch die von *E. Knobloch* und *D. Burckhardt* [5] genannt werden.

Im Briefwechsel ging es vor allem um naturphilosophische Auffassungen von *Leibniz* und *Newton*, wobei auch die Ansichten zum Charakter von Raum und Zeit diskutiert wurden, die uns im Zusammenhang mit dem Vortrag interessieren. Der Streit zwischen *Leibniz* und *Newton* um die Priorität bei der Erfindung der Infinitesimalrechnung wirkte wohl im Hintergrund als Antrieb für den Briefwechsel mit.

Leibniz hat seine Briefe an *Prinzessin Caroline*¹ nach London gesandt, die die Briefe wegen ihres stark theologischen Inhaltes an den Philosophen und Theologen *Clarke* weitergab, einem Vertrauten und Schüler *Newtons*, der dessen Ansichten vertrat.

Die Diskussion in den Briefen an *Caroline* und in den Antworten von *Clarke* kann als indirekter Austausch zwischen *Leibniz* und *Newton* gesehen werden. Es ist wohl anzunehmen, dass *Clarke* stets eine Abstimmung mit *Newton* vornahm.

Die Auffassungen von Raum und Zeit sind in den 5 Briefen von *Leibniz* und den darauffolgenden Antworten von *Clarke* verteilt. Besonders ausführlich wurde im 5. Brief von *Leibniz* das Thema behandelt und in der entsprechenden Antwort von *Clarke*.

¹ *Wilhelmina Charlotte Caroline von Brandenburg-Ansbach* (1683-1737) [6], geborene Markgräfin von Brandenburg-Ansbach wurde mit *Leibniz* über *Sophie Charlotte von Hannover*, der Ehefrau von Friedrich I. und ab 1701 Königin von Preußen, bekannt. *Prinzessin Caroline* heiratete 1705 *Georg August* (1683-1760), den Neffen von *Sophie Charlotte*, ab 1727 als *Georg II.* König von Großbritannien und Irland. *Prinzessin Caroline* war sehr wissbegierig und hielt am Hannoveraner Hof Verbindung zu *Leibniz*, die nach dem Umzug des Hannoveraner Hofes 1714 nach London als Korrespondenz weitergeführt wurde. *Prinzessin Caroline* förderte *Georg Friedrich Händel*, der ihr seine Wassermusik widmete.

Grundlegend in den Betrachtungen von *Leibniz* sind immer drei Prinzipien:

1. Gott hat von allen möglichen Welten die beste geschaffen.
2. Die prästabilisierte Harmonie als eine vorbestimmte Harmonie, die im gesamten Universum repräsentiert ist. Der Harmoniegedanke durchzieht bereits die antike Denkweise und findet auch in der neuen Zeit ständige Resonanz [3].
3. Das Prinzip vom zureichenden Grund. Es besagt, dass nichts ohne zureichenden Grund geschieht. Dieses Prinzip wurde schon vor Leibniz diskutiert (*nihil fit sine causa*), er hat es ausgebaut.

In dem letzten Briefwechsel wird deutlich, dass die Diskussion weiter geführt worden wäre. Sie wurde durch den Tod von *Leibniz* abgebrochen.

Der Raum ist für *Newton* von absolutem Charakter. Er ist vorhanden, Materie kann in ihm platziert werden, und auf sie wirken die physikalischen Gesetze. Die absolute, wahre und mathematische Zeit fließt für *Newton* gleichmäßig dahin und ist ihrer Natur nach ohne Beziehung zu etwas Äußerem.

Den absoluten Raum lehnt *Leibniz* ab. In seiner Argumentation verwendet er ein Gedankenexperiment. Er geht aus von der Besetzung der Punkte im Raum zu einem bestimmten Zeitpunkt. Werden nun alle besetzten Punkte um den gleichen Betrag in gleicher Richtung verschoben, so entsteht ein Zustand, der von dem Ausgangszustand nicht zu unterscheiden ist. Aus dieser fehlenden Unterscheidbarkeit beider Zustände lehnt er den absoluten Raum ab.

Leibniz lehnte auch die absolute Zeit ab mit der Argumentation, dass Gegenstände, die auf einem bewegten Körper feste Abstände haben, diese in der Zeit relativ zueinander nicht verändern, aber sich dennoch zu verschiedenen Zeiten an verschiedenen Punkten des Raumes befinden.

Er ist damit der aus den Relativitätstheorien *Einsteins* folgenden Auffassung nahe gekommen, aber natürlich nicht auf einer gleichen Grundlage. Seine Schlussfolgerungen basierten auf bereits erwähnten grundsätzlichen Prinzipien, wie dem zureichenden Grund für jedes Ereignis und dem Prinzip, dass Gott die beste aller möglichen Welten geschaffen habe.

Für *Leibniz* sind Raum und Zeit relativ, der Raum ist eine mögliche Ordnung der Dinge, die nebeneinander bestehen und die Zeit ist eine Ordnung der Aufeinanderfolge. Die Auffassung von Raum und Zeit nach *Newton* und *Leibniz* und in der modernen Physik hängen eng mit den verwendeten Geometrien zusammen, die zur Lösung der entsprechenden Feldgleichungen herangezogen werden.

Raum und Zeit in den verschiedenen physikalischen Modellen

Die Ansichten in der griechischen Philosophie, zusammengefasst im Atomismus, waren mit der Euklidischen Geometrie verbunden in der Trennung von Raum und Zeit.

Im Mittelalter mit der allmählichen Abkehr von der Philosophie des *Aristoteles* reichte diese Auffassung noch aus. Für *Newtons* Physik sind in der Darstellung die drei Raumkoordinaten wichtig und eine davon unabhängige Zeit, das gilt für die gesamte Klassische Physik

Für die *Spezielle Relativitätstheorie* und die *Allgemeine Relativitätstheorie Einsteins* ist diese Geometrie nicht mehr ausreichend. Die *Spezielle Relativitätstheorie* lässt sich in einem *Minkowski-Raum* mit drei Koordinaten des *Euklidischen Raumes* darstellen, dazu kommt eine vierte Koordinate für die Zeit.

In der Raumzeit der *Allgemeinen Relativitätstheorie* ist der dreidimensionale Raum mit der Zeit zu einer vierdimensionalen Struktur vereint. In der *Allgemeinen Relativitätstheorie*, die die Gravitation einbezieht, ist die Raumzeit gekrümmt. In ihr eilt das Licht nicht in gerader klassischer Geometrie von Punkt zu Punkt, sondern verfolgt gekrümmte Linien, wenn es von Massen beeinflusst wird. Die Raumzeit wird von den vorhandenen Massen bestimmt. Massenveränderungen bewirken auch Änderungen der gekrümmten Raumzeit.

Es besteht die Frage, ob Massenveränderungen und die Änderung der gekrümmten Raumzeit der quantenwellenmechanischen Verschränkung unterliegen oder mit Lichtgeschwindigkeit vermittelt werden. Auf die Verschränkung kommen wir noch zurück.

Die Theorien und das Vakuum

Eine weitere Frage mit hoher Abstraktion bezieht sich auf den leeren Raum.

Bei den griechischen Atomisten und so auch in der Auffassung des *Aristoteles* gilt das Atom als letzter nicht mehr teilbarer Körper. Zwischen den Ansammlungen von Atomen in festen Stoffen ist der Raum leer.

Für *Newton* ist der Raum den Atomisten der griechischen Philosophen folgend mit undurchdringlichen Körpern verschiedener Größe angefüllt, die sich frei bewegen. Zwischen den Körpern ist nichts vorhanden.

Leibniz hingegen leitet aus der Vollkommenheit Gottes die Aussage ab, dass es keinen Raum ohne Materie, also keinen leeren Raum geben kann. Gott hat in seiner Vollkommenheit den Raum vollkommen ausgefüllt.

In der modernen Physik wird das Vakuumproblem vor allem in der Quantenelektrodynamik aufgegriffen und führte zur Formulierung der Vakuumfluktuation.

Das von *Paul Dirac* (1902 - 1984) vorausgesagte und von *Carl David Anderson* (1905 - 1991) entdeckte Positron und dessen Annihilation beim Zusammentreffen mit einem Elektron ergibt die Aussendung von Gammastrahlung. Andererseits kann ein Photon mit einer Energie von $>1\text{MeV}$ Anlass zur Paarbildung sein, also der Entstehung eines Positrons und eines Elektrons. Das haben *Irène Curie* (1897 – 1956) und *Frédéric Joliot* (1900 -1958) im Jahre 1933 nachgewiesen.

Das Vakuum ist nach Auffassung der Vakuumfluktuation kein leerer Raum, sondern erfüllt von der Möglichkeit der Erscheinung der Paarbildung und deren nachfolgende Zerstrahlungsreaktion.

Die Vakuumpolarisation ist ein quantenelektrodynamischer Prozess. Durch Vakuumfluktuation wird das Vakuum selbst zu einem polarisierbaren Medium.

Daraus ist auch der Schluss zu ziehen, dass es keinen leeren Raum gibt, die aus anderem Grund gemachte Aussage von *Leibniz* wird bestätigt.

Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass diese einfache Deutung mit virtuellen Teilchen, die im leeren Raum die Möglichkeit der Erscheinung der Paarbildung von Elektron und Positron beinhalten, nicht unwidersprochen geblieben ist. *Arnold Neumaier*, *The Physics of Virtual Particles* [7] erläutert, dass virtuelle Teilchen nur eine Bedeutung im Rahmen der technischen Sprache der Quantenfeldtheorie haben, nicht aber darüber hinaus. Sie können nach seiner Meinung nicht zum Auftreten der Paarbildung im leeren Raum mit nachfolgender Zerstrahlungsreaktion herangezogen werden.

Der Raum ist nicht nur erfüllt mit Materie und Energie, sondern in ihm existieren auch Kraftfelder: elektromagnetische Felder, Magnetfelder zwischen Magnetpolen, deren Wirkung durch Eisenfeilspäne demonstriert werden kann, und die Gravitationsfelder.

Ganz abgesehen von diesen Erkenntnissen ist es experimentell nicht möglich, einen teilchenfreien Raum zu schaffen. Wir wissen, dass ein im Labor erreichbares extrem hohes Vakuum (XHV) mit $<10^{-12}$ mbar (hPa) definiert ist, und noch $<10^4$ Moleküle pro cm^3 enthält, deren freie Weglänge nun $>10^5$ km beträgt. Im interstellaren Raum gibt es Gebiete, für die ein Druck von 10^{-18} mbar angegeben wird.

An dieser Stelle soll das Problem der Supervoids erwähnt werden. Uns umgibt die Hintergrundstrahlung aus dem Urknall von 2,7K. Wenn sich ein Photon durch einen superleeren Raum bewegt, verliert es durch die Gravitationskräfte im hinter ihm liegenden Raum Energie, die es wieder erhält durch die Gravitationskräfte im vor ihm liegenden Raum. Das gilt aber nur für ein ruhendes Weltall und nicht für ein expandierendes Weltall. In einem expandierenden Weltall müsste das Photon, das aus einem dichteren Medium austritt, mehr Energie verlieren als es durch das vor ihm liegende Medium zurückerhält, weil dieses nun durch die Expansion des Weltalls eine geringere Gravitationswirkung aufweist. *István Szapudi* [8] meldete die Entdeckung einer derartigen Supervoid in einem merkwürdigen kalten Fleck in der Hintergrundstrahlung, was aber nicht ganz ohne Widerspruch geblieben ist.

Ein weiteres Nachdenken über den leeren Raum ist durchaus angebracht. Eine Anregung dazu liefert das Buch von *James Owen Weatherall* mit dem Titel: *Void – The Strange Physics of Nothing* [9].

Die Gravitation

Kommen wir nun zurück zu einer Betrachtung der Gravitation. Sie ist eine besondere Kraft, die schon dadurch auffällt, dass sie nach unserem Wissen als einzige Kraft nicht abschirmbar ist. Ihr Wirken als Kraft wird wohl niemand bezweifeln, auch wenn in der Diktion der Allgemeinen Relativitätstheorie zum Ausdruck kommt, sie sei keine Kraft, sondern vielmehr die Ursache für die Krümmung der Raumzeit.

Newton war der Auffassung, dass alle Massen im Universum sich gegenseitig anziehen, und zwar nach dem Gesetz

$$F = G \frac{M_1 \times M_2}{r^2}$$

F ist die Gravitationskraft, G die Gravitationskonstante, M_1 und M_2 sind die sich anziehenden Massen und r ist ihre Entfernung.

Das Gesetz gibt die Wirkung der Kraft wieder. Näherungsweise können entfernte Massen bei der Berechnung vernachlässigt werden. Das Gesetz ist klassisch gültig, und seine Anwendung hat schließlich u. a. die Raumfahrt ermöglicht.

Die bisher nicht geglückte Vereinigung der schwachen und der starken Wechselwirkung im Atomkern und der elektromagnetischen Kraft mit der Gravitationskraft oder die nicht geglückte Vereinigung der Quantenphysik mit der *Allgemeinen Relativitätstheorie*, die Quantengravitation, sollte zum Nachdenken über die Sonderstellung der Gravitation führen.

Wir wissen, dass die Gravitation überall zwischen den vorhandenen Massen wirkt. So wie wir mit *Newtons* Gravitationsgesetz nur die Wirkung und nicht die Art der Kraft erfassen, so erfassen auch alle anderen Feldgleichungen, die *Einsteinschen Gleichungen* der *Allgemeinen Relativitätstheorie* und die Gleichungen aller anderen modernen Theorien nur die Wirkung und nicht den Grund für das Auftreten der Gravitationskraft. Wir sind auch mit den modernen Theorien bezüglich der Charakterisierung der Art der Gravitationskraft nicht weiter gekommen als bei *Newton*, auf den *Clarke* in der Antwort auf den 5. Brief von *Leibniz* zurückkommt [4], in dem er auf die *Principia* verweist und *Newton* zitiert, der bekennt, nicht fähig zu sein, vom Phänomen der Gravitation den Grund für ihr Auftreten abzuleiten.

Es besteht ein Gravitationsfeld. Man kann sich nun die Frage stellen, ob in diesem Feld alle Wirkungen mit Lichtgeschwindigkeit nach *Einstein* weitergegeben werden oder unter welchen Umständen im Gravitationsfeld die quantenphysikalische Verschränkung auch eine Rolle spielen könnte.

Erstmals gab es im September 2015 direkte Hinweise auf die Existenz von Gravitationswellen, als Daten von zwei laserinterferometrischen Aufbauten unabhängig voneinander entsprechende Informationen lieferten. Nach Auswertung der Daten im Februar 2016 wurde ihre Entdeckung offiziell bekannt gegeben. Die so nachgewiesenen Gravitationswellen wurden der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher mit insgesamt 65 Sonnenmassen vor 1,3 Milliarden Jahren zugeordnet. Drei Sonnenmassen an Energie wurden dabei in Form von Gravitationswellen abgestrahlt [10]. In der Folge wurden 2016 und 2017 weitere Entdeckungen von Gravitationswellen gemeldet, die auch neue Erkenntnisse über die durch Gravitation gebildeten Schwarzen Löcher und Erklärungen für die Dunkle Materie versprechen [11].

Die Einrichtung der erforderlichen Messgenauigkeit, der Ausschluss von mikroseismischen Störungen bis hin zu Erschütterungen durch fahrende Lastwagen oder fallende Bäume und die Erreichung der laseroptischen Konstanz war mit einem Riesenaufwand von zahlreichen Wissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern verbunden, der im Buch „Das Geheimnis der Gravitationswellen“ von *Günter Spanner* [12] eindrucksvoll beschrieben wird. *Andreas Müller* würdigt in seinem Buch „10 Dinge, die Sie über Gravitationswellen wissen wollen“ besonders die hohen technischen Leistungen, die in Zusammenarbeit vieler Einrichtungen zum Erreichen der notwendigen Empfindlichkeit der Anlage erbracht wurden und erläutert die physikalische und mathematische Behandlung des Gebie-

tes [13]. In [10] werden 104 Autoren und 103 mitwirkende Institute und Einrichtungen aus aller Welt genannt.

Die damit möglich gewordene Gravitationswellenastronomie wird sicherlich zu einer großen Erweiterung unserer Erkenntnis vom Universum führen. Ein erstes herausragendes Ergebnis ist die im August 2017 über Gravitationswellen erfolgte Registrierung der Verschmelzung zweier Neutronensterne mit der Aufklärung der Entstehung von kurzen Gammablitzen, die in wenigen Sekunden so viel elektromagnetische Energie abstrahlen wie die Sonne in Milliarden von Jahren. Im Laufe der Verschmelzung wurden besonders schwere Atomkerne wie die von Gold, Platin und Uran gebildet [14, 15].

Die Gravitationswellenastronomie wird die bisher im Wesentlichen über elektromagnetische Signale erfolgte Erkundung des Weltalls wirksam ergänzen. Positiv wird sich dabei auswirken, dass die Gravitationswellen nach heutiger Kenntnis Materie weitgehend ungehindert durchdringen und zum Beispiel interstellare Staubwolken für sie durchsichtig sind.

Gravitationswellen sind nach Einstein hinsichtlich ihrer Ausbreitung wie Lichtwellen zu behandeln. Es gilt die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Ob aber im Gravitationsfeld wie bei den Photonen im elektromagnetischen Feld auch Verschränkung auftreten kann, muss an dieser Stelle diskutiert werden. Dazu ist nochmals kurz auf die Verschränkungsproblematik einzugehen. Sie wurde in einem früheren Vortrag ausführlich behandelt [16].

Die Verschränkung bezieht sich auf einen Zustand von Quantenteilchen, die so eng zusammenhängen, dass durch Beeinflussung an einem Teilchen sofort die Eigenschaft des anderen Teilchens bestimmt ist, auch wenn sie sich deutlich getrennt voneinander aufhalten.

Louis de Broglie (1892-1987) forderte in seiner Doktorarbeit 1924 die Zuordnung einer Wellennatur für bewegte Teilchen mit der Materiewellenlänge

$$\lambda = h / mv,$$

was zur Entwicklung der Quantenwellenmechanik führte. Dabei ist h die Plancksche Konstante, m die Masse und v die Geschwindigkeit des Teilchens.

Erwin Schrödinger (1887-1961) fand 1926 die nach ihm benannte Gleichung, die mit ihrer Funktion ψ den quantenwellenmechanischen Zustand eines Systems beschreibt. Mit ihrer Hilfe lässt sich z. B. die chemische Bindungsenergie berechnen oder abschätzen. Das Quadrat der Wellenfunktion ψ für Elektronen in der Atomhülle gibt die Dichte ihrer Aufenthaltswahrscheinlichkeit für die jeweiligen Energieniveaus an, woraus sich bei Atomkopplungen die Bindungsrichtungen ergeben.

Die Verschränkung in der Physik steht im Einklang mit der quantenmechanischen Formulierung. *Albert Einstein* (1879-1955) konnte sich aber mit der Verschränkung nicht anfreunden und bezeichnete sie als spukhafte Fernwirkung. Er veröffentlichte zusammen mit *Boris Podolsky* und *Nathan Rosen* eine Arbeit mit dem Titel „Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?“ [17].

Die Autoren fordern für eine vollständige Theorie die Gültigkeit des Realitätskriteriums. Jedes Element der physikalischen Realität muss ein Gegenstück in der physikalischen Theorie haben.

Einstein, *Podolsky* und *Rosen* betrachteten zwei Systeme mit ihren Wellenfunktionen ψ_1 und ψ_2 , die eine bestimmte Zeit in Wechselwirkung stehen und nach dieser Zeit keine Wechselwirkung mehr aufweisen. Da die beiden Systeme zum Zeitpunkt der Messung nicht mehr in Wechselwirkung stehen, kann nach den Autoren auch keine wirkliche Änderung in dem zweiten System als Folge von irgendetwas auftreten, das in dem ersten unternommen wird. Später wurde diese Annahme als Lokalitätsannahme bezeichnet.

Damit sind Ausführungen in der Quantenphysik nicht vollständig in Übereinstimmung zu bringen, so dass die Autoren zu dem Schluss kommen, dass die Beschreibung der Realität durch die Wellenfunktion nicht vollständig ist.

Erwin Schrödinger wurde daraufhin zu einer dreiteiligen Veröffentlichung in der Zeitschrift *Die Naturwissenschaften* angeregt mit dem Thema „Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik“ [18]. In diesen Ausführungen hat er den Namen Verschränkung eingeführt. *Schrödinger* wies darauf hin, dass bei Wechselwirkung zweier Systeme unter Verschränkung nicht etwa ihre ψ -Funktionen in

Wechselwirkung treten, sondern sofort aufhören zu existieren und an ihre Stelle eine einzige ψ -Funktion tritt.

Die Erfolge der Quantenmechanik mit der Schrödinger-Gleichung ließen das Interesse an der Arbeit von *Einstein, Podolsky* und *Rosen* zurücktreten, bis im Jahre 1964 *John Stewart Bell* (1928-1990) eine Ungleichung aufstellte, die erfüllt sein muss, wenn die Einstein-Podolsky-Rosen-Bedingung gilt. Bell zeigte, dass die Annahme von *Einstein, Podolsky* und *Rosen* im Widerspruch zu quantenwellenmechanischen Aussagen steht [19], die die Bellsche Ungleichung nicht erfüllen.

Die Bedeutung der *Bellschen Ungleichung* wurde nicht sofort erkannt. Es gab zwar einige Ansätze [20], die aber weniger Beachtung fanden. Erst nach Ablauf von fast zwei Jahrzehnten erfolgte eine präzisere experimentelle Überprüfung der theoretischen Arbeit von Bell mit verschränkten Photonen².

Bei den Messungen wurde als Eigenschaft die Polarisierung der Photonen verfolgt [21, 22, 23]. Die Versuchsanordnung [22] sah nach Erzeugung der verschränkten Photonen das Einkoppeln in Glasfaserkabeln und Weiterleitung zu den entfernten Stationen A und B vor. Bei A erfolgte die Aufprägung der in der Verschränkung zu teleportierenden Eigenschaft und Weitergabe der Information darüber über Funk an B zur Überprüfung. Bei Funk wird die Lichtgeschwindigkeit von etwa 300000 km/sec wirksam, in Glasfaserkabeln gilt eine Lichtgeschwindigkeit von etwa 200000 km/sec.

Alain Aspect und *Mitarbeiter* wiesen mit verschränkten Photonen, die bei Messung bis zu 6,5 m vom Zentrum entfernt waren, die Verletzung der Bellschen Ungleichung nach [21], was allerdings wegen der geringen Entfernung und der gewählten experimentellen Anordnung noch Einwände zuließ.

Ausführlichere Untersuchungen zur Quantenteleportation erfolgten durch *Anton Zeilinger* und *Mitarbeiter*. Sie veröffentlichten erfolgreiche Untersuchungen an 600 m entfernten [22] und an 143 km entfernten verschränkten Photonen [23].

Chinesische Forscher hatten inzwischen eine Entfernung von etwa 100 km überbrückt [24].

Im Aufbau befindet sich in China eine 2000 km lange Teststrecke zwischen Peking und Shanghai. Im Quantum Space Satellite Programme der Chinesischen und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften wurde im August 2016 ein 600 kg schwerer Satellit in ungefähr 1000 km Flughöhe geschickt. Er enthält Emitter und Empfänger für verschränkte Photonen neben verschiedenen Hilfseinrichtungen zur Durchführung und Überprüfung der Space-Teleportation [25].

In Science 2017 wird unter News von den chinesischen Wissenschaftlern die erfolgreiche Übertragung von verschränkten Photonen vom Satelliten aus 500 km Höhe an zwei 1203 km voneinander entfernte Bodenstationen gemeldet [26].

Die Verletzung der *Bellschen Ungleichung* wurde in allen Versuchen nachgewiesen. Die in A aufgeprägte Eigenschaft wird sofort in B wirksam.

Arbeiten, die diese Ergebnisse in Frage stellen, sind nicht bekannt. Damit gilt die Verschränkung auch als experimentell nachgewiesen und der Einsteinsche Zweifel als entkräftet. Für die verschränkten Photonen trifft weder das Realitätskriterium noch die Lokalitätsannahme zu.

Verschränkte Teilchen unterliegen der Kraftwirkung ein und desselben Feldes. Sie sind miteinander verbunden und haben nach *Erwin Schrödinger* dieselbe ψ -Funktion. Unter diesen Umständen wird durch die Messung an einem Teilchen sofort die Eigenschaft des anderen Teilchens bestimmt, wie weit es auch von diesem entfernt ist. Die Teilchen hängen im Feld zusammen, auch wenn sie sich an verschiedenen Orten befinden. Die Verschränkung gilt im gesamten Feld.

² Verschränkte Photonen werden in nichtlinearen optischen Kristallen erzeugt. Dabei wandeln sich Photonen eines Laserstrahles in jeweils zwei Photonen mit der halben Ursprungsenergie um.

Schlussbetrachtung

Zum Schluss kommen wir wieder zur Betrachtung des Gravitationskraftfeldes zurück. Die *Stringtheorie* und die *Schleifenquantengravitation*, die auch das Ziel hatten, die Quantengravitation, also die Einbeziehung der Gravitation in die Quantenphysik, zum Erfolg zu führen, scheiterten bislang an dieser Aufgabe wie auch davor *Einstein* und viele weitere bedeutende Wissenschaftler. Leider konnten weder die *Stringtheorie* noch die *Schleifenquantengravitation* Voraussagen machen, die experimentell überprüfbar sind.

Eine Quantentheorie der Gravitation würde in Anlehnung an die Quantenelektrodynamik die Existenz von Gravitationsquanten, sogenannten Gravitonen, postulieren. Sollten diese hypothetischen Gravitonen, die eine Quantifizierung der Gravitation ermöglichen würden, tatsächlich nachgewiesen werden, so könnten sie wie die Photonen der Verschränkung unterliegen. Die Verschränkung ist im gesamten Kraftfeld wirksam. In dieser Hinsicht kämen wir wieder in Übereinstimmung mit *Newton*, der die Gravitation zwischen allen Massen im gesamten Feld bestehend ansah, wobei sich Änderungen sofort auswirken sollten.

Eine weitere Möglichkeit der Erkenntnis wäre der Erweis für die Gravitation als nicht mit der starken und schwachen Wechselwirkung im Atomkern und der elektromagnetischen Kraft zu vereinigende Urkraft.

Nach dem heutigen Kenntnisstand sind diese Fragen noch nicht beantwortet. Wir befinden uns in einer Zeit stürmischer Entwicklung und sind gespannt in Erwartung weiterer Erkenntnisse, vgl. dazu auch [27].

Literatur

- [1] Lutherbibel 1. Mose 22, 1-19.
- [2] <https://de.wikipedia.org/wiki/Eratosthenes>
- [3] Dieter B. Herrmann, Die Harmonie des Universums. Von der rätselhaften Schönheit der Naturgesetze, Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co. KG, Stuttgart 2017.
- [4] Jonathan Bennett, Exchange of papers between Leibniz and Clarke. G. W. Leibniz and Samuel Clarke. Copyright ©2010-2015.
- [5] www.student-online.net/Publikationen/550/lei.
Prof. E. Knobloch. Der Briefwechsel Leibniz-Clarke. 22. Mai 2000. Daniel Burckhardt.
- [6] https://de.wikipedia.org/wiki/Caroline_von_Brandenburg-Ansbach.
- [7] Arnold Neumaier, <https://www.physicsforums.com/insights/physics-virtual-particles/>
- [8] István Szapudi, Die große Leere, Spektrum der Wissenschaften, Heft 4, [2017] 12-19.
- [9] James Owen Weatherall, Void – The Strange Physics of Nothing, Yale University Press, New Haven CT (Foundational Questions in Science) [2016].
- [10] B. P. Abbott et al., Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, Physical Review Letters **116**, 061102 [2016].
- [11] Juan Garcia-Bellido und Sébastien Clesse, Kosmologie – Die Schwarzen Löcher des Urknalls, Spektrum der Wissenschaft 10.17, [2017] S. 12-19.
- [12] Günter Spanner, Das Geheimnis der Gravitationswellen, Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co. KG, Stuttgart [2016].
- [13] Andreas Müller, 10 Dinge, die Sie über Gravitationswellen wissen wollen, Springer-Verlag GmbH Deutschland [2017]. 1
- [14] B. P. Abbott et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral, Physical Review Letters **119**, 161101 [2017].

- [15] Robert Gast, Gravitationswellen. Das Raumzeitbeben von NGC 4993, Spektrum der Wissenschaft 1.18 [2017] S. 58-65.
- [16] Lothar Kolditz, Gedankenübertragung und quantenphysikalische Verschränkung, Internetzeitschrift Leibniz Online, Jahrgang. 2013, Nr.15, S.1-7; 3-6.
<https://leibnizsozietaet.de/internetzeitschrift-leibniz-online-jahrgang-2013-nr-15/>
- [17] Albert Einstein, Boris Podolsky and Nathan Rosen, Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? Physical Review 47, [1935] 777-780.
- [18] Erwin Schrödinger, Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik, Naturwissenschaften 23, [1935] 807-812; 823-828; 844-849.
- [19] John Stewart Bell, On the Einstein Podolsky Rosen Paradox, Physics 1 [1964] 195-200.
- [20] Anton Zeilinger, Einsteins Spuk: Teleportation und weitere Mysterien der Quantenphysik, 4. Auflage Taschenbuchausgabe Februar 2007, Wilhelm Goldmann Verlag München, S. 275 u. f.
- [21] Alain Aspect, Philippe Grangier and Gérard Roger, Experimental Tests of Local Theories via Bell's Theorem, Phys. Rev. Lett. 47 [1981] 460-463.
- [22] Rupert Ursin, Thomas Jennewein, Markus Aspelmeyer, Rainer Kaltenback, Michael Lindenthal, Philip Walther and Anton Zeilinger, Quantum teleportation across the Danube, Nature 430 [2004] 849.
- [23] Xiao-Song Ma, Thomas Herbst, Thomas Scheidl, Daqien Wang, Sebastian Kropatschek, William Naykor, Bernhard Wittmann, Alexandra Mech, Johannes Kofler, Elena Anisimova, Rupert Ursin and Anton Zeilinger, Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward, Nature 489 [2012] 269-273.
- [24] Juan Yin, Ji-Gang Ren, He Lu, Yuan Cao, Hai-Lin Yong, Yu-Ping Wu, Chang Liu, Sheng-Kai Liao, Fei Zhou, Yan Jiang, Xin-Dong Cai, Ping Xu, Ge-Sheng, Pan, Jian-Jun, Jia, Yong-Mei, Huang, Hao, Yin, Jian-Yu Wang, Yu-Ao, Chen, Cheng-Zhi, Peng and Jian-Wei Pan, Quantum teleportation and entanglement distribution over 100 km free-space channels, Nature 488 [2012] 185-188.
- [25] Andreas Stiller, Quantenfahrplan – wie geht es weiter mit der Quantentechnologie? c't magazin für computer technik, Heft 17 [2016], S. 40-41.
- [26] DOI: 10.1126science.aan6972.
- [27] <http://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/gravitation/150>

Adresse des Verfassers: lothar.kolditz@t-online.de