

Bemerkungen zum Weltbild der Physik des 20. Jahrhunderts

Jürg Fröhlich

ETH Zürich

„In our description of Nature the purpose is **not** to disclose the ‘real essence’ of the phenomena but only to track down, so far as it is possible, **relations** between the manifold aspects of our experience.” (*Niels Bohr*)

“The beginning of all philosophical thought is the realization that the perceptual world is but an image, a vision, a phenomenon of our consciousness.” Und:

„What I primarily wanted to make clear to you by my exposition is how at this point age-old religious and metaphysical ideas and questions are intimately connected with the ultimate problems of actual science.” (*Hermann Weyl*)

“Nihil veri habemus in nostra scientia nisi nostram mathematicam.” (*Nicolaus Cusanus*)

Meine Damen und Herren,

zuerst möchte ich mich bei den Organisatoren dieses Anlasses, insbesondere bei den Kollegen Suter und Gerber bedanken, zu Ihnen sprechen zu dürfen. Ich werde ja selbst ab Ende Juli dieses Jahres auch zu den Emeriti gehören. Vielleicht ist es durchaus vernünftig, dass ich mich in Ihrem Kreis mit einem Referat vorstelle.

Trotz meines fortgeschrittenen Alters bin ich es mir bis anhin nicht gewohnt, allgemeinverständliche, eher philosophische denn technische Vorträge zu halten. Aber es ist wohl an der Zeit, dass ich mich in dieser Kunst ein wenig übe. Historisch-philosophische Reflektionen über das eigene Wissensgebiet sind bedauerlicherweise ziemlich aus der Mode gekommen, und solche vorzubereiten erfordert ja bekanntlich auch viel Zeit, die wir alle gar nicht mehr zu haben scheinen. Dies war noch während meines Studiums in der zweiten Hälfte der Sechziger Jahre anders. Zwei meiner Lehrer der theoretischen Physik an der ETH, *Markus Fierz* und *Res Jost* pflegten mannigfache historische, insbesondere wissenschaftshistorische Interessen und trugen zu dergleichen Themen regelmässig vor. Weitere weltbekannte Intellektuelle, die immer wieder über die historischen und philosophischen Wurzeln wissenschaftlicher Entwicklungen nachdachten, waren auch *Hermann Weyl* und *Simone Weil*, die Schwester des berühmten Mathematikers *André Weil*. Ich werde sie in meinem Vortrag da und dort zu Wort kommen lassen.

Beginnen möchte ich allerdings mit einer Warnung: *„Diese Bücher, in denen versucht wird, eine populäre Darstellung der Wissenschaft zu geben, kann ich nicht ausstehen. Sie geben sich dazu her, dass die Neugier der Leute im Hinblick auf die Wunder der Wissenschaft angestachelt wird, ohne dass sie etwas von der wirklich harten Arbeit leisten müssen, die nötig ist, um zu begreifen, worum es in der Wissenschaft geht....Heutzutage besteht die Tendenz, dass Wissenschaftler, die in die Jahre kommen,*

das Interesse an ihrer eigentlichen Arbeit verlieren, und dann stürzen sie sich in absurde, populäre, halbphilosophische Spekulationen.... Ein schlechter Philosoph ist wie ein Halsabschneider, der aus Elendsquartieren Kapital schlägt.“ (Ludwig Wittgenstein im Gespräch mit M. O‘ C. Drury)

1. Plan meines Vortrags

Viele unter uns kennen die Bedeutung des philosophischen, mathematischen und astronomischen Denkens der alten Griechen und von Leuten wie *Roger Bacon, Nicolaus Cusanus, Kopernikus, Bruno, Kepler, Galilei, Newton, Laplace* u.a. für die Entstehung unseres modernen physikalischen Weltbildes, unter dem wir nicht selten das mechanistisch-deterministische Weltbild des 19. Jahrhunderts verstehen, das wir heutigen Physiker überwunden zu haben glauben. (Telesio, Campanella, Maxwell, Boltzmann, Mach,...: Welt als deterministisches Uhrwerk.)

Alle wissen wir vom Hören-Sagen, dass dieses mechanistisch-deterministische Weltbild am Ende des 19. Jahrhunderts in eine tiefe Krise geriet. Aber die Rolle, die Leute wie die genialen Mathematiker *Bernhard Riemann* und *Henri Poincaré* oder der grosse Physiker *Heinrich Hertz* in der frühen Beschreibung und Analyse dieser Krise gespielt haben, ist uns weitgehend unbekannt, und ihre vorläufige Überwindung im Rahmen der modernen Physik verstehen viele unter uns nicht, da sie ihnen zu technisch ist.

Wir haben gehört, dass die Relativitätstheorien Anlass zu bedeutenden Retouchen am physikalischen Weltbild des 19. Jahrhunderts gegeben haben – wer hat noch nie vom Zwillingsparadox oder der Gleichung $E = mc^2$ gehört. Aber dass wir ihnen den *Abschied von der Idee der Voraussagbarkeit der Zukunft*, die das mechanistische Weltbild des 19. Jahrhunderts prägte, vom scharfen Schnitt zwischen Vergangenheit und Zukunft und die Renaissance der *Leibnizschen* Vorstellung der Monaden verdanken, dies scheinen die wenigsten zu wissen.

Wir haben selbstverständlich auch davon gehört, dass die Quantenmechanik den *Abschied vom naiven Determinismus und Realismus* des alten Weltbildes nach sich gezogen hat. Aber was darunter genau zu verstehen ist, dies wissen selbst viele promovierte Physiker nicht.

Ich halte es für einen der intellektuellen Skandale unserer Zeit, dass wir Physiker noch immer die grösste Mühe haben, konzeptuell und allgemein zu erklären, was genau uns die Quantenmechanik über den Ausgang von Experimenten an der Natur vorhersagt. Wer unter uns ist sich der Umstände bewusst, dass in den meisten Darstellungen der Quantenmechanik der Begriff eines ‚*Ereignisses*‘ entweder gar nicht definiert wird, oder sich der Quantenmechaniker i.a. gar nicht bewusst ist, dass dieser Begriff in seiner Theorie im *klassischen, absoluten* Sinne gar keinen Platz hat, dass das ‚*Jetzt*‘ eine gewisse Unschärfe erhält, und dass in der quantenmechanischen Beschreibung der Natur die Zukunft gewissermassen Einfluss auf die Gegenwart nimmt? Dies sind Einsichten, von denen *Weyl* schon anno 1920, fünf Jahre vor der Entdeckung der Matrizenmechanik, wie folgt redet: *“The future will act on and upon the present and it will determine the present more and more precisely; the past is not finished. Thus, the fixed pressure of natural causality disappears and there remains, irrespective of the validity of the natural laws, a space for autonomous and causally absolutely independent decisions; I consider the elementary quanta of matter to be the place of these decisions.”* Von *Einsteins* Entdeckungen von 1917 zur Absorption und Emission von Strahlung durch Atome hatte er dazu übernommen, dass *“die ganze Physik der Materie ihrer Natur nach statistisch ist.”* Während *Einstein* seine eigene Einsicht später verwarf, hielt sie *Weyl* offenbar stets für fundamental.

Unter den vielen Intellektuellen, die die Abkehr vom naiven Realismus in unseren Beschreibungen der Natur, wie sie die Quantenmechanik mit sich gebracht hat, nicht akzeptieren wollten, möchte ich hier *Simone Weil* zu Wort kommen lassen, die,

wenngleich ohne vertiefte naturwissenschaftlich-mathematische Bildung, mit beeindruckender Intuition über die Probleme der modernen Mathematik und Physik nachgedacht hat. Sie sagt: „*C'est cette contradiction qui apparaît dans l'idée de quanta ou d'atomes d'énergie ... qui a ôté à la science, à partir de 1900, la signification qu'elle avait eue au cours de quatre siècles sans qu'on ait pu lui en donner aucune autre.*“ Offenbar hat sie geahnt, dass die Verbindung der atomistischen Konstitution der Materie mit der Quantentheorie dazu führt, dass wir nicht mehr imstande sind, zu beschreiben, was geschieht, sondern lediglich, **was geschehen könnte**, und dass es weder in der Theorie, noch – wie wir vermuten – in der Wirklichkeit je mit absoluter Sicherheit feststeht, ob ein ‚Ereignis‘ überhaupt stattgefunden hat. Mit dem Verlust unserer Theorien an Anschaulichkeit geht einher, dass die theoretischen Konstruktionen mehr und mehr abstrakt-algebraisch werden; wir haben Abschied von einer anschaulich-geometrischen Beschreibung der Natur in Raum und Zeit genommen. *Simone Weil* hält aber die Geometrie für die eigentliche Essenz der Mathematik, wogegen sie gegen die Algebra eine geradezu religiöse Abneigung hegt. Obwohl, wie mir scheint, *Weil* die Problematik des Weltbildes der Quantenmechanik treffsicher erahnt hat, wollen wir ihr freilich in ihrer tief pessimistischen Ablehnung dieses Weltbildes nicht folgen. Vielmehr möchte ich Sie mit meinen Darlegungen dazu ermutigen, es freudig zu begrüßen!

Fest steht, dass in der Theorie die atomistische Natur der Materie, die Idee punktförmiger Ladungen, in Verbindung mit der klassischen Elektrodynamik, und im Experiment die Atomspektroskopie, die Quantennatur des elektromagnetischen Feldes, wie sie in *Plancks* Gesetz der Hohlraumstrahlung zutage tritt, und die Unmöglichkeit, Relativbewegung zum Aether nachzuweisen, die Krise des mechanistisch-deterministischen Weltbildes offengelegt haben, und wir haben denn gar keine andere Wahl, als ein neues Weltbild zu konstruieren!

Im folgenden versuche ich, diese skizzenhaften Bemerkungen mit etwas mehr Inhalt zu füllen. Ich werde weitgehend darauf verzichten, mathematische Sprache zu verwenden, was freilich mein Unterfangen äusserst mühsam und möglicherweise nur schwer verständlich macht.

1. Abschied von der alten Welt

Das Weltbild des *Aristoteles* sah die Erde im Zentrum des sublunaren Bereichs, der von den himmlischen Sphären umgeben ist. Auf den inneren dieser Sphären befinden sich die Planeten, auf den äusseren die Gestirne, die zu Beginn der Zeiten vom unbewegten Urgrund (Gott) in ewige Bewegung versetzt wurden. Ausserhalb der äussersten Kristallsphäre, die das Universum umschliesst, gibt es keinen Raum.

Dieses Weltbild eines „zwiebelförmigen“ Universums, das von der katholischen Kirche übernommen wurde, wurde von *Kopernikus* radikal in Frage gestellt. Er verbannte die Erde aus dem Zentrum des Universums und erkannte die Relativität der Bewegung.

Die grossen Begründer der neuzeitlichen Naturbeschreibung, *Kopernikus, Kepler, Bruno, Galilei* und *Newton* waren in ihrem Denken zwar von alten philosophischen Vorstellungen geprägt, interpretierten diese aber eher als göttliche Offenbarungen und befassten sich nebst ihrer Tätigkeit als Naturforscher eher mit Theologie als mit Philosophie. Das Wirken Gottes in der Welt war ihnen eine Gewissheit. *Giordano Bruno*, der seine wissenschaftlichen Überzeugungen, etwa zum heliozentrischen Weltbild oder zur Ähnlichkeit der Fixsterne mit unserer Sonne, mit dem Tod auf dem Scheiterhaufen bezahlt hat – sie galten der katholischen Kirche als Ketzerei – ruft am Ende seines grossen Dialogs „*Vom unendlichen All und den Welten*“ in Gebetsform aus: „*Öffne uns das Tor, durch welches wir hinausblicken in die unermessliche Sternenwelt! Zeig uns, dass die anderen Welten im Aethermeer schwimmen, wie diese! Erkläre uns, dass die*

Bewegungen aller Welten aus inneren Seelenkräften hervorgehen, und lehre uns, im Lichte solcher Anschauungen mit sicherem Schritt fortzuschreiten in der Wissenschaft und der Erkenntnis der Natur.“

Und *Campanella*, der für seine Überzeugungen und seinen Widerstand gegen die Spanier siebenundzwanzig Jahre in Neapel im Kerker sass, schreibt: *„Diese Neuigkeiten – älteste Wahrheiten – von neuen Welten, neuen Systemen, neuen Nationen sind der Anfang einer neuen Aera. Möge sie Gott nicht verzögern; und wir wollen hier, soweit unsere schwachen Kräfte reichen, mitwirkend alles tun, was wir können.“*

Man stellt fest, dass *Bruno* und *Campanella* unser Sonnensystem aus dem Zentrum des Universums verbannt haben und es als eines unter sehr vielen auffassen. Damit ist implizite angedeutet, dass der Mensch möglicherweise gar keine besondere Rolle im Plan der Schöpfung spielt; einem Pantheismus, der der katholischen Kirche als Häresie vorkommen musste, war damit ein grosses Tor geöffnet.

Schon *Nicolaus Cusanus* vertrat die Überzeugung, dass auf der einen Seite Gott als das Unendliche in Vollendung steht, auf der anderen Seite der Mensch in seiner Endlichkeit, dass aber das menschliche Streben nach der Erkenntnis des Unendlichen, seine Weigerung, sich mit dem Vorliegenden und Erreichten zufrieden zu geben, keine Hybris seien, sondern Evidenz für seine Vorbestimmung zum Göttlichen und Ausdruck der *„amor Dei intellectualis“* . Das Mittel, um zur Erkenntnis des Unendlichen und damit des Göttlichen zu gelangen ist die Mathematik, ganz in der Tradition des *Pythagoras*. Ähnlich denkt *Galilei*. Mein ehemaliger Lehrer, Kollege und Freund *Markus Fierz* sagt über das Denken Galileis folgendes: *„Galilei fasste die Welt als Werk Gottes auf, als ein Buch, das vor uns offen liegt und in dem wir lesen müssen. Zwar ist auch die Bibel ein Buch – das Wort Gottes –, aber es ist mit Rücksicht auf den Menschen geschrieben. Das Werk Gottes – eben die Welt – kennt diese Rücksicht nicht, und wenn wir in ihm zu lesen*

verstehen, lernen wir die eigentlichen Schöpfungsgedanken Gottes kennen, die uns bisher verschlossen waren. Das Buch der Natur ist aber in der Sprache der Mathematik geschrieben, es handelt vom mathematischen Naturgesetz. Gott wird hier, ganz platonisch, als der grosse Geometer und Mathematiker gesehen, der allen Dingen Mass und Zahl gesetzt hat. Die mathematischen Wahrheiten, die der Mensch begriffen hat, kommen darum an objektiver Gewissheit der göttlichen Erkenntnis gleich. Das sagt Galilei ausdrücklich, und auf die Frage, ob dies nicht allzu kühn gesprochen sei, versichert er, seine Sätze seien weit über den Verdacht der Vermessenheit erhaben.“

Offensichtlich war Galilei von Staunen über die Wirksamkeit der Mathematik in der Naturbeschreibung ergriffen wie nach ihm viele andere – bis in unsere Zeit. Er suchte dafür nach religiösen Erklärungen, wogegen wir modernen Menschen dieses Phänomen als solches weitgehend unerklärt stehen lassen. Wir haben es aufgegeben, die Welt zu erklären; wir beschreiben die Phänomene und Zusammenhänge unter denselben – wie im Zitat von Niels Bohr angedeutet.

Fragen wir, woher es kommt, dass die Naturwissenschaftler ihr Geschäft der Naturbeschreibung nicht mehr mit religiösen Vorstellungen in Verbindung bringen, so ist es nützlich, die Sicht *Newtons* zu dieser Thematik in Erinnerung zu rufen. Für ihn, dem wir die Entdeckung der Himmelsmechanik, insbesondere die Erklärung der Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung verdanken, war die Physik eine Art symbolischer Gotteslehre. Sein Modell des absoluten Raumes, schon auf Grund des Galileischen Relativitätsprinzips eine problematische Konstruktion, und der absoluten Zeit war von theologischen Motiven beeinflusst. Für Newton war der Raum das „sensorium Dei“, und die Zeit war Ausdruck der Ewigkeit Gottes.

Doch schon *Leibniz* hat das Unbefriedigende von *Newtons* Vermengung physikalischen Denkens mit religiösen Vorstellungen erkannt und lebhaft Kritik daran geübt. Für uns

heutige Menschen entbehren Galileis und Newtons Projektionen religiöser Vorstellungen in das Naturgeschehen des inneren Zusammenhangs mit ihrem physikalischen Denken. Während dieses sich als höchst folgen- und erfolgreich erwies, sind jene nur noch von ideengeschichtlichem Interesse. Kurz nach Beendigung seines epochalen Werks, der „*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*“, verfiel Newton in eine schwere seelische Krise, eine Störung des inneren Gleichgewichts, die *Fierz* als teilweise durch das gestörte Gleichgewicht seines Weltbildes verursacht interpretierte. Dieses gestörte Gleichgewicht kann so gedeutet werden, dass sein physikalisches Weltbild – und damit das bis zum Ende des 19. Jahrhunderts vorherrschende physikalische Weltbild – ihn die Welt als eine deterministische Maschine sehen liess, die nach ehernen Gesetzen abläuft, dass ihm jedoch die Ideen von Gottes Gegenwart im Naturgeschehen und vom freien Willen des Menschen teuer waren. Das mechanistisch-deterministische Weltbild aber wollte nicht zu den Phänomenen des Geistes und der Freiheit passen. Das sind Gegensätze, die viele unter uns auch heute noch bewegen, was damit zu tun hat, dass sie tatsächlich ein Problem darstellen – zwar kein physikalisches – aber auch damit, dass viele unter uns gar nicht wissen, in welcher Weise sich die Naturbeschreibung im 20. Jahrhundert grundsätzlich verändert hat. Gerade davon soll nun in diesem Vortrag die Rede sein!

Die Idee, dass die Welt ein Uhrwerk sei, das nach ehernen Gesetzen abläuft, hat *Pierre-Simon* marquis de *Laplace* in das Bild seines Dämons gegossen, der die gesamte Vergangenheit und Zukunft der Welt zurück- resp. vorausberechnen könnte, wenn er nur zu einem einzigen Zeitpunkt den genauen Zustand der Welt kennte. Die Problematik von Laplacens Vorstellung wurde allerdings schon gegen Ende des 19. Jahrhunderts in Arbeiten französischer Mathematiker wie *Poincaré* und *Hadamard* deutlich, die gezeigt haben, dass Anfangszustände mechanischer Systeme, die für alle praktischen Zwecke nicht von einander unterschieden werden können, sich nach kurzer Zeit in radikal

unterschiedliche Zustände entwickeln, und dass es daher *praktisch* ganz unmöglich ist, die genauen zukünftigen Zustände mit Hilfe der Bewegungsgleichungen aus den nie völlig genau bekannten Anfangsbedingungen vorauszuberechnen. Diese Einsichten stellten den Beginn der sog. *Chaos-Theorie* dar, von der man heute viel hört, ohne i.a. viel davon zu verstehen.

Es mag angebracht sein, an dieser Stelle daran zu erinnern, dass der grosse Mathematiker *Bernhard Riemann*, dessen Entdeckungen in der Geometrie zu einer wesentlichen mathematischen Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie *Einsteins* wurde, eine Studie verfasst hat, deren Zweck es war, wie er sagte, „*jenseits der von Galilei und Newton gelegten Grundlagen der Astronomie ins Innere der Natur zu dringen.*“ Riemann befasste sich als universell denkender Mensch auch mit den Regungen des Geistes und der Seele. Er gelangte zur Hypothese, dass „*der Weltraum mit einem Stoff erfüllt ist, welcher fortwährend in die ponderablen Atome strömt und dort aus der Erscheinungswelt verschwindet*“, und dass beim Eindringen in die Atome dieser Stoff „*aus der Körperwelt in die Geisteswelt eintritt. Die Ursache, weshalb der Stoff dort verschwindet, ist zu suchen in der unmittelbar vorher gebildeten Geistessubstanz, und die ponderablen Körper sind hiernach der Ort, wo die Geisteswelt in die Körperwelt eingreift.*“ Riemanns Stoff erinnert an neuplatonische Vorstellungen einer „*anima mundi*“, die den Raum erfüllt und dafür verantwortlich ist, dass die Himmelskörper auf ihren Bahnen die Naturgesetze einhalten. Dieser Vorstellung hingen nicht nur Bruno und Newton an, sondern auch der kritische *Wolfgang Pauli*; und *Hermann Weyl* vertrat Auffassungen, die denjenigen *Riemanns* erstaunlich ähnlich sind: Die einzelnen materiellen Teilchen sind Monaden, die sich Weltröhren in die Raum-Zeit bohren, und die Materie erscheint als ein ‚*agens*‘, das sich aus unzähligen, unzusammenhängenden solcher Monaden zusammensetzt, deren Essenz ausserhalb von Raum und Zeit liegt, die aber durch ihre Wirkungen auf Felder wie das Gravitationsfeld zusammen den Stoff der

Welt weben. Er bringt das ‚agens‘ dieser Monaden mit dem schöpferischen Willen in Verbindung. Dies bedeutet offensichtlich eine radikale Abkehr vom mechanistisch-deterministischen Weltbild *Newtons*.

Bilder wie diejenigen *Riemanns* und *Weyls* sind ihrer Natur nach unpräzise, was jedoch nicht bedeutet, dass sie unzutreffend sind. *Weyl* war ein hervorragender Kenner der modernen Physik und schuf daraus seine Bilder. Versuchen wir darum nachzuvollziehen, in welcher Weise sie das neue Weltbild der Physik des 20. Jahrhunderts treffen!

Zusammenfassend kann man sagen, dass der Abschied von der alten Welt, wie er in der Entstehung der modernen Physik vollzogen wurde, den Abschied der Naturforschung von der Suche nach den Spuren Gottes in der Natur bedeutet hat; und dies ist wohl trotz des radikalen Wandels des physikalischen Weltbildes im 20. Jahrhundert bis heute so geblieben. „*Gott*“ ist ein Begriff aus dem Reich der Seele und der Spiritualität, und davon spricht die Physik *nicht*.

3. Abschied von der Idee der Voraussagbarkeit der Zukunft in der Relativitätstheorie

Die Relativitätstheorien *Einsteins* haben unsere Vorstellungen von Raum und Zeit in radikaler Art und Weise verändert, die weitreichende Folgen für das Problem des Determinismus haben sollten. Ausgangspunkt aller Naturwissenschaft ist, auf der Grundlage möglichst weniger Postulate möglichst präzise zu beschreiben, was ein menschlicher Beobachter erlebt, wenn er oder sie die Welt um sich erforscht. In der Relativitätstheorie bedient man sich der Idealisierung, dass ein Beobachter räumlich beliebig klein sein möge. Die Grundannahmen der speziellen Relativitätstheorie betreffen das, was solche Beobachter erleben, wenn sie das Firmament betrachten. Das Firmament wird als eine Sphäre, die *Riemannsche Sphäre* beschrieben. Das Grundpostulat der speziellen Relativitätstheorie besagt, dass beliebige Beobachter, auf die keine äusseren Kräfte einwirken, einen beliebigen kugelförmigen Stern stets als eine Kreisscheibe am

Firmament sehen. Daraus folgt sofort, dass die Transformationen, die die Erscheinungen am Firmament, wie sie verschiedene Beobachter sehen, untereinander verbinden – bis auf Skalentransformationen – sogenannte *Poincaré-Transformationen* sein müssen.

Jeder kräftefreie Beobachter kann dann einem Ereignis, das er als Lichtblitz am Firmament erlebt, einen Ort auf demselben, d.h. eine Richtung, einen räumlichen Abstand und einen zeitlichen Abstand zuordnen, *d.h. einen Punkt in der Raum-Zeit, an dem das Ereignis stattgefunden hat*. Dabei ist der räumliche Abstand stets das Produkt des zeitlichen Abstandes mit der Lichtgeschwindigkeit, die für alle Beobachter, *unabhängig von ihrem Ort und Bewegungszustand*, denselben Wert hat.

Diese Einsicht führt darauf, dass man die Raum-Zeit mit einer kausalen Struktur versehen kann. Ist ein Beobachter zur Zeit t in einem Punkt P des Raumes, so hat er grundsätzlich nur eine partielle Kenntnis von Ereignissen, die innerhalb des sog. *Rückwärtslichtkegels* unter dem Raum-Zeitpunkt (P,t) stattgefunden haben. Ereignisse, die innerhalb des Rückwärtslichtkegels des Beobachters stattfinden, können ihn in seiner Gegenwart zur Zeit t beeinflussen. Sie bilden also seine *Vergangenheit*. Dagegen kann ein Beobachter im Raum-Zeit Punkt (P,t) selbst nur Ereignisse beeinflussen, die innerhalb des sog. *Vorwärtslichtkegels* über dem Raum-Zeit Punkt (P,t) liegen. Das Innere des Vorwärtslichtkegels bildet daher die raum-zeitliche Umschreibung der vom Beobachter beeinflussbaren Zukunft.

Nun schöpft die Vereinigung von Rückwärts- und Vorwärtslichtkegel über einem Punkt (P,t) der Raum-Zeit keineswegs die Gesamtheit der Raum-Zeit aus. Das Komplement dieser Vereinigung ist der geometrische Ort aller Ereignisse, die mit dem Beobachter in (P,t) keinerlei kausale Verbindung haben. Man sagt, sie seien *raumartig* von ihm getrennt. Von solchen raumartig getrennten Ereignissen hat der Beobachter zur Zeit t *prinzipiell keine Kenntnis*. Sie können aber seine Zukunft zu einem späteren Zeitpunkt,

$t' > t$, sehr wohl beeinflussen, wie man aus meiner graphischen Darstellung sofort sieht. Geht man davon aus, dass es Ereignisse gibt, die raumartig von einem Beobachter im Raumzeitpunkt (P,t) getrennt sind, d.h. die *nicht* in seiner Vergangenheit liegen und von denen er deshalb keinerlei Kenntnis haben kann, so wird sofort klar, dass es keine Beobachter gibt, deren Kenntnis des Universums zu einem Zeitpunkt t hinreichend erschöpfend ist, dass sie in der Lage wären, die Zukunft vorauszusagen! Geht man von einem allgemein-relativistischen Modell des Universums aus, etwa dem Friedman-Robertson-Walker Modell mit flachem Raum, das allem Geschehen einen Anfangszeitpunkt setzt, so kann man die Einsicht, dass es keine Beobachter gibt, die in irgendeinem Zeitpunkt eine hinreichend lückenlose Kenntnis des Universums haben, um dessen Zukunft vorauszusagen, noch etwas präziser fassen: Ausserhalb des kugelförmigen Gebiets des Universums, von dem wir prinzipiell Kenntnis haben könnten, (und innerhalb des Horizontes schwarzer Löcher) finden Ereignisse statt, von denen wir in der Gegenwart prinzipiell nichts wissen können, die aber unsere Zukunft beeinflussen werden.

In diesem sehr präzisen Sinne hat die Entdeckung der Relativitätstheorien den Abschied vom naiven Determinismus des alten Weltbildes, im Sinne von Laplacens Dämon, nach sich gezogen.

Dass es aber überhaupt Ereignisse gibt, die raumartig voneinander getrennt sind, kann experimentell dadurch verifiziert werden, dass sie verschiedene räumlich von einander getrennte Beobachter in *je verschiedenen zeitlichen Reihenfolgen* wahrnehmen. Dies geht aus der folgenden Darstellung sofort hervor:

Relativität der zeitlichen Reihenfolgen von Ereignissen (siehe ppt)

Es wäre anzufügen, dass Vorwärts- und Rückwärtslichtkegel über irgendeinem Raum-Zeit Punkt *nicht* vom Bewegungszustand des Beobachters, dessen Gegenwart in diesem

Raum-Zeit Punkt stattfindet, abhängen. Das muss so sein, da es ja gar kein invariantes Mass für den Bewegungszustand eines Beobachters gibt – es macht nur Sinn von der Relativbewegung mehrerer Beobachter zueinander zu sprechen. Aus dem bisher Gesagten geht ausserdem klar hervor, dass es keine universelle, für alle Beobachter gleichermassen zutreffende Begriffe von Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft gibt. Diese Begriffe sind nur relativ zu Raum-Zeitpunkten definiert, d.h. vom Raum-Zeit Punkt abhängig, in dem sich ein Beobachter gerade befindet. Das Leben eines Beobachters wird in der Raum-Zeit als eine sog. zeitartige Kurve dargestellt, die zweckmässigerweise durch die Zeit parametrisiert wird, die der Beobachter auf seiner Schweizer Präzisionsuhr abliest. Diese Zeit wird „*Eigenzeit*“ genannt. Eine universelle, *allen Beobachtern gemeinsame Zeit* gibt es *nicht!*

In diesem Sinne sind die Beobachter in der Relativitätstheorie den *Leibnizschen Monaden* vergleichbar, wie eben schon *Weyl* betont hat.

Schlussbemerkungen

- (i) Raum-Zeit ist in dem Sinne *emergent*, als sie sich aus dem Vergleich der Dauer (resp. spektralen Verteilung) sehr vieler Ereignisse durch ein Netz von unabhängigen, relativ zueinander bewegten Beobachtern als unserem Erleben von Ereignissen angemessene mathematische Struktur rekonstruieren lässt. Die Sicht der Raum-Zeit als einer emergenten Struktur geht historisch zumindest auf *Leibniz* zurück. Folgen wir seinen Ideen, so denken wir uns die Raum-Zeit als eine Struktur, die aus einem System von Relationen zwischen unzählig vielen verschiedenen Ereignissen hervorgeht, die von beliebig vielen, a priori voneinander unabhängigen Beobachtern – nennen wir sie Monaden – registriert werden. Die Existenz von Beobachtern, die das von ihnen erlebbare Naturgeschehen aufzuzeichnen in der Lage sind, ist eine Grundvoraussetzung

aller Naturwissenschaft, genauso wie die Annahme wesentlich ist, in der Natur fänden „Ereignisse“ statt, die einen vom Beobachter *unabhängigen, objektiven Status* haben, auch wenn sie von verschiedenen Beobachtern i.a. je verschieden und in möglicherweise verschiedenen zeitlichen Reihenfolgen registriert werden. Aus dem Gewebe solcher Ereignisse, den Beziehungen zwischen ihnen und der Art und Weise, wie sie einer grossen Schar von Beobachtern erscheinen, soll es nun möglich sein, die mathematische Struktur der Raum-Zeit als einer vier-dimensionalen Mannigfaltigkeit zu rekonstruieren. Dabei stellt es sich gemäss der allgemeinen Relativitätstheorie heraus, dass die *Geometrie* der Raum-Zeit von der Konfiguration der Ereignisse abhängt.

In gewissem Sinne trifft das *Aristotelische* Modell des Kosmos als einer zwiebelförmigen Schar von in einander enthaltenen Sphären auf das Erleben der Raum-Zeit jedes einzelnen Beobachters zu: Die Sphären sind Bilder seines Firmaments, und die Distanz der Sphäre, auf welcher ein Ereignis wahrgenommen wird, ist proportional zum zeitlichen Abstand zwischen dem Auftreten des Ereignisses und dem Beobachtungsakt. Dieser zeitliche Abstand kann aber nur dadurch bestimmt werden, dass *verschiedene* Beobachter die Daten ihrer Beobachtung des betreffenden Ereignisses miteinander vergleichen. Aus solchen Vergleichen und aus der Aufnahme bekannter Spektrallinien, resp. der Bestimmung ihrer Rot- oder Blauverschiebung durch viele verschiedene Beobachter, kann dann die Geometrie, z.B. die *Krümmung* der Raum-Zeit rekonstruiert werden. Die Registrierung von Ereignissen, denen eine *objektive* Bedeutung zukommt, auf dem Firmament zahlreicher Beobachter bleibt dabei stets der fundamentale Ausgangspunkt.

Man kann spekulierend davon ausgehen, dass die Sphäre, die das Firmament eines Beobachters in einem gewissen zeitlichen Abstand von ihm darstellt, keine Sphäre im Sinne der klassischen Geometrie ist, sondern eine sog. *nicht-*

kommutative Sphäre. Je grösser der zeitliche Abstand zwischen dem Beobachter und einer Sphäre ist, auf der Ereignisse stattfinden, die er auf seinem Firmament erscheinen sieht, und je mehr solcher Ereignisse auftreten, desto besser approximiert die Geometrie dieser Sphäre die Geometrie einer klassischen Sphäre.

Bis anhin haben die Vorstellungen von *Newton*, *Kant* und *Einstein* von der Raum-Zeit als eines a priori vorhandenen Schirms, auf den die Natur ihre Bilder der Ereignisse zeichnet, resp. eines Gefässes, innerhalb dessen die natürlichen Ereignisse stattfinden, das physikalische Denken dominiert. Dabei wird dieses Gefäss immer als vier-dimensionale klassische Mannigfaltigkeit beschrieben. Ich bin davon überzeugt, dass Versuche, die Theorie der Raum-Zeit und der Gravitationskräfte mit der Quantentheorie der Materie zu vereinigen darin münden werden, dass die Physiker sich zusehends mehr den Vorstellungen *Leibnizens*, *Weyls*, *Paulis* und *Grothendiecks* zuwenden werden; nämlich die Raum-Zeit sei nichts mehr als eine unserem Erleben angemessene *emergente Struktur*, die sich dazu eignet, die *makroskopischen* Anordnungen quantenmechanischer Ereignisse, die a priori keine geometrische Struktur besitzen, zu beschreiben – ähnlich wie die *Navier-Stokes Gleichungen* das *makroskopische* Verhalten molekularer Flüssigkeiten beschreiben.

Um noch einmal *Weyl* zu zitieren: “*Indeed, space and time are nothing in themselves, but only a certain order of the reality existing and happening in them.*”

- (ii) Neuere, spekulative physikalische Theorien mit extra Dimensionen beschreiben vollkommen *akausale* Ereignisse, die darauf beruhen, dass Teilchen aus extra Dimensionen plötzlich in unsere Raum-Zeit eindringen, von denen man vorher prinzipiell nichts wissen kann, da die extra Dimensionen unserer Beobachtung verschlossen sind.

Es ist daher zu erwarten, dass die Relativitätstheorien und mögliche Verallgemeinerungen derselben nicht nur den Abschied vom *Determinismus* der Newtonschen Mechanik, sondern auch vom *Kausalgesetz* der alten Physik mit sich bringen, wie es die Quantentheorie der Materie ohnehin verlangt, und dass das Primat einer Geometrisierung der Physik dem Primat einer abstrakteren, algebraischen Beschreibung der Natur weichen wird. Wenden wir uns denn der theoretischen Beschreibung der Materie zu!

4. Ein altes Paradigma: Die atomistische Struktur der Materie

Die moderne Physik baut ziemlich direkt auf Vorstellungen der Vorsokratiker *Leukipp* und *Demokrit* auf, die ca. fünfhundert Jahre vor unserer Zeitrechnung in Abdera, in Thrakien wirkten. Ihnen verdanken wir drei erstaunliche Ideen:

- (i) **Die Idee des Atomismus**, d.h. der Vorstellung, dass die Materie aus kleinsten nicht weiter teilbaren Bausteinen besteht. Diese Idee hat sich über die Jahrhunderte hinweg erhalten. Die *Epikuräer* waren Atomisten, *Newton* war ein überzeugter Atomist, und den Chemikern war die Existenz von Atomen seit Langem eine Selbstverständlichkeit. Der Atomismus wurde jedoch bis ans Ende des 19. Jahrhunderts von ernst zu nehmenden Wissenschaftlern, etwa den Physikern *Planck* und *Mach* und dem physikalischen Chemiker *Ostwald*, aus valablen Gründen bekämpft. *Heinrich Hertz* hat klar erkannt, dass das, was man zu seiner Zeit unter einem Atom verstand, ein äusserst komplexes, zusammengesetztes Gebilde sein musste. Er schlug als erster ein Modell eines zusammengesetzten Atoms vor, das dem Modell des Planetensystems ähnlich war.

Was man heute unter dem Begriff des ‚Atomismus‘ versteht hat jedenfalls mit den Vorstellungen von *Leukipp* und *Demokrit* und den Atomen der Chemiker

nur sehr beschränkt etwas zu tun. Darüber wird in diesem Abschnitt zu sprechen sein.

- (ii) **Das Naturgeschehen läuft nach ehernen Gesetzen ab.** Wir modernen Naturwissenschaftler würden allerdings anfügen, dass die Naturgesetze lediglich symbolisch-geistige Nachbildungen von Ausschnitten des Naturgeschehens sind und deshalb immer nur einen unvollständigen Teil des Naturgeschehens in anthropomorpher Art und Weise und mehr oder weniger genau beschreiben.
- (iii) **Das Kausalgesetz:** Jedes Ereignis ist die notwendige Folge einer Ursache. In dieser absoluten Form ist das Kausalgesetz der modernen Physik allerdings abhanden gekommen. Denn selbst wenn jedes Ereignis die notwendige Folge einer Ursache wäre, so sind wir nicht imstande, eine Beschreibung der Natur zu finden, in der jedes Ereignis als notwendige Folge einer in unserer Beschreibung mit enthaltenen Ursache erscheint. Ja der Begriff eines „Ereignisses“ macht in unseren Theorien nur noch beschränkt Sinn.

Im folgenden soll es nun darum gehen, die moderne Sicht des Atomismus kurz darzustellen.

Aus der Sicht der Wissenschaft des ausgehenden 19. Jahrhunderts erschien es angemessen, die Materie als ein *kontinuierliches Medium* zu beschreiben, wie es, im Gegensatz zu *Newton*, schon *Bernoulli* und *Euler* vorgeschwebt hatte. Der Atomismus der *Newtonschen Mechanik* erschien als ein dem *Newtonschen Gravitationsgesetz* angepasstes Artefakt. Man hatte von *Hamilton* im Anschluss an *Newton*, *Euler* und *Lagrange* gelernt, dass man Modelle der Materie als *Hamiltonsche dynamische Systeme* beschreiben soll. Legt man einer solchen Beschreibung ein Modell der Materie als kontinuierliches Medium zu Grunde, so stösst man in dessen mathematischer Beschreibung auf ein Hamiltonsches System mit unendlich vielen Freiheitsgraden, d.h.

auf eine „*Feldtheorie*“ der Materie. Beispiele solcher Hamiltonscher Feldtheorien der Materie sind die *Vlasov* Theorie materiellen Staubes, die *Eulersche* Beschreibung inkompressibler Flüssigkeiten und die *Maxwellsche* Theorie des elektromagnetischen Feldes.

Im Jahre 1925 haben *Heisenberg* und *Dirac* entdeckt, wie man eine recht allgemeine Klasse Hamiltonscher Systeme *quantisieren* kann: Das Produkt der imaginären Einheit mit der Poisson Klammer zweier klassischer beobachtbarer Grössen ist durch den Kommutator zweier Operatoren, die diesen Grössen entsprechen, zu ersetzen. Dieses Rezept kann man nun beispielsweise auf die *Vlasov* Theorie materiellen Staubes anwenden. Was ist das Resultat? Überraschender Weise, und dies ist eine ziemlich neue Einsicht, findet man *die klassische Newtonsche Mechanik ununterscheidbarer Punktteilchen*, in der die *Newtonsche Gravitationskonstante* die Rolle der Planckschen Konstante spielt. Im Falle der Eulergleichungen findet man eine klassische Theorie von Wirbeln mit quantisierter Vortizität. Im Beispiel der Maxwellschen Theorie des elektromagnetischen Feldes findet man *Einsteins* Theorie der Lichtquanten. (Einzelheiten dazu entnehme man der Folie.) In der quantisierten Theorie erscheint das klassische Feld, das den Zustand des Systems wiedergibt, als der Erwartungswert eines sog. *Feldoperators* in bestimmten, sog. kohärenten Konfigurationen sehr vieler identischer „Atome“ oder *Elementarsysteme*.

Man kann also mit Fug und Recht behaupten, die klassische Newtonsche Himmelsmechanik identischer Punktteilchen sei eine „*Quantentheorie*“, nämlich die Quantisierung der *Vlasov* Theorie. Umgekehrt kann man die *Vlasov* Theorie als einen klassischen oder Molekularfeldlimites der Himmelsmechanik zurückgewinnen – eine Einsicht, die man dem Duo *Braun* und *Hepp* und Herrn *Neunzert* verdankt. Ähnliches kann man von den Euler Gleichungen sagen und natürlich von der Maxwellschen Theorie des elektromagnetischen Feldes, die ja historisch Anlass zur Entdeckung der

Quantentheorie gegeben hat. In allen diesen Beispielen erscheint die atomistische Struktur der Materie, resp. des Strahlungsfeldes als die Folge einer „*Quantisierung*“. In der Quantentheorie erhält die Idee, es gebe physikalische Systeme, die nicht weiter in Teilsysteme zerlegt werden können, eine präzise Form. Zusammen mit der Idee, identische Teilsysteme seien ununterscheidbar, bildet sie die Essenz des Atomismus.

Man könnte sagen, Atomismus und Quantentheorie seien siamesische Zwillinge. Wie wir im nächsten Abschnitt sehen werden, ist ihr Zusammenspiel die tiefere Ursache dafür, dass unsere moderne quantenmechanische Beschreibung der Natur *keine realistische Naturbeschreibung* mehr darstellt, sondern nur noch von empirischen Wahrscheinlichkeiten spricht, mit denen Folgen von möglichen Ereignissen eintreten *können*. Verwirrend ist ausserdem dass das, was man klassisch für ein „*Ereignis*“ hält, und *dessen Gegenteil* sich nicht mehr gegenseitig ausschliessen, was eine Folge sog. *Interferenzeffekte* ist. Doch mehr dazu im nächsten Abschnitt!

5. Abschied vom Realismus und vom Kausalgesetz in der Quantenmechanik

„Field physics, I feel, really plays only the role of ‘world geometry’; in matter there resides still something different, and real, that cannot be grasped causally, but perhaps should be thought of in the image of ‘independent decisions’, and that, in physics, we account for by statistics.“ (Weyl an Pauli, anno 1919)

In diesem vorletzten Abschnitt meines Vortrags geht es mir darum, kurz darzustellen, in welcher Weise die Physik in der Quantenmechanik Abschied von einer realistischen Beschreibung der Natur, die uns sagt, was geschieht, und nicht lediglich, was geschehen könnte, und vom Kausalgesetz von *Leukipp* und *Demokrit* genommen hat.

Stellen wir uns vor, ein Wasserstoffatom werde von einem Laserpuls so ionisiert, dass der gesamte *innere* Drehimpuls (man nennt ihn „*Spin*“) des Kerns und des Elektrons nach der Ionisierung gleich 0 sei. Stellen wir uns weiter vor, der Kern und das Elektron

bewegten sich in entgegengesetzte Richtungen voneinander weg. Messen wir nun den Spin des Elektrons und den Spin des Kerns in zwei weit aus einander liegenden Experimenten! Solche Experimente sind tatsächlich möglich. Man wird dann feststellen, dass die Messdaten für die beiden Spins in einer mathematisch präzise formulierbaren Art und Weise korreliert sind. Misst man beispielsweise beide Spins in derselben räumlichen Richtung, sagen wir *vertikal*, so stellt sich heraus, dass sie stets entgegengesetzt gleich sind. Derartige Korrelationen gibt es natürlich auch in der klassischen Physik: Wenn Frau Schwarz und Frau Weiss zur selben Zeit in Zürich Züge besteigen mit der uns bekannten Absicht, dass eine von beiden nach Winterthur und die andere nach Baden fährt, so genügt es experimentell festzustellen, dass Frau Schwarz in Winterthur eingetroffen ist, um sogleich zu schliessen, dass Frau Weiss in Baden eintreffen wird. Man erwartet aber vernünftigerweise, dass es im Prinzip festgestellt werden könnte, welche der beiden Damen nach Winterthur und welche nach Baden zu fahren beabsichtigte. Beispielsweise könnte ja ein Schaffner während der Bahnreise eine der Damen nach ihrem Namen fragen und seinen Kollegen im anderen Zug daraufhin telefonisch informieren.

In der Quantenmechanik ist die Situation völlig anders: Es ist *prinzipiell unmöglich* vorauszusagen, ob der Spin von z.B. dem Elektron bei einer Messung in, sagen wir, vertikaler Richtung nach oben oder unten stehen wird. Stellt sich jedoch im Experiment heraus, dass er nach *oben* steht, so kann man schliessen, dass der Spin des Kerns *bei einer Messung in vertikaler Richtung nach unten* stehen wird. Misst man aber den Spin des Kerns in *horizontaler* Richtung, so kann *nichts* darüber vorausgesagt werden, ob er nach links oder nach rechts stehen wird, *unabhängig* davon, was man über die *vertikale* Ausrichtung des Spins des Elektrons schon weiss! In Messungen des Kernspins „zwischen ‚vertikal‘ und ‚horizontal‘“ treten kompliziertere Korrelationen auf, die man klassisch *nicht* interpretieren kann. Die Theorie gibt nur Wahrscheinlichkeiten für mögliche Messergebnisse an.

Diese Aussagen beruhen wesentlich auf der *atomistischen Struktur der Materie*, in unserem Beispiel des Elektrons und des Kerns! Es gibt an und für sich zumindest nicht-relativistische Quantentheorien, die die Materie als kontinuierliches Medium beschreiben und deren Voraussagen *deterministisch* sind. Solche Theorien geben uns gute, approximative Beschreibungen grosser Systeme von sehr vielen identischen Atomen, beispielsweise des Kondensats eines Bose Gases bei tiefer Temperatur und hinreichend grosser Dichte. Aber sie sagen *nichts* über das Verhalten *einiger weniger Atome* aus!

Wenn man es genau nimmt, so kann man übrigens in der atomistischen Quantenmechanik nie mit absoluter Sicherheit sagen, wie die Spins der beiden Teilchen in solchen Experimenten ausgerichtet waren. Dafür liefert ein gutes Experiment bestenfalls eine überwältigende Evidenz, aber nie eine absolute Gewissheit. Es ist nämlich so, dass die beiden sich *scheinbar* ausschliessenden Ereignisse, 1. der Spin des Elektrons sei nach oben ausgerichtet gewesen, und 2. der Spin des Elektrons sei nach unten ausgerichtet gewesen, sich quantenmechanisch nie gegenseitig völlig ausschliessen! Für das Auftreten eines Ereignisses in einer bestimmten Reihe von Experimenten kann die Quantenmechanik leider nur eine Evidenz, aber nie eine völlige Gewissheit angeben, und damit trifft sie wohl das Verhalten der Natur, so wie es uns im Experiment erscheint. Mit welcher Evidenz ein Ereignis überhaupt stattgefunden hat, hängt nämlich davon ab, welchen weiteren Messungen man das System in der Zukunft unterzieht. Tröstlich bleibt allein, dass sich verschiedene Physikerinnen stets darauf einigen können, was sie in einem Experiment gesehen haben, d.h. mit welcher Evidenz gewisse Ereignisse stattgefunden haben. Die Evidenz dafür, dass ein Ereignis in einer bestimmten Reihe von Experimenten tatsächlich stattfindet, hängt davon ab, wie klein die *Interferenz* zwischen diesem Ereignis und seinem klassischen Gegenteil wird, d.h. vom Mass an *Dekohärenz*, das in einem Experiment, welches das Ereignis hervorrufen soll,

erreicht wird, und dieses Mass hängt auch davon ab, welchen weiteren Experimenten das System in *Zukunft* unterzogen wird.

In der nicht-relativistischen Quantenmechanik, so wie sie im Wesentlichen von *Heisenberg*, *Dirac* und *Schrödinger* anno 1925/26 geschaffen wurde, haben die eben formulierten Behauptungen den Status mathematischer Sätze. *Weyl* hat sie wie folgt zusammengefasst: In the quantum-theoretical description of Nature, „*the dualism of object and subject, of law and freedom, is already most distinctly predesigned.*”

Was also gestattet uns die Quantenmechanik denn über den Ausgang von Experimenten an Systemen des Mikrokosmos vorauszusagen?

Quantenmechanisch werden mögliche Ereignisse als sogenannte orthogonale Projektoren dargestellt. Die Summe des Projektors, der das mögliche Ereignis E darstellt, und des Projektors, der das Komplement von E , E^c , darstellt, ist die Identität, 1. Die Quantenmechanik erlaubt es nun, für eine zeitlich geordnete Reihe möglicher Ereignisse, E_1, \dots, E_n , in einem System, das sich zu Beginn der Experimente in einem gewissen „Zustand“ ω befand, ein Mass an Evidenz für deren mögliches Eintreten anzugeben und die empirische Wahrscheinlichkeit (*Jakob Bernoulli*), W , vorauszubestimmen, mit der diese Reihe möglicher Ereignisse in der Natur auftreten kann. Diese Wahrscheinlichkeit wird durch die Formel

$$W\{E_1, \dots, E_n\} = \omega(E_1 \cdots E_{n-1} E_n E_{n-1} \cdots E_1)$$

widergegeben. Sie stammt von *Eugene Wigner*, der ihre merkwürdigen Eigenschaften allerdings wohl noch nicht völlig verstanden hatte. Besseres Verständnis verdankt man *Fierz* und meinem Lehrer, Kollegen und Freund *Klaus Hepp*, zu deren Einsichten Leute wie *Griffiths*, *Gell-Mann* und *Hartle*, *Omnès* u.a. weitere Verfeinerungen beigetragen haben. Die Evidenz dafür, dass ein Ereignis E_i überhaupt stattfinden kann, wird dabei von

der Interferenz zwischen E_i und E_i^c im Laufe geplanter zukünftiger Messungen bestimmt. Ein Mass für diese Interferenz ist

$$|\omega(E_1 \cdots E_i \cdots E_n \cdots E_i^c \cdots E_l)|$$

*Diese Grösse hängt von den zur Sichtbarmachung der Ereignisse E_1, \dots, E_n benützten experimentellen Anordnungen ab, die im Prinzip **in unsere physikalische Beschreibung einzubeziehen** sind.*

Aber dies erscheint vielen unter Ihnen wohl schon ein wenig zu technisch.

Im Experiment wird man feststellen können, dass zwei Ereignisse, E_i und E_j , zwei verschiedenen Beobachtern unter Umständen in *unterschiedlicher zeitlicher Reihenfolge* erscheinen können. Man sagt dann, diese zwei Ereignisse seien *raumartig* von einander getrennt. Die Konsistenz des Wignerschen Formalismus erfordert dann, dass die beiden Projektoren E_i und E_j mit einander vertauschen, was man *Einstein Kausalität* nennt. Diese Einsicht gestattet es, den „Raum der möglichen Ereignisse“ mit einer kausalen Struktur zu versehen. Ausserdem werden verschiedene Beobachter verschiedene zeitliche Ausdehnungen und spektrale Zusammensetzungen, oder „Farben,“ für ein und dasselbe Ereignis registrieren. Daraus können Rückschlüsse über die Relativbewegung dieser Beobachter zu einander und über raum-zeitliche Krümmungsverhältnisse gezogen werden.

Man stellt fest, dass Quantenmechanik und Raum-Zeit Physik also nicht a priori inkompatibel sind. Leider fehlt es uns jedoch bis anhin an präzisen Modellen, die die Quantentheorie und die Physik der Raum-Zeit und der Gravitationsfelder mathematisch konsistent mit einander vereinen. Deshalb kann man in keiner Weise behaupten, die grossen Grundlagenprobleme der Physik seien nun alle gelöst! Leider wird für das Studium von Grundlagenproblemen aller Art in unserer utilitaristischen Gesellschaft wenig Geld und Zeit aufgewendet. *Oscar Wilde* hat in etwa gesagt: *Musse ist*

Geldverschwendung. Das haben die modernen Menschen unserer westlichen Gesellschaft verinnerlicht; und dies wird sich bestimmt irgendwann rächen

In jüngerer Zeit hat man entdeckt, dass sich die überaus seltsamen quantenmechanischen Eigenschaften der Materie dazu benützen lassen, um beispielsweise ein Teilchen zu teleportieren, oder um klassische Botschaften quantenmechanisch sicher zu kodieren und zu übermitteln, ohne dass ein Feind sie dekodieren kann, oder um für klassische Computer zu komplexe Rechnungen auf einem sog. *Quantencomputer* in erträglicher Zeit auszuführen. Man sollte allerdings sofort anfügen, dass die technologischen Probleme, die sich dem Bau eines funktionstüchtigen Quantencomputers entgegenstellen, bis anhin ungelöst sind.

Die Implikationen und Anwendungen der Quantenmechanik und des damit verknüpften Atomismus der Materie waren und sind spektakulär. Die Quantenmechanik hat z.B. Erklärungen der Stabilität der kondensierten Materie und vieler ihrer Eigenschaften, wie verschiedene Formen des Magnetismus oder optische Eigenschaften zutage gefördert. Sie hat eine Erklärung des periodischen Systems der Elemente und des Umstandes, dass sich die Elemente in chemischen Reaktionen stets gleich verhalten, hervorgebracht. Sie hat die Existenz von Antimaterie vorausgesagt – eine Voraussage, die man *Dirac* und *Weyl* und in ihrer allgemeinen Form *Res Jost* verdankt, und die experimentell glänzend bestätigt wurde. Sie gestattet uns zu verstehen, wieso es keine stabilen leuchtenden Sterne gibt, die viel schwerer als die Sonne sind; (*Chandrasekhar Limes*).

Unter den technologischen Anwendungen der Quantenmechanik sind nicht nur Kernenergie und Kernwaffen, sondern auch sympathischere Entwicklungen wie die Halbleitertechnologie, die hinter jedem „Handy“, jedem Flachbildschirm, jedem modernen Computer und jeder Solarzelle steht, die Laser, die heute in jedem CD Player und in modernen Bohrgeräten der Zahnärzte benützt werden, oder die

Kernresonanzspektroskopie, die man z.B. in medizinischen Bildgebungsverfahren verwendet.

In der Grosszahl heutiger Vorträge über Physik stehen solche Anwendungen der Quantenmechanik im Zentrum. Man schildert sie mit Hilfe einer Computerpräsentation, die fast immer viel zu viel und viel zu viel überflüssige Information bietet, die die Zuhörerschaft in offenbar angenehmer Art und Weise verwirrt. Ich möchte hier auf eine derartige postmoderne Übung verzichten.

6. Ein paar mehr philosophische Schlussbemerkungen

Die mechanistisch-deterministische Physik des ausgehenden 19. Jahrhunderts hat das physikalische Weltbild von religiösen und seelischen Projektionen befreit, wie sie *Bruno*, *Galilei* und *Newton* noch selbstverständlich waren. Man könnte argumentieren, die Relativitätstheorien und die Quantenmechanik hätten im modernen physikalischen Weltbild wieder eine Lücke für das Seelisch-Geistige geöffnet. Ich teile diese Auffassung nur insofern, als wir nun besser verstehen, dass die Physik kein getreues Abbild, sondern stets nur eine unvollständige symbolisch-geistige Repräsentation *möglichen* Naturgeschehens in der Sprache der Mathematik, nicht aber dieses selbst, widerzugeben imstande ist, sozusagen einen Fahrplan des Weltgeschehens, der die möglichen Reisen der Welt mehr oder weniger genau, aber weder strikte deterministisch noch intrinsisch kausal beschreibt. Die theoretische Physik *erklärt* das Naturgeschehen *nicht*, sie beschreibt es nur, wenn auch in mathematischer Sprache und von einem möglichst einheitlichen Gesichtspunkt aus. Sie hat davon zu sprechen, mit welchen Mitteln das Geschehen in der Natur beobachtet wird; denn von einem vom Beobachtungsakt unabhängigen, *objektiven* Zustand der Welt kann die Quantenmechanik nicht sprechen.

Die moderne Physik vermeidet ontologische Fragen (wie der Teufel das Weihwasser) und hat Vorstellungen von der Existenz fundamentaler Substanzen wie des Aethers und von ihrer Rolle im Naturgeschehen aus ihrem Diskurs verbannt.

Hermann Weyl sagt über die moderne Quantenphysik: „*It becomes evident that now the words ‚in reality‘ must be put between quotation marks; we have a symbolic construction, but nothing which we could seriously pretend to be the true real world.*” Und weiter: „*No other ground is left for science to build on than this dark but very solid rock which I once called the concrete ‚Dasein‘ of man in his world.*”

Offenbar in Unkenntnis dieser Dinge beklagt *Ludwig Wittgenstein*, dass „*an der Basis der ganzen modernen Sicht der Welt die Illusion*“ liege, dass „*die sogenannten Naturgesetze die Erklärungen der natürlichen Erscheinungen*“ seien. *Steven Weinberg*, einer der Väter des ‘Standard Modells’ der Teilchenphysik, entgegnet auf dessen Klage: „*Such warnings leave me cold. To tell a physicist that the Laws of Nature are not explanations of natural phenomena is like telling a tiger stalking prey that all flesh is grass... We could use help from professional philosophers in understanding what it is that we are doing, but with or without their help we shall keep at it.*”

Nun ja, diese Zitate zeigen, dass Philosophen im allgemeinen nicht viel von der Physik verstehen und Physiker nicht viel von der Philosophie; und weil ich selber Physiker bin, ist es an der Zeit, meine Darlegungen mit der endgültigen Erklärung dafür, was Naturwissenschaft ist, zu beenden, die wir *Dick Feynman* verdanken: „*Science is a way of trying not to fool yourself!*“

„*Soweit Feynman ihn verstand, murmelte der Professor (für Philosophie) etwas ähnliches wie: Mumm bumm wugga wugga mumm bumm... Dick hatte keine Ahnung, worum es in dem Aufsatz ging.*“ Tatsächlich las der Professor einen Aufsatz vor, den der Student *Dick Feynman* für sein philosophisches Seminar hatte schreiben müssen.

Ich danke Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit meinem „*mumm bumm wugga wugga...*“ gegenüber und hoffe, es sei nicht total unverständlich gewesen!