

Kleinste Elemente von Raum und Zeit in der Quantenphysik

"Wer über Quantenmechanik nachdenken kann, ohne wirr im Kopf zu werden, hat
sie nicht wirklich verstanden."

Niels Bohr (1885-1962)

**Hausarbeit von Jan Gerken
im Rahmen der Veranstaltung
"Die kleinen Wahrnehmungen"**

von Prof. Dr. Friedrich A. Kittler
an der Humboldt Universität zu Berlin

im Lehrbereich Ästhetik

Sommersemester 2003

	<p>Intro S.2</p> <p>Kurze Geschichte der Quantenphysik S.3</p> <p>Die Messmethoden der Quantenphysik und deren Grenzen S.8</p> <p>Kleine Teilchen S.11</p> <p>Kleine Zeit S.12</p> <p>Fazit S.14</p> <p>Quellen und weiterführende Literatur S.15</p>
--	--

Intro

Nach Kant sind Raum und Zeit Formen unserer Anschauung, mit denen das Material der Empfindungen geordnet wird. Raum und Zeit stellen die Bühne für sämtliche Vorgänge - bis zur Formulierung der Relativitätstheorie und der Quantenphysik. Hier werden Raum und Zeit zu Formen, die selbst erstmal einer Ordnung bedürfen. Und einer der umstrittensten Fragen hierbei ist, ob sie einen diskreten oder einen kontinuierlichen Charakter haben. Um es vorwegzunehmen: auf diese Frage und die der tatsächlich kleinsten, unteilbaren Elemente werde ich in dieser Arbeit keine Antwort geben können, wohl aber den Stand der Forschung und die Bemühungen um eine Lösung dieser Probleme beschreiben.

Kurze Geschichte der Quantenphysik

Der Beginn der Quantenphysik lässt sich bis auf 1900 zurückdatieren. Die klassische Physik konnte zu dieser Zeit, so glaubte man, alles berechnen und erklären, es waren nur noch einige unangenehme Gleichungen zu lösen. Die Hauptgebiete der Physik waren damals die Thermodynamik, die Mechanik sowie die elektromagnetische Physik. Doch in der Thermodynamik gab es ein Problem bei der Beschreibung der spektralen Energiedichte von Schwarzkörperstrahlung. Bei der Berechnung der Verteilung der Strahlungsenergie auf die einzelnen Spektralbereiche, kam man auf unendliche, räumliche Energiedichten. Dieses Problem wurde als Ultraviolett Katastrophe bekannt. So galt das Wiensche Gesetz nur für kleine Wellenlängen, die Rayleigh-Jeans-Formel hingegen nur für große. Obwohl beide

Formeln im Sinne der klassischen Physik korrekt waren, konnte man mit ihnen nicht die räumliche Energiedichte des gesamten Strahlungsspektrums berechnen.

Als Max Planck 1874 den Physiker Philip von Jolly fragte, ob er besser Musik oder Physik studieren solle, riet dieser ihm zur Musik, da in der Physik nur noch einige schmutzige Ecken ausgefegt werden müssen, er in der Musik hingegen die Chance hätte, Neues zu schaffen. Ausgerechnet Planck, der sich trotz dieses Rates für die Physik entschied, gelang es schließlich, ein neues Strahlungsgesetz zu entwickeln, das das Problem der Schwarzkörperstrahlung lösen sollte. Er stellte es in seiner Publikation "Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum" vor. Dieses Gesetz enthält auch das sogenannte "Plancksche Wirkungsquantum", eine Naturkonstante, dargestellt durch "h".

Die Formel $E=h\nu$ beschreibt die Absorption/Emittation von Strahlungsenergie durch einen oder mehrere Oszillatoren. " ν " ist die Frequenz der Energieanteile, " E " steht für die kleinste Energiemenge, die absorbiert/emittiert wird. Doch die Oszillatoren können sich nur in Zuständen befinden, deren Energien ganzzahlige Vielfache des elementaren Energiequants " E " sind. Dies widersprach den bisherigen Ansichten der klassischen Physik, in der die Ergebnisse beliebige Zahlen sein konnten. Diesen Sachverhalt wollte allerdings kaum ein Physiker akzeptieren, auch der konservative Planck nicht, der mehrere Jahre vergeblich versuchte, das Wirkungsquantum in die klassische Physik zu integrieren. Schließlich hatte ja schon Leibniz behauptet: "Natura non facit saltus" (Die Natur macht keine Sprünge). Die bis dahin so allwissende klassische Physik entwickelte sich von nun an langsam zum makroskopischen Grenzfall der Quantenmechanik. (J.Schröter: "Classical Mechanics as a Limit of Quantum Mechanics"; Ann.Phys. Bd.23, (1969)) Bis es zu diesem Umbruch sollten allerdings noch fast drei Jahrzehnte vergehen.

1905 überführte dann Einstein die Quantenhypothese von Planck vom Oszillator auf die freie Strahlung. In der Arbeit "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt" führt er die Lichtquanten ein, die später als "Photonen" bezeichnet werden.

Vier Jahre früher wird in Würzburg Werner Heisenberg geboren (1901-1976), der ebenfalls versuchte, die Welt der Quanten mit der alltäglichen physikalischen Praxis zu verbinden. Als Assistent von Niels Bohr und Dozent an der Universität Kopenhagen trug er einen wesentlichen Teil zur "Kopenhagener Deutung" bei, die unter anderem auch den Welle-Teilchen-Dualismus beschrieb. Demnach liegt es an der Art der Beobachtung, ob ein quantenmechanisches Element als Welle oder Teilchen wahrgenommen wird. Die Kopenhagener Deutung umfasst ein ganzes Regelwerk die Quantenmechanik betreffend und wurde von einer Gruppe von Wissenschaftlern entworfen (unter anderem auch Max Born) und propagiert. Auch wenn diese Deutungen heute noch zur Anwendung kommen und kontrovers diskutiert werden, sollte man nicht vergessen, dass es sich hierbei nur um Interpretationen von Quantenphänomenen handelt.

Dies wurde deutlich, als Erwin Schrödinger, ein Physiker aus Wien sich an der Diskussion beteiligte. Er griff die Hypothese von Louis de Broglie auf, die besagt, dass sich prinzipiell jede sich in Bewegung befindende Materie auch als Welle auffassen lasse. Folglich übertrug er diese Hypothese auf die Elektronen im Atom und behauptete, dass Schwingungen kontinuierlich ineinander übergehen würden. Dies widersprach dem Kopenhagener Modell, das von diskreten, stationären Zuständen der Elektronen ausging.

Diese Diskrepanz lässt sich mit den unterschiedlichen Herangehensweisen an das Problem erklären. Heisenberg und sein Team bedienten sich der Matrizenmechanik, die sich auf im

Labor messbare Größen berief. Schrödinger hingegen benutzte die Wellenmechanik, die mathematisch um einiges leichter nachvollziehbar war und daher mehr Zuspruch fand. Schrödinger selbst löste dieses Dilemma, indem er 1926 bewies, dass beide Theorien mathematisch äquivalent seien. Dies konnte jedoch einen längeren Streit um die bessere Theorie nicht verhindern.

Im Jahre 1927 veröffentlicht Heisenberg dann eine der wichtigsten Arbeiten auf dem Gebiet der Quantenphysik mit dem Titel "Über den Anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik". Sie beinhaltet unter anderem das Unschärfe- bzw.

Unbestimmtheitsprinzip. Es besagt, dass die gleichzeitige Messung von zwei komplementären Größen (etwa Ort und Impuls) nie exakt sein kann. Möchte man beispielsweise den Ort eines bewegten Mikroteilchens möglichst genau bestimmen, wird die Messung der Geschwindigkeit umso ungenauer. Das Messen einer Größe auf molekularer Ebene ist zusätzlich ein Eingriff in die Messsituation. Somit wurde erstmals von einem Wissenschaftler eine Grenze der Erkenntnis in der Beobachtung der Natur definiert. Die philosophische Implikation ist, dass es so etwas wie einen objektiven Standpunkt nicht gibt. Zudem widerlegte Heisenberg das Prinzip der Kausalität, das seit Pierre Simon de Laplace (1749-1827) Anwendung fand. Es besagt, dass von einem Teilchen die zukünftige Bewegung voraussagbar ist, wenn alle auf es einwirkenden Kräfte bekannt sind. Und da die genaue Kenntnis von Ort und Impuls nach dem Unbestimmtheitsprinzip ja nicht möglich ist, kann es sich bei der Voraussage nur um statistische Wahrscheinlichkeiten handeln.

Auf diese Erkenntnisse aufbauend entstanden weitere Felder der Quantenphysik, wie beispielsweise die Teilchen- und Hochenergiephysik, sowie das heute allgemein gültige Modell des Atomkerns, bestehend aus Neutronen und Protonen.

Die beiden am schwersten vorstellbaren Eigenschaften der Quantenphysik sind der so genannte Welle-Teilchen-Dualismus und die Sprunghaftigkeit der Quanten. So liegt es an der Art der Beobachtung, ob sich Quanten wie Teilchen oder wie eine Welle verhalten. Die Physiker müssen vor Durchführung eines Experiments entscheiden, welche der beiden Verhaltensweisen sie untersuchen wollen und das Experiment danach ausrichten. Eine gleichzeitige Beobachtung beider Verhaltensweisen in einem Experiment ist bisher nicht gelungen.

Dazu Prof. Dr. Hans-Peter Dürr:

"Die Vorstellung, dass hier außerhalb von mir etwas ist, was wie ein Objekt ist, das ich auf den Tisch stelle - so etwas gibt es eigentlich gar nicht. Sondern es gibt etwas, was vergeht und wieder entsteht und wieder vergeht. Ich habe eine Kette von Erzeugungen von neuen Dingen und wenn ich nicht genau hingucke, dann sieht es so aus. Ich nehme zum Beispiel ein Elektron. Wir haben den Eindruck, ein Elektron läuft von hier nach hier. Das ist so ein Teilchen und dass es so auf einer Linie läuft, das ist eben der Grund, warum die Welt so stabil ist, weil es solche Dinge gibt, die weder entstehen noch vergehen. Dieses Elektron gibt es eigentlich gar nicht, sondern da gibt es etwas, was wie ein Elektron aussieht, im nächsten Augenblick wieder etwas, aber nicht an der Stelle, wo man es erwartet aber doch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit und dann wieder etwas und dazwischen gibt es nichts. Das heißt, die Welt besteht nicht aus Objekten, die mit sich identisch bleiben und der Zeit, von einem Ort zum anderen gehen, sondern die Welt wird jeden Moment neu erzeugt. Eine total andere Sichtweise, aber es ermöglichte die Vorstellung, dass die Schöpfung nicht abgebrochen ist. Wir brauchen nicht nur den lieben Gott am Anfang, der alles fertig macht, dann setzt er die Maschine in Gang und dann wird er eigentlich arbeitslos. Sondern in jedem Augenblick wird die Welt neu erschaffen, aber mit der Erfahrung, mit der Erinnerung, wie sie

vorher war. Und deshalb kopiert sie auch ein bisschen und einige Dinge, weil sie phantasielos sind, die werden genau kopiert. Und das sind dann die Dinge, die wir so verlässlich finden. Das ist die Materie, die hier bleibt. Ich hab den Tisch, ich geh raus, ich komm rein und er steht immer noch da. Diesem Tisch ist nichts anderes eingefallen, als sich selbst zu reproduzieren."

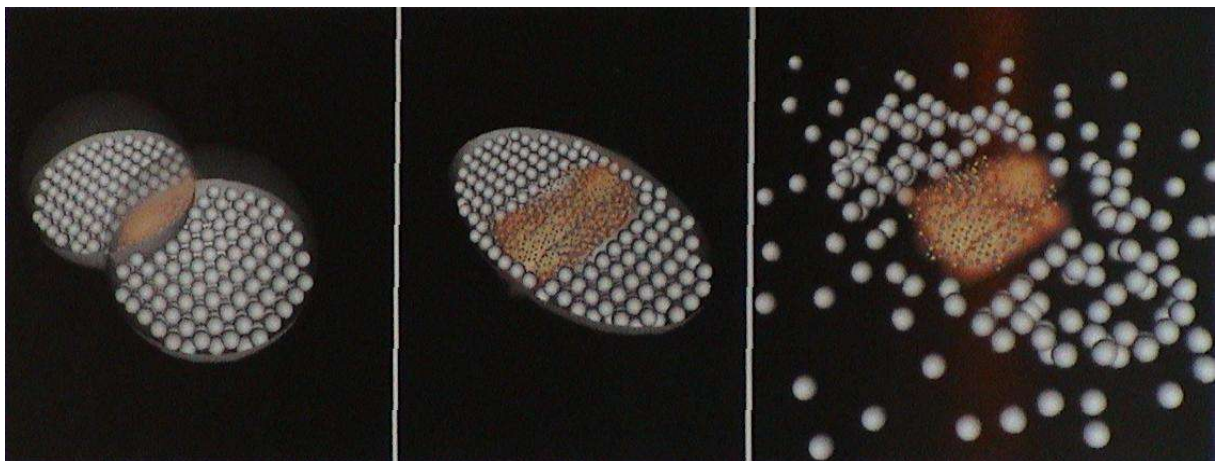
Und Dr. Walter Kroy im Gespräch mit ihm: *"Und trotz der Erfolge die die Physik und die Technik seit 300 Jahren gehabt haben, müssen wir zugeben, das ist nicht die volle Wahrheit. Denn wenn das Uhrwerksmodell richtig wäre, dann wäre seit dem Big bang alles vorausbestimmt. Das wäre ja traurig, dann könnten wir ja gar nichts ändern. Aber wenn das Weltmodell so ist, dass eine kleine Störung alles anders machen kann, dann haben wir eine Chance, eine Chance etwas zu tun."*

Darauf Dürr: *"Auf die diese Weise sind wir mit Schöpfer. Wir haben nicht das alles dem Gott überlassen, am Anfang alles hinzuschrauben, sondern in jedem Augenblick wird die Welt wieder neu geschaffen und wir sind beteiligt."*

Diese Sicht der Dinge etabliert sich nun auch langsam in der Gesellschaft. Der Staat oder einzelne Unternehmen entwickeln sich immer mehr weg vom Uhrwerksmodell, in dem jedes Rädchen funktionieren muss und zentral gesteuert wird, hin zu einem Netzwerkmodell.

Die Messmethoden der Quantenphysik und deren Grenzen

Die Suche nach dem kleinsten Teilchen gestaltet sich mit jedem Erfolg schwieriger. Je kleiner das zu beobachtende Teilchen, desto größer werden die dazu notwendigen Apparate. Und da größer auch teurer heißt, wird die beobachtende Quantenphysik seit 1993 immer häufiger von der deutenden abgelöst. Das bedeutet, dass die Grundlagenforschung auf diesem Gebiet in den Köpfen der Wissenschaftler geschieht und nur in seltenen Fällen experimentell bestätigt wird, da die Kosten für eine Versuchsdurchführung in keinem Verhältnis zur Erkenntnis stehen würden. So ist man bis heute an allen großen Beschleunigern beim Versuch eine Struktur von Elementarteilen nachzuweisen, an die Grenze von 10^{-20} Metern gestoßen. Dies soll jedoch nicht das Ende der Entwicklung der großen Mikroskope sein. Immer dichtere Teilchen werden mit immer größeren Energieladungen aufeinander geschossen.

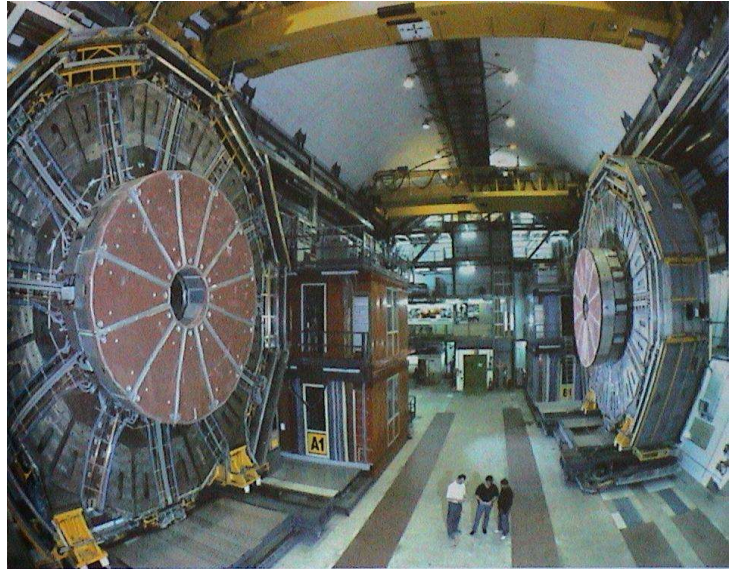
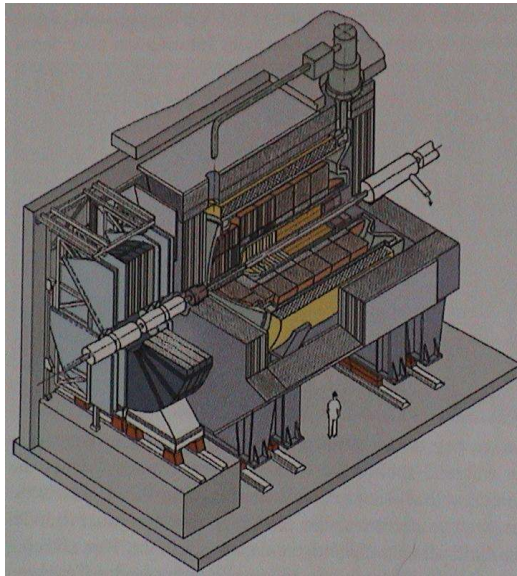


Kollision zweier Atomkerne (aus: ...und er würfelt doch!)

So soll ca. 2005 am LHC in Genf (CERN) ein Higgs-Teilchen (das massegebende Teilchen - sofern es existiert) nachgewiesen und ab 2010 am DESY in Hamburg (TESLA) auf seine Eigenschaften hin untersucht werden. Dasselbe gilt für das Quark-Gluon-Plasma, aus dem sich wenige Millionstel Sekunden nach dem Urknall (vor ca. 13,7 Milliarden Jahren) die heute vorherrschende Materie gebildet hat. In diesem Plasma treten Quarks und Gluonen

ungebunden auf. Bis heute konnte man jedoch in den Bruchstücken von beschossenen Atomkernen keine einzelnen Quarks (oder ihre Bruchstücke) finden, sondern sie nur im Verbund beobachten. Der Nachweis einzelner Quarks wird durch deren starke Anziehungskräfte untereinander verhindert. Sie zu trennen setzt eine Temperatur von 2×10^{12} Grad voraus oder eine Energieladung von 170 Mio. Elektronenvolt (eV). Genau dieses energetische Aufladen von Teilchen ist der Trick und der Grund für die enorme Größe der Beschleuniger. Je größer die Energie der Teilchen, desto kleiner ist ihre Wellenlänge, das heißt um so kleinere Strukturen lassen sich auflösen. Um kleine Teilchen sichtbar zu machen, müssen sie demnach mit immer größeren Energien beschleunigt, ihre Wellenlänge also verkürzt werden. Wenn beispielsweise zwei Bleikerne kollidieren, wird etwa die 3500 fache Energie der Protonenmasse frei. Um das Quark-Gluon-Plasma nachzuweisen, sind Energien erforderlich, die einige hunderttausendmal größer sind, als die im Inneren der Sonne, die Energiedichte übersteigt die eines normalen Atomkerns um mehr als das Dreißigfache. Im mikroskopischen Bereich ist dies zwar eine sehr große Größe, die Reaktion spielt sich allerdings auf sehr kleinem Raum ab (etwa die Größe eines Atomkerns). Im makroskopischen Bereich würde die Energie jedoch gerade mal ausreichen, um einen Esslöffel Wasser um ein Millionstel Grad zu erwärmen. Die Geschwindigkeit der Teilchen nimmt trotz Beschleunigung auch nur unbedeutend zu, da sie sowieso annähernd Lichtgeschwindigkeit beträgt, sie laut der Relativitätstheorie jedoch nicht erreicht werden kann. So beträgt der Geschwindigkeitsunterschied eines unbeschleunigten Teilchens (20 GeV) zu einem beschleunigten (100 GeV) gerade mal 0,094 m/s. Bei den ringförmigen Beschleunigern kann man das Zusammentreffen von Materie noch energiereicher gestalten, indem man beschleunigte Teilchen aus unterschiedlichen Richtungen aufeinander prallen lässt. Bei Zusammenstößen erhöht man also die Energie, um Teilchen in immer kleinere Stückchen zu zertrümmern oder um sie zu verschmelzen, in der Hoffnung, neue Teilchen mit größerer Masse nachweisen zu können. Denn umso größer die Masse der Teilchen wird, desto näher

bewegt sich die Forschung an den Urknall heran, vor dem die gesamte Masse des Universums wahrscheinlich in einem Punkt gebündelt war und sich seitdem ausdehnt.



Aleph-Detektor Cern (aus: Spektrum der Wissenschaft Spezial: Das Unendliche) links: Skizze des DESY-Detektors (aus: ... und er würfelt doch!)

Der Nachweis der Elementarteilchen wird in der so genannten Spurkammer erbracht. Diese Kammer ist, im Gegensatz zum eigentlichen Beschleuniger, mit Gasmolekülen gefüllt, die von den vorbei fliegenden Teilchen ionisiert werden. Zusätzlich ist eine große Anzahl von Drähten in dieser Kammer angebracht, an deren Enden das Teilchen eine elektrische Reaktion auslöst. Des Weiteren ist um die Spurkammer ein elektromagnetisches Feld gelegt, das das Teilchen von seiner Flugbahn ablenkt. Aus der Ablenkung lassen sich dann Ladung und Energie des Teilchens berechnen. Da diese Krümmung mit Zunahme der Teilchenenergie abnimmt, muss die Größe der Kammern oder die Stärke des Magnetfeldes ständig erhöht werden, je größer die Teilchenenergie des zu untersuchenden Objektes ist. Das Quark-Gluon-Plasma konnte bis jetzt nur in der Art nachgewiesen werden, dass sich die Protonen nach einer Kollision anders verteilen, als es das Relativistische Diffusionsmodell vorhersagt. Die sich

ausbreitenden Teilchen hatten, so die Deutung, keine Zeit mehr, sich gegenseitig in ein Gleichgewicht zu bringen.

Beschleunigt werden die Teilchen, vereinfacht dargestellt, nach dem Prinzip, wie das in einem Fernsehapparat oder einem Computerbildschirm geschieht. Eine Teilchenquelle, also ein Metall (oder Glühkathode) wird erhitzt, bis Elektronen aus ihr abdampfen, die durch ein elektrisches Feld beschleunigt werden. In dieser Beschleunigungsstrecke dürfen die Elektronen auf keine Hindernisse treffen, müssen also durch ein Vakuum fliegen. Von ihrer Bahn abgelenkt werden die Elektronen dann durch ein elektrisches oder magnetisches Feld, um dann auf den Schirm oder im Beschleuniger auf Materie zu treffen. Es gibt allerdings auch andere, kompliziertere Methoden.

Es wird jedoch deutlich, dass sich Probleme wie Nichtlokalität und nichtlokale Kausalität ergeben, wenn ein Beobachter Ereignisse registrieren möchte, die Informationen mit einer größeren Geschwindigkeit als seine Beobachtungsgeschwindigkeit austauschen.

Kleine Teilchen

Teilchen	Größe (Meter)
Wasserstoff-Atom	10^{-10}
Atomkern	10^{-14} (100 000 mal kleiner als Atom)
Kernteilchen (Proton, Neutron)	10^{-15}
Quarks, Leptonen	?

Kleine Zeit

Nach Stephen Hawking ist die Zeit eine vom Menschen erdachte Größe und somit dessen Problem, nicht eines der Physik. Dennoch befassen sich Physiker mit dieser Dimension, wenn auch eher theoretisch. Die kleinste Zeiteinheit, die im Zusammenhang mit der Quantenphysik auftritt, ist die Zeitspanne, die das Licht (300 000 km/s) braucht, um einen Femtometer (0,000000000000001 m; Größe eines großen Atomkerns) zurückzulegen. Für diese Zeitspanne würde das Quark-Gluon-Plasma im Experiment im DESY existieren. Ansonsten spielt die Zeit in der kleinen Welt der Quantenphysik eher eine untergeordnete Rolle.

Das Zeitabläufe relativ sind, ist seit Einstein unumstritten. Man denke nur an die Gedankenexperimente mit dem Raumfahrer in der Rakete, der durch seine hohe Reisegeschwindigkeit sehr viel langsamer altert, als sein auf der Erde gebliebener Zwillingbruder. Doch scheinbar ist nicht nur die Geschwindigkeit für das Zeitempfinden ausschlaggebend. Der für uns "normale" Menschen recht kurze Zeitraum von einer Sekunde, kann laut Fotini Markopoulou-Kalamara auch sehr lange dauern. In dem Fall nämlich, wenn man 10^{-35} Meter groß ist, also im Vergleich zu einem Atom so klein, wie ein Atom im Vergleich zur Erde erscheint. Hierbei handelt es sich um die so genannte Planck-Größe. So stark verkleinert, würde man die Zeit als eine Aneinanderreihung von vielen unteilbaren Zeitatomen wahrnehmen, die zwar schnell, jedoch nicht kontinuierlich aneinandergereiht, den

Zeitablauf ergeben. Ob sich für Gulliver auf seinen Reisen 12-fach verkleinert, bzw. vergrößert auch sein Zeitempfinden änderte, ist leider nicht überliefert. Und ob große Menschen schneller leben als kleine, ist auch nicht wissenschaftlich bewiesen. Denn die so genannte Quantelung der Zeit konnte bis heute experimentell weder bestätigt noch widerlegt werden.

Die Idee entstand aus der Zusammenlegung der Gravitationstheorie mit der Quantentheorie, der so genannten Quantengravitation. Sie geht davon aus, dass sowohl Raum, als auch Zeit ab einer gewissen Größe auf der Planck-Skala, nicht mehr als kontinuierliche Größen messbar sind, sondern nur noch in kleinen Sprüngen. Für den Raum liegt die Planck-Länge bei 10^{-35} Metern, die Planck-Zeit wird auf 10^{-44} Sekunden (eine Hundertstel Trilliardstel Trilliardstel Sekunde) geschätzt. Da für diese Größendimensionen heutzutage noch keine Meßmethoden vorhanden sind, versuchte man es auf einem anderen Weg. Nach Einstein breiten sich alle Lichtteilchen (Photonen) im leeren Raum gleich schnell aus. Durch die Quantenfluktuation sollten sich allerdings nach den Berechnungen eines Forscherteams, bei entsprechend langen Laufzeiten des Lichtes, kleine Effekte aufürmen und eine gewisse Signatur ergeben. Das hieße, dass das Licht von Milliarden von Lichtjahren entfernten Galaxien je nach Wellenlänge zeitversetzt auf der Erde ankommen müsste. Doch Beobachtungen mit dem Hubble-Teleskop konnten diese Annahme nicht bestätigen. Im Voraus berechnete Unschärfen und Körnigkeiten konnten nicht festgestellt werden. Dies darf jedoch nicht als Entkräftung der Raum-Zeit-Quantelungstheorie gewertet werden, da einige Wissenschaftler von Rechenfehlern ausgehen, beziehungsweise die Quantenfluktuation als nicht so intensiv annehmen, wie es das Forscherteam des Hubble-Experimentes tat.

Für die Kontinuität der Zeit spricht die Annahme, dass die Zeit mit der Ausdehnung des Universums verknüpft ist. Je schneller es sich ausdehnt, desto schneller vergeht die Zeit.

Würde sich das Universum wieder zusammenziehen, dann würde auch die Zeit rückwärts laufen, bis zu dem Punkt des Urknalls. Nur würden wir dieses Phänomen nicht feststellen können, da die Wahrnehmung (ebenso die Erinnerung) sich ebenfalls umkehren würde, für uns also alles weiterhin normal erscheinen würde.

Fazit

"Daher glaube ich, dass es keinen Teil der Materie gibt, der nicht, ich will nicht sagen teilbar, aber doch aktual teilbar ist; deshalb muss auch das kleinste Teilchen als eine Welt voll von einer Unendlichkeit verschiedener Geschöpfe angesehen werden."

Leibniz

Die Suche nach den kleinsten Elementen von Raum und Zeit ist, wie ich hoffentlich darstellen konnte, ein schwieriges, umfangreiches und kostspieliges Unterfangen. Sie ist eine Frage der Messbarkeit und somit auch eine Frage der technischen Entwicklung und der zur Verfügung stehenden Energie- und Rohstoffressourcen, weniger eine Frage der Existenz des unteilbar kleinen. Man muss sich damit abfinden, dass es schon in der normalen Physik Systeme gibt, die nicht prognostizierbar sind (Doppeltes Pendel mit zwei Freiheitsgraden). Dazu noch mal Hans-Peter Dürr:

"Aber nun stellt man fest, um diese kleinsten Teilchen zu bekommen, muss man sie immer genauer beobachten und dazu braucht man hohe Energien. Und jetzt passiert es: ich versuche ein kleinstes Teilchen zu finden, brauche aber einen Strahl, der hohe Energie hat und dieser

Strahl verwandelt sich wieder in Masse, sodass die Teilchen auf einmal gar nicht kleiner werden, sondern wieder größer. Es gibt gar kein kleinstes Teilchen, sondern bei der Beobachtung wird neue Materie erzeugt und sie ist nicht mehr die kleinste Materie. Mit anderen Worten: Teilchen sind nicht aus Teilchen zusammengesetzt, sondern alles ist Energie in verschiedenen Zusammenballungen.[...] Man hat die Materie immer weiter auseinander genommen und stellt fest, es bleibt etwas übrig, das nicht mehr die Eigenschaften unbelebter Materie hat, sondern solche, die man eigentlich dem Lebendigen zuordnet: Es ist nicht determiniert, es ist spontan, kreativ, es entsteht und vergeht!"

Zumindest wird es dem menschlichen Geist hoffentlich immer möglich sein, sich auch vom unvorstellbar Kleinen, die Hälfte vorzustellen (beispielsweise die Zeit die das Licht benötigt, einen halben Femtometer zurückzulegen). Daher bin ich eher ein Befürworter des konstanten Raum-Zeit-Modells, das aber auch unendlich kleine Größen miteinbezieht. Es ist zwar möglich mit Unendlichkeiten zu rechnen, sie gelten heute jedoch noch als "unphysikalisch".

Quellen und weiterführende Literatur

Professor Armin Hermann : Süddeutschen Zeitung vom 9.12.2000 "Ich dachte mir nicht viel dabei" Die wichtigste Gedankenschöpfung des 20. Jahrhunderts: Wie Max Planck auf die Idee der Quantentheorie kam

Patrick Illinger : Süddeutschen Zeitung vom 12./13. April 2003 Das Interview Fotini

Markopoulou-Kalamara über Zeit

Spektrum der Wissenschaft . Digest. - Heidelberg : Spektrum-der-Wissenschaft-Verl.-Ges.

Digest: Quanten-Phänomene - Heidelberg : Spektrum-der-Wiss.-Verl.-Ges., 1999

Spektrum der Wissenschaft . Spezial. - Heidelberg : Spektrum-der-Wissenschaft-Verl.-Ges.

Spezial: DasUnendliche - Heidelberg : Spektrum-der-Wiss.-Verl.-Ges., 2003

Spektrum der Wissenschaft . Heft 11/2003 - Heidelberg : Spektrum-der-Wissenschaft-Verl.-

Ges. - Heidelberg : Spektrum-der-Wiss.-Verl.-Ges., 2003

... und er würfelt doch : von der Erforschung des ganz Großen, des ganz Kleinen und der ganz vielen Dinge / [Bundesministerium für Bildung und Forschung ; DPG, Deutsche Physikalische Gesellschaft]. Hrsg. von Heiner Müller-Krumbhaar und Hermann-Friedrich Wagner. - Weinheim ; New York ; Chichester ; Brisbane ; Singapore ; Toronto : WILEY-VCH, 2001.

Quantenphysik : Illusion oder Realität? / Alastair I. M. Rae. Aus dem Engl. übers. von

Daniela Bailer-Jones. - Stuttgart : Reclam, 1996. - (Universal-Bibliothek ; Nr. 9607 : Reclam Wissen)

Der steinige Weg zu einem neuen Weltbild : die Entwicklung der Quantentheorie und

philosophische Probleme ihrer Deutung / Detlef Backes. - Aachen : Shaker, 2000. - (Berichte aus der Physik) ISBN 3-8265-7508-3

Geschichte der Philosophie : von den Anfängen bis zur Gegenwart und östliches Denken /
Christoph Helferich. Mit einem Beitr. von Peter Christian Lang. - München : Dt.
Taschenbuchverl., 1998. - (dtv ; 30706) Lizenz des Verl. Metzler und Poeschel, Stuttgart
ISBN 3-423-30706-4

Grenzgänger oder Mein Großvater war ein Quantenphysiker -Hans-Peter Dürr, von den
Wissenschaften zu den Machenschaften / Denkmal Film-Produktion, Bertram Verhaag

5. Quantenmechanik Teil 1. Grundlagen : mit 130 Aufgaben mit vollständigen Lösungen. - 4.
Aufl.. - 1997. - XII, 424 S. : (Vieweg-Lehrbuch theoretische Physik)