

Reise durch die Physik an ihre Grenzen^{1,2}

von

Jürg Fröhlich, ETH Zürich

Es ist eine Gepflogenheit, dass man sich in Abendgesellschaften über einem Glas Prosecco gegenseitig fragt (auch wenn man sich meistens gar nicht dafür interessiert): “Was machen Sie beruflich?” Wenn ich darauf antworte, ich sei theoretischer Physiker, dann ist die häufigste Reaktion ungefähr die folgende: “Physik, die habe ich nie verstanden!” Eigentlich würde man gerne anfügen: “Die mochte ich nie.” Aber dies hielte man für möglicherweise unhöflich.³ Andere reagieren mit der Frage: “Ja, machen Sie Atomphysik?” Dabei meinen sie aber Kernphysik, was gar nicht dasselbe wie Atomphysik ist, und denken mit einem leichten inneren Schauer an Kernkraftanlagen oder Kernwaffen, die sie aber – ein wenig irreführend – Atombomben nennen; so wie es schon *Karl Jaspers* im Titel seines berühmten Buches getan hat.

Aus der Annahme, dass es Leserinnen und Leser gibt, die diesen Text zu studieren beginnen, wage ich ein gewisses höfliches Interesse für meinen Gegenstand abzuleiten. Aber es ist trotzdem zu erwarten, dass die meisten Leserinnen und Leser die Physik für schwierig und wenig verständlich halten, und damit liegen sie ja gar nicht ganz falsch. Sie mögen sich fragen, was das für Leute sind, die als Physikerinnen oder Physiker ein Leben lang versuchen, mehr über die Natur herauszufinden. Die Welt ist so ungeheuer kompliziert ist, dass man sie i.a. gar nicht verstehen kann, und die meisten Fragen, die man über die Welt stellt, haben gar keine vernünftigen Antworten; resp. die Antworten, die wir darauf geben, haben keinen Erkenntniswert, sondern bestenfalls einen Gefühlswert. Die meisten Fragen über die Welt haben nämlich keine logisch zwingenden Antworten, man *entscheidet* sich für die eine oder andere Antwort. Fast alle Fragen, mit denen sich die Philosophen beschäftigen, haben diese Eigenschaft. Das heisst nicht unbedingt, dass sie uns gleichgültig sein sollen; denn sie beeinflussen das Denken, Fühlen und Handeln der Menschen, und dies macht sie wichtig. Physikerinnen und Physiker sind Leute, die begriffen haben, dass man, will man etwas gut verstehen, sich mit **äusserst einfachen** Phänomenen beschäftigen muss, und dies dann auch dank ihres oft etwas kindlichen Gemüts tun. Man denke etwa an Galilei, der vom schiefen Turm in

¹ Beitrag zu “An den Grenzen des Wissens”, herausg. von *F. Kraus* und *P. Walde*

² Dem Andenken an meinen ehemaligen Lehrer und Freund *Markus Fierz* (1912-2006) gewidmet

³ Einge sind vielleicht gar ein wenig stolz auf ihr Unverständnis. Sie werden sagen, dass diejenigen, die den Sternenhimmel mit den Augen eines Physikers betrachten, vom Zauber des Kosmos nichts mitbekommen. Dazu sagt der berühmte amerikanische Physiker *Richard P. Feynman*: “Poets say science takes away from the beauty of the stars – mere globs of gas atoms. Nothing is “mere”. I, too, can see the stars...and feel them. But do I see less or more? The vastness of the heavens stretches my imagination ... What is the pattern, or the meaning, or the why? It does not do harm to the mystery to know a little about it. For, far more marvelous is the truth than any artists of the past imagined!”

Pisa Steine fallen liess, woraus Einsichten entstanden, die die Welt verändern sollten!^{4,5} Die Physik befasst sich mit derart einfachen und isolierten (d.h. von anderen Geschehnissen näherungsweise unbeeinflussten) natürlichen Erscheinungen, dass man mit Aussicht auf Erfolg hoffen kann, sie mathematisch präzise zu beschreiben. Damit wird man in sehr geringem Ausmass befähigt, relevante Aussagen über Eigenschaften oder über Aspekte der Zukunft der natürlichen Welt zu machen; etwa über das Auftreten einer Sonnenfinsternis oder eines Kometen, den Gefrierpunkt oder Siedepunkt von Wasser, über den Zerfall instabiler Atomkerne, oder die Kraft einer Kernwaffenexplosion. Obwohl eine mathematisch präzise Beschreibung unserer Wahrnehmung bestimmter Bereiche von Naturvorgängen das Ziel jeder Naturwissenschaft sein müsste, gelingt sie in überzeugender Weise bis anhin nur in der Physik; und zwar eben deshalb, weil sich die Physik nur mit den vergleichsweise einfachsten natürlichen Erscheinungen befasst.

Die Sehnsucht, die Welt zu verstehen, um sich darin zurechtzufinden, ist ein Grundstreben der Menschen. Dieses ist zwar auf Grund seiner letztlichen Erfolglosigkeit absurd, kann aber ein ganzes Leben gestaltend durchwirken. *Albert Camus* sagt in seinem philosophischen Hauptwerk "Le Mythe de Sisyphe" dazu: "Je disais que le monde est absurde, et j'allais trop vite. Le monde n'est pas *raisonnable*, c'est tout ce qu'on peut dire. Mais ce qui est absurde, c'est la confrontation de cet irrationnel et de ce désir éperdu de clarté dont l'appel résonne au plus profond de l'homme. A partir du moment où elle est reconnue, l'absurdité est une passion, la plus déchirante de toutes." Dass dieser Gegensatz zwischen der Irrationalität der Welt und unserer Sehnsucht nach Klarheit und Verstehen Urängste weckt, das hat *Pascal* in dem berühmten Satz ausgedrückt: "Le silence éternel de ces espaces m'effraie."

Nun würde man sich allerdings trotz jener Sehnsucht kaum ein Leben lang mit einem Gegenstand beschäftigen, wenn man wüsste, dass dieser Beschäftigung jeder Erfolg versagt bleibt. In der Tat, die Fortschritte in den Erkenntnissen der Physik haben nicht nur unser Bild von der Welt entscheidend geprägt, sondern auch die Welt, in der wir leben, tiefgreifend verändert. Die gesamte moderne Technik ist zum grössten Teil physikalische Technik; sie beherrscht unser Leben in erstaunlichem Ausmass, im Guten wie im Schlechten, und wäre ohne die Entdeckungen der modernen Physik, derjenigen des neunzehnten **und** derjenigen des zwanzigsten Jahrhunderts, nicht denkbar. Dies gilt sogar für die Erfolge der sog. "Life Sciences", die ja zur Zeit so sehr im Gespräch sind. Wir können uns zwar die moderne Technik zunutze machen, ohne etwas davon zu verstehen. Aber ohne ein gewisses Verständnis der Naturvorgänge im Sinne der Physik wäre sie nie entstanden und würde sie stagnieren, auch in ihren Anwendungen in nicht-physikalischen Gebieten. Das haben viele Wissenschaftspolitiker noch nicht begriffen. Die uns geläufige Unterteilung der beobachtenden, experimentellen und theoretischen Beschäftigung der Menschen mit der Natur in verschiedene, einigermassen

⁴ Dass Galilei die Fallgesetze auf diese Weise entdeckt haben soll, scheint allerdings eine Legende zu sein. Er hat sie offenbar mit Experimenten auf schiefen Ebenen gefunden.

⁵ An dieser Stelle wäre auch an die Kurzgeschichte "Der Kreisel", von *Franz Kafka*, zu erinnern, die von einem etwas wunderlichen Philosophen handelt, von dem Kafka sagt: "Er glaubte nämlich, die Erkenntnis jeder Kleinigkeit, also zum Beispiel auch eines sich drehenden Kreisels, genüge zur Erkenntnis des Allgemeinen. Darum beschäftigte er sich nicht mit den grossen Problemen, das schien ihm unökonomisch." (Immerhin, der Kreisel ist nicht gerade das einfachste mechanische System, was man bei der Lektüre des meisterhaften Werks von Klein und Sommerfeld über die Theorie des Kreisels lernen könnte.)

wohldefinierte Disziplinen – Astronomie, Physik, Chemie, Biologie, etc. – ist relativ neu und stammt aus der Neuzeit. Zuvor waren diese im Begriff ‘Naturphilosophie’ zusammengefasst, und das Grundprinzip moderner Naturwissenschaft, Ideen über die Natur dem Test von Experimenten zu unterziehen, war noch nicht klar erkannt. Als das Ziel der **Physik** definieren wir heute, Sequenzen natürlicher Ereignisse und Korrelationen zwischen solchen Ereignissen in allen Bereichen der unbelebten Natur, von den kleinsten der Elementarteilchen bis zu den grössten des Universums, experimentell zu erforschen, aus den in Experimenten gesammelten Daten mathematische Modelle von einfachen Ausschnitten der Natur zu gewinnen, aus solchen Modellen Voraussagen herzuleiten, die dann wieder experimentell getestet oder gar praktisch genutzt werden können, und Modelle für verschiedene Bereiche von Phänomenen zu grösseren Theorien zusammenzufügen; schliesslich die gewonnenen Erkenntnisse technisch anzuwenden. Der heutzutage dominante Standpunkt, was das Geschäft der theoretischen Physik anbetrifft, wurde von *Niels Bohr* wie folgt umschrieben⁶: “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.” Bohrs Standpunkt gleicht demjenigen des philosophischen Idealismus (*Kant*, *Fichte* u.a.). Das eigentliche Wunder im Geschäft der Physik, und darauf hat der grosse theoretische Physiker *Eugene Wigner* eindringlich hingewiesen, ist die unerklärliche Effizienz (“unreasonable effectiveness”) der Mathematik im Verstehen der Naturvorgänge. Ihre mathematische Sprache macht die Physik gleichermaßen einfach und schwierig, auf alle Fälle aber sehr verlässlich. Wieso ist dieses Erzeugnis menschlichen Geistes, das wir Mathematik nennen, so hervorragend erfolgreich in der Beschreibung von Naturvorgängen auf Erden und in den hintersten Sphären des Universums? Diese Frage wäre ein ergiebiger Ausgangspunkt für philosophische Betrachtungen, etwa über den Gegensatz zwischen Materialismus und Platonismus, oder über Relativismus im Sinne von *Feyerabend*, oder über die soziale Bedingtheit aller Erkenntnis. Aber da solche Erörterungen selten zu grossen Einsichten geführt haben – wenn sie auch imstande sind, uns lange Winterabende auf angenehme Weise zu füllen – lasse ich Wigners und unser aller Staunen darüber, dass die Mathematik sich in der Physik so gut dazu eignet, die Natur mit einem Grad an Sicherheit, Präzision und Zuverlässigkeit zu beschreiben, die ihresgleichen suchen, lieber ohne Kommentare stehen⁷.

1. Eine kurze historische Exkursion

Die grossen Begründer der neuzeitlichen Physik, *Kopernikus*, *Kepler*, *Galilei* und *Newton*, waren zwar in ihrem Denken von z.T. uralten 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. So schrieb *Campanella*, einer der Vorkämpfer des damals neuen naturwissenschaftlichen Denkens, der für seine Überzeugungen siebenundzwanzig Jahre lang in Neapel im Kerker sass⁸:

⁶ *Niels Bohr*, “Collected Works”, North-Holland 1985, Band 6, S. 296

⁷ Die Philosophie hat freilich oft das Verdienst, wichtige Fragen in die Welt gesetzt zu haben, das Interesse der Menschen an solchen Fragen wachgehalten zu haben und sie sinnvoll zu kategorisieren.

⁸ Ich entnehme die Zitate in diesem Abschnitt dem Buche “Naturwissenschaft und Geschichte”, von

“Diese Neuigkeiten – älteste Wahrheiten – von neuen Welten (gemeint waren die Planeten und die Sterne), 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.” Hier wird angenommen, dass Gott nichts dagegen hat, dass wir die Natur erforschen – im Gegenteil – und dass die Resultate unseres Forschens der ganzen Menschheit zugänglich gemacht werden sollen. Es wird implizite auch angenommen, dass das Buch der Natur und ein Buch religiöser Offenbarung über verschiedene – heute würde man sagen “komplementäre” – Aspekte unserer Existenz sprechen, und dass deshalb Wissenschaft und Religion sich gar nicht widersprechen können. Das war, historisch gesehen, eine neue Haltung, die zu keiner Zeit für selbstverständlich galt oder gelten sollte.⁹ Ihr ist der grossartige Aufschwung der Naturwissenschaften in Europa zu einem beträchtlichen Teil zu verdanken.¹⁰ Das Denken der damaligen Menschen blieb jedenfalls religiös verankert, und sie haben die Natur als Manifestation göttlichen Wirkens verstanden.

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 Dialoges “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.” Hier wird (noch) nichts von den Ängsten Pascals sichtbar, und es wird die Hypothese ausgesprochen, dass überall im All die gleichen Gesetze herrschen, eine damals nicht selbstverständliche und für die Naturwissenschaft entscheidende Annahme. Denn die vorherrschende Meinung besagte, dass nur das Verhalten des Sonnensystems mit mathematischen Naturgesetzen zu beschreiben war. Die Sterne schienen sich ja nach dem kopernikanischen Weltbild nicht zu bewegen, und das Verhalten irdischer Gegenstände schien keinen Gesetzen zu folgen. Der irdische Bereich war der Bereich der Meinungen, in den Menschen äusserte sich der freie Willen, und die meisten irdischen Phänomene schienen unter dem Diktat des Zufalls zu stehen.

Auch *Johannes Kepler* war davon überzeugt, in seinen berühmten Gesetzen über die Planetenbewegung etwas vom Plane Gottes erkannt zu haben.

Markus Fierz, am 22. Juni 2006 an seinem 94. Geburtstag gestorben – von ihm und von *Res Jost* habe ich fast alles, was ich über Wissenschaftsgeschichte weiss, entweder

Markus Fierz, erschienen bei Birkhäuser, 1988

⁹ Denken Sie z.B. an die Kontroverse um “Kreationismus” versus Darwinismus, die in den USA noch immer gewisse, etwas beschränkte Gemüter erhitzt

¹⁰ Zu einem weiteren Teil ist er der Entstehung der experimentellen Methode und der Technik zu verdanken. Zu Beginn bestand die grosse Mehrheit der Experimente aus astronomischen Beobachtungen. Ihre Reichweite und Genauigkeit nahmen dank der Erfindung des Fernrohrs erheblich zu. Die Entdeckung der Bewegungsgesetze der Mechanik wurde erst durch die Erfindung präziser Zeitmessung, etwa in Form der Pendeluhr von *Huygens*, möglich. Viele Fortschritte in der Physik verdankt man der Entdeckung immer präziserer Methoden der Zeitmessung. Schliesslich beruht der Aufschwung der Naturwissenschaften in Europa auch auf den damals von Leuten wie *Pascal* und *Descartes* erzielten Fortschritten in der Mathematik.

persönlich oder beim Lesen ihrer Vorträge¹¹ gelernt – schreibt: “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 ähnlichem Staunen über die Wirksamkeit der Mathematik in der Naturbeschreibung ergriffen wie nach ihm Wigner und viele andere. Aber er suchte nach einer religiösen Erklärung, wogegen wir modernen Menschen dieses Staunen als solches stehen lassen, oder allenfalls nach tiefenpsychologischen Erklärungen suchen. So sagt *Pauli*:

“Theorien kommen zustande durch ein vom empirischen Material inspiriertes Verstehen, welches am besten im Anschluss an Plato als zur Deckung-Kommen von inneren Bildern mit äusseren Objekten und ihrem Verhalten zu deuten ist. Die Möglichkeit des Verstehens zeigt aufs neue das Vorhandensein regulierender, typischer Anordnungen, denen sowohl das Innen wie das Aussen des Menschen unterworfen sind.” Hier klingt die Jungsche Idee der Archetypen an.

Für *Newton*, dem wir die Entdeckung der Himmelsmechanik verdanken, war die Physik eine Art symbolischer Gotteslehre. Er fasste den Raum als “sensorium dei” auf, und die Zeit war Ausdruck der Ewigkeit Gottes.

Schon *Leibniz* hat jedoch das Unbefriedigende von Newtons Vermengung physikalischen Denkens und religiöser Vorstellungen erkannt und lebhaft Kritik daran geübt. Für uns heutige Menschen entbehren Galileis und Newtons Projektionen religiöser Vorstellungen in das Naturgeschehen des inneren Zusammenhanges mit den Resultaten ihres physikalischen Denkens. Während dieses sich als höchst folgen- und erfolgreich erwies, sind jene nur noch von historischem Interesse. Kurz nach Beendigung seines epochalen Hauptwerkes, der “*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*”, verfiel Newton in eine schwere seelische Krise, eine Gleichgewichtsstörung, die Fierz als teilweise durch das gestörte Gleichgewicht seines Weltbildes verursacht interpretierte, und er fährt dann fort: “Dann wäre sein damaliges Leiden ähnlich der Krankheit, von der heute ein grosser Teil der Menschheit befallen ist”, wobei Fierz sicher in erster Linie an die abendländisch-monotheistische, d.h. an unsere Gesellschaft dachte.

Das gestörte Gleichgewicht in Newtons Weltbild kann so gedeutet werden, dass sein physikalisches Denken ihn die Welt als ein deterministisches Uhrwerk, das nach ehernen Gesetzen abläuft, sehen liess, dass ihm aber die Ideen von Gottes Gegenwart im Naturgeschehen und vom freien Willen des Menschen trotzdem teuer waren¹². Das

¹¹ Ausser dem Buch von Markus Fierz sei dem Leser auch das Buch “Das Märchen vom Elfenbeinernen Turm”, von *Res Jost*, erschienen 1995 beim Springer-Verlag, zur Lektüre empfohlen

¹² Im mechanistisch-deterministischen Weltbild, wie es aus der Newtonschen Mechanik hervorging, war für Eingriffe Gottes in das Naturgeschehen nur insofern Platz, als man Ihm die Wahl der

mechanistische physikalische Weltbild wollte nicht zu den Phänomenen des Geistes passen. Das sind Gegensätze, die viele unter uns auch heute noch bewegen, was damit zu tun hat, dass sie in der Tat ein Problem darstellen, zwar kein physikalisches, aber eben doch ein Problem; dass die meisten unter uns aber auch gar nicht wissen, wie sich das physikalische Weltbild in neuerer Zeit geändert hat. Gerade davon soll nun im folgenden die Rede sein. Im Übrigen denke ich, dass die emotionelle Erkrankung vieler Menschen in unserer Zivilisation weniger mit den Widersprüchen in unserem Weltbild zu tun hat als damit, dass wir diese, wie überhaupt viele der uns bedrängenden Probleme so erfolgreich verdrängen oder zumindest verzerren und durcheinander bringen.

In den Widersprüchen in Newtons Weltbild klingt der Gegensatz zwischen unserem Erleben und Begreifen materieller und geistiger Phänomene an, die wir bis anhin nicht in eine Synthese zu vereinigen verstehen, auch wenn es bedeutende Fortschritte in der mathematisch-quantitativen Beschreibung geistiger Phänomene, etwa des assoziativen Gedächtnisses, gibt. Wir haben uns angewöhnt, seelische und emotionelle Phänomene aus unserem physikalischen Denken zu verbannen. Das hat seine guten Gründe! Historisch ist dies aber ein ziemlich neuer Trend.

Es ist überraschend und eigentümlich, dass noch der grosse Mathematiker *Bernhard Riemann*, dessen Denken über die 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 der Seele. Er schreibt: "Wir beobachten eine stetige Tätigkeit unserer Seele. Jedem Akt derselben liegt etwas Bleibendes zugrunde, welches sich bei besonderen Anlässen als solches kundgibt, ohne dauernden Einfluss auf die Erscheinungen auszuüben. Es tritt also fortwährend etwas Bleibendes in unsere Seele ein..., welches aber in demselben Augenblick aus der Erscheinungswelt völlig verschwindet." Darauf aufbauend, gelangt er mit völlig unmathematischen Argumenten zur Hypothese, "dass der Weltraum mit einem Stoff erfüllt ist, welcher fortwährend in die ponderablen Atome strömt und dort aus der Erscheinungswelt verschwindet." Er denkt sich, 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 die, auch in der Vorstellung Giordano Brunos und Newtons, dafür verantwortlich ist, dass die Himmelskörper nach den Gesetzen der Himmelsmechanik ihre Bahnen ziehen. In einer Form, die keinen Zusammenhang mit geistigen Phänomenen zu knüpfen versucht, überlebte die uralte Vorstellung – *Demokrit* hatte sie schon entwickelt – eines das Weltall erfüllenden Stoffes, der sozusagen für die Einhaltung der Naturgesetze verantwortlich ist, in der Aetherhypothese bis zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts. Sie wird immer wieder neu zum Leben erweckt. *Pauli* hat darüber spekuliert, um zu erklären, wie die Natur dazu gezwungen wird, die Wahrscheinlichkeitsgesetze der Quantenmechanik zu erfüllen, und man kann auch in der Hypothese der "dunklen Energie" der Astrophysiker, die die beobachtete beschleunigte

Anfangsbedingungen, aus denen sich die Welt nach den ewigen Gesetzen der Mechanik deterministisch entwickelt, zugestehen konnte – ein allerdings uns moderne Menschen wenig überzeugender Gesichtspunkt

Expansion des Universums erklären soll, eine Wiederbelebung der Aethervorstellung sehen, wenn man dies mag. Ich möchte aber schon jetzt betonen, dass die moderne Physik die Substanzdiskussion vermeidet. Auch “erklärt” sie das Naturgeschehen nicht, sondern sie bescheidet sich darauf, es so präzise wie möglich zu beschreiben.

Was psychologisch interessant ist, ist der Umstand, dass Riemanns ziemlich irrationale Ideen über jenen Stoff offenbar für sein mathematisches Nachdenken über die Geometrie überaus fruchtbar wurden. Das ist ein oft beobachtetes Phänomen. Irrationale Ideen, die aus den Tiefen des Unbewussten aufsteigen, führen aufs Mal auf wunderbare und überaus rationale Entdeckungen. Was den erfolgreichen Wissenschaftler vor dem Durchschnittsmenschen auszeichnet, ist seine Fähigkeit, den Weizen von der Spreu zu scheiden und der Gefahr zu entrinnen, dass irrationale, aber möglicherweise ästhetisch ansprechende Ideen inflationär vergrößert werden und sich zu Vorurteilen verfestigen. Für Riemann wurde aus jenem Stoff schliesslich die metrische Geometrie gekrümmter Räume, die zur Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie werden sollte. Damit ging er allerdings seiner Qualität als Geistessubstanz verloren.

In gewisser Weise sind wir modernen Physiker zu den alten Ideen der Vorsokratiker *Leukipp* und *Demokrit* zurückgekehrt, die ca. fünfhundert Jahre vor Beginn unserer Zeitrechnung in Abdera, in Thrakien, wirkten¹³. Es ist mir nichts darüber bekannt, dass sie ihr Nachdenken über die Welt mit religiösen Projektionen überlagert haben, was sie sehr modern macht. Ihnen verdanken wir drei erstaunliche und für die Naturwissenschaft fundamentale Ideen, von denen im folgenden noch zu reden sein wird:

- (1) Die Idee des **Atomismus**, d.h. der Existenz kleinster unteilbarer Bausteine, aus denen alles, insbesondere auch der Aether, der den Raum erfüllt, zusammengesetzt ist. Diese Idee hat sich über die Jahrhunderte hinweg erhalten. Newton war ein überzeugter Atomist – er fasste sogar das Licht als aus Atomen zusammengesetzt auf – und den Chemikern war die Existenz der Atome seit Langem fast eine Selbstverständlichkeit. Der Atomismus wurde aber bis ans Ende des neunzehnten Jahrhunderts von ernstzunehmenden Wissenschaftlern, etwa von den Physikern *Planck* und *Mach* und dem physikalischen Chemiker *Ostwald*, aus valablen Gründen bekämpft. Der direkte experimentelle Nachweis von Atomen gelang erst zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts; sozusagen unmittelbar sichtbar gemacht werden können sie erst seit der Erfindung der Elektronen- und der Tunnelmikroskopie. Was man heute mit dem Begriff ‘Atomismus’ meint hat allerdings mit dem Atomismus von Leukipp und Demokrit nur noch die allgemeine Idee der “*Unzerlegbarkeit*” gemeinsam.
- (2) Das **Kausalgesetz**: Jedes Ereignis ist die notwendige Folge einer Ursache. In dieser Form ist uns das Kausalgesetz wohl abhanden gekommen. Die meisten Physiker denken, die Physik erkläre nicht, was Ereignisse eigentlich sind und wie sie zustandekommen. Sie mache nur darüber Aussagen, mit welchen Mitteln Ereignisse sichtbar gemacht werden können und mit welcher Wahrscheinlichkeit sie dann eintreten.¹⁴ Das Kausalgesetz gilt aber weiterhin, wenn es darum geht, das Verhalten dieser Wahrscheinlichkeiten in der Zeit vorauszusagen. Dabei stösst man allerdings auf das in der Relativitätstheorie zutage geförderte Problem,

¹³ Siehe z.B. “Kleine Weltgeschichte der Philosophie” (Band 1), von *Hans Joachim Störig*, erschienen bei Fischer, 1972

¹⁴ Ich halte diese verbreitete Ansicht zwar für diskussionswürdig aber nicht unbedingt für definitiv

dass es grundsätzlich unmöglich ist, die Zukunft, auch nur diejenige der Wahrscheinlichkeiten, mit denen gewisse Ereignisse eintreten, mit Sicherheit vorauszusagen, weil uns dazu *prinzipiell* zu wenig über die Vergangenheit der Welt bekannt ist.

- (3) Das **Naturgeschehen läuft nach ehernen Gesetzen** ab. Als Physiker werden wir an dieser Hypothese festhalten wollen. Wir meinen aber, dass sie nur dann akzeptabel sei, wenn man einräumt, dass die quantitativen Verhältnisse, die in unsere Formulierungen der Naturgesetze eingehen, sich im Laufe der Zeit verändern könnten, und dass Naturgesetze immer nur einen unvollständigen Ausschnitt des Naturgeschehens mehr oder weniger genau beschreiben. Denn sie sind ja lediglich symbolische Nachbildungen von Teilen des Naturgeschehens.

In der Nachfolge von *Archimedes* und *Galilei* ergänzt *Newton* diese drei Ideen durch die Forderung, dass die Gesetze, nach denen sich das Naturgeschehen abspielt, aus der experimentellen Erfahrung gewonnen und an der Erfahrung getestet werden müssen – “**hypotheses non fingo**”¹⁵. Naturgesetze lassen sich prinzipiell nie *beweisen*, ihre Aussagen sollen aber konkret und präzise genug sein, dass sie sich durch Vergleich mit der Natur testen und allenfalls *falsifizieren* lassen; wie *Karl Popper* zurecht betont hat.

Die Verbannung religiöser Vorstellungen und des Leib-Seele Problems aus dem Reich der Physik hat sich im neunzehnten Jahrhundert endgültig durchgesetzt. In diesem Jahrhundert gelangten die Physiker zu einem mechanistischen Weltbild, vom Konzepte her Leukipp und Demokrit nachempfunden: Die Materie ist aus Atomen zusammengesetzt; die Welt ist eine Maschine, die nach den ewigen Gesetzen der Mechanik und Optik läuft; dabei hat das Kausalgesetz universelle Gültigkeit. Die Naturgesetze, die die Menschen seit Archimedes und Galilei auf Erden entdecken, gelten überall im Universum in gleicher Weise; eine Überzeugung, die, wie gesagt, schon Giordano Bruno vertrat, was zu seiner Zeit sehr revolutionär war. Viele intelligente Leute stellten sich vor, dass die ganze Geschichte des Universums und von allem, was darin krecht und fleucht, im Prinzip aus uns allerdings im Grossen und Ganzen nicht bekannten Anfangsbedingungen nach den Gesetzen der Mechanik vorzuberechnen wäre, wenn es nur jenen *Laplaceschen* Dämon gäbe, der diese Anfangsbedingungen kennt und so ungeheuer gut und schnell rechnen kann.¹⁶ Zwar wurden im neunzehnten Jahrhundert als Ergänzung zu den Gesetzen der Mechanik und der Optik diejenigen der **Elektrodynamik** entdeckt. Aber derjenige, der diese Entdeckung zum Abschluss brachte, *James Clerk Maxwell*, erkannte, dass die Optik ein Spezialfall der Elektrodynamik sei, und er versuchte, die elektrischen und magnetischen Felder als Schwingungsmuster eines den ganzen Raum erfüllenden elastisch-mechanischen Mediums, eben jenes rätselhaften Aethers, den sich Demokrit als Konfiguration von Atomen dachte, zu verstehen, d.h. die Elektrizitätslehre und die Optik letztlich auf die Mechanik zurückzuführen. Maxwell ist einer der grössten Physiker, die es je gegeben hat, und er hat mit seiner Rückführung der Optik auf die Elektrodynamik die erste erfolgreiche **Unifizierung** zweier scheinbar von ganz verschiedenen Phänomenen handelnder Theorien zustandegebracht und damit dem Traum einer einheitlichen Theorie aller natürlichen Erscheinungen zu einem ungeahnten

¹⁵ Hier sei allerdings an das oben angeführte *Pauli*-Zitat vom “zur Deckung-Kommen” erinnert

¹⁶ Dass ein Bild der Welt als einer vom Information sammelnden Beobachter unabhängigen, autarken deterministischen Maschine, die nur Objekt ist und das beobachtende Subjekt nicht enthält, erkenntnistheoretisch höchst problematisch ist, springt allerdings in die Augen

Aufschwung verholten. Maxwell und nach ihm *Boltzmann* und *Gibbs* waren ausserdem mit grossem Erfolg damit befasst, die **Erscheinungen der Wärme**, so wie sie durch die Thermodynamik beschrieben werden, mechanisch durch die Bewegung von Atomen und Molekülen und ihre gegenseitigen Wechselwirkungen zu deuten¹⁷, woraus die statistische Mechanik entstand, ein weiteres Beispiel einer grossartigen Vereinheitlichung im physikalischen Weltbild. Aber seine Versuche, die Elektrodynamik mechanisch zu erklären, blieben letztlich erfolglos.

Mit der Skizzierung des mechanistischen Weltbildes des ausgehenden neunzehnten Jahrhunderts sind wir dorthin gelangt, wo unser Mittelschulunterricht in Physik bestenfalls aufgehört hat. Dieses Weltbild hatte eine gewaltige Suggestivkraft, und es gab gegen das Ende des neunzehnten Jahrhunderts respektable Physiker, die überzeugt waren, die Physik stehe kurz vor ihrem endgültigen Abschluss. *Heinrich Hertz*, einem der grossen Wegbereiter und 'Propheten' der Physik des zwanzigsten Jahrhunderts und dem Vater der Radiowellen, wurde deshalb davon abgeraten, Physik zu studieren. Zum Glück hat er diesen Rat in den Wind geschlagen.

Meine kurze Exkursion in die Entwicklungsgeschichte physikalischer Ideen, so wie sie seit der Neuzeit entstanden und Ende des neunzehnten Jahrhunderts vorlagen, möchte ich mit der Feststellung schliessen, dass offenbar das Numinose und das Psychische erfolgreich aus dem Weltbild der Physik vertrieben wurden, und daran hat sich seither nichts mehr geändert.

2. Die Krise des mechanistischen Weltbildes und die Geburt der modernen Physik

In diesem zweiten Abschnitt soll es uns darum gehen, ein rudimentäres Verständnis der Widersprüche in der Physik des neunzehnten Jahrhunderts herzustellen, die zusammen mit neuen experimentellen Daten anfangs des zwanzigsten Jahrhunderts die Revolutionen im physikalischen Weltbild hervorbrachten. Derjenige, der diese Widersprüche als einer der ersten klar erkannt und ausgesprochen hat, war *Heinrich Hertz*¹⁸. In seiner Kieler Vorlesung "*Über die Constitution der Materie*" fasst er zunächst die neue Elektrodynamik Maxwells zusammen, zu der er später so vieles beitragen sollte. Sie ist im Gegensatz zur Gravitationstheorie Newtons eine **Nahewirkungstheorie**: Die Kräfte zwischen elektrisch geladenen Teilchen werden mit endlicher, nämlich mit Lichtgeschwindigkeit durch das elektromagnetische Feld vermittelt. Hertz kannte natürlich die Idee, dass das elektromagnetische Feld durch Schwingungen des Aethers hervorgebracht würde. Er hat in seiner Vorlesung eindringlich auf die Widersprüche in

¹⁷ Ob Naturwissenschaft das Naturgeschehen lediglich beschreibt oder deutet oder gar erklärt ist eine Frage, die ich hier nicht anschneiden möchte. Man könnte dazu meinen Beitrag im Büchlein "Interpretation in den Wissenschaften", herausgegeben von *I. Dalferth* und *Ph. Stoellger*, erschienen bei Königshausen und Neumann, 2005, konsultieren. (Man kann zwar Aussagen, die im Rahmen eines Modells oder einer Theorie unerklärlich bleiben, dadurch "erklären", dass man sie auf tieferliegende Aussagen einer umfassenderen Theorie zurückführt. Aber die Physik versucht nicht zu erklären, wieso die Erde um die Sonne kreist; sie tut es, und zwar nach bestimmten Gesetzmässigkeiten. – "*Die Frage, warum Herr Geiser, Bürger von Basel, sich in diesem Tal (des Tessins) niedergelassen hat ist müssig; Herr Geiser hat es getan.*" In: "Der Mensch erscheint im Holozän", von *Max Frisch*, Suhrkamp Verlag, 1979)

¹⁸ Ich verweise hier auf die hervorragende Hertz-Biografie von *Albrecht Fölsing*, "*Heinrich Hertz, eine Biografie*", erschienen bei Hoffmann und Campe, 1997

den Einzelheiten der Aetherhypothese hingewiesen. Das Konzept der Nahewirkungstheorie fand er dagegen einleuchtend und universell gültig. Daraufhin hat er versucht, die Eigenschaften der ponderablen Materie, soweit sie damals bekannt waren, theoretisch zu interpretieren. Seine Vorlesung fand noch vor der Entdeckung des Elektrons im Jahre 1897 durch *J.J. Thomson* statt, das *Rutherfordsche* Modell eines Atoms als eines mikroskopisch kleinen Abbildes des Planetensystems, mit dem Atomkern im Zentrum und den Elektronen, die darum herumkreisen, war noch nicht bekannt. Was aber bekannt war, waren spektroskopische Daten, nämlich Daten über die Wellenlängen und die Intensität des Lichtes, das von angeregten Atomen ausgesandt wird. Daraus schloss Hertz scharfsinnig, dass die Atome zusammengesetzte Gebilde sein müssen. Er sagt:

“Die kleinsten selbständigen gleichen Teilchen, von denen wir reden, die Atome, sind jedenfalls äusserst komplizierte Dinge. Keine Vorstellung von ihnen kann unpassender sein als die von einem ausdehnungslosen Punkte... Wir sehen, dass die Atome fähig sind, Schwingungen in ihrem Inneren auszuführen; es müssen also schon mehrere Massen vorhanden sein, die durch Kräfte in der gegenseitigen Ruhelage gehalten werden; aber wir sehen auch, dass viele Metaldämpfe Hunderte, ja vielleicht, wenn wir genau zusehen, Tausende von Schwingungen von sich geben.” Erstaunlicherweise nimmt Hertz das Rutherfordsche Modell des Atoms voraus, indem er den Aufbau der Atome mit dem Planetensystem vergleicht. Er hat auch eindringlich vor der Übertragung anschaulicher klassischer Vorstellungen auf die Physik der Atome gewarnt. Mit ansteckendem Optimismus geht er aber davon aus, dass eine Theorie der Atome gefunden werden könne. Erlebt hat er ihre Geburt nicht mehr, da er schon im Alter von nur sechsunddreissig Jahren am Neujahrstage 1894 verstarb.¹⁹ Hertz hat auch das Verdienst, auf das Rätselhafte der Gleichheit zwischen träger und schwerer Masse der Materie, d.h. auf den Umstand, dass das Gravitationsfeld ein Beschleunigungsfeld ist, mit grosser Klarheit hingewiesen zu haben. Dieses sog. **Aequivalenzprinzip**, das zwar in Newtons Gravitationsgesetz eingeht aber darin keine natürliche Erklärung findet, wurde zu einer wesentlichen Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, die auch die Gravitationskräfte durch eine Nahewirkungstheorie beschreibt und sie als durch die Geometrie der Raum-Zeit verursacht erklärt.

Man kann sagen, dass Hertz in mannigfacher Weise der geistige Vater Einsteins war.

Als bald darauf das Rutherfordsche planetare Atommodell vorlag und gar durch Experimente untermauert war, entdeckte man, dass es im Rahmen der klassischen Physik zu grossen Widersprüchen Anlass gibt: Nimmt man dieses Modell ernst, so kommt man im Rahmen der klassischen Mechanik und Elektrodynamik elektrisch geladener Punktteilchen zum Schluss, dass

1. die Atome instabil sein und in kürzester Zeit verstrahlen müssten; und
2. die erstaunliche Identität im Verhalten verschiedener Atome der gleichen Sorte, z.B. in chemischen Reaktionen, keinerlei natürliche Erklärung finden würde.

Auch die damals schon bekannte experimentelle Tatsache, dass die Wellenlängen des Lichtes, das von den Atomen einer Sorte ausgesandt wird, nur diskrete Werte annehmen können, fand im Rahmen der klassischen Physik keine Erklärung. Eine diesen

¹⁹ Er erlag einer sich durch den ganzen Körper ausbreitenden bakteriellen Infektion, einer Sepsis, die man heute mit Antibiotika wahrscheinlich kurieren könnte

Sachverhalt für Wasserstoffatome wiedergebende Formel war 1885 vom Basler Mathematik-Lehrer *J. J. Balmer* aus den experimentellen Daten erraten worden.

Allgemein zu reden, fanden fast gar keine Eigenschaften kondensierter Materie, wie ihre Farbe, ihr Aggregatzustand, ihre spezifische Wärme bei tiefen Temperaturen, ihre elektrische Leitfähigkeit... vor allem aber nicht der Umstand, dass sie so **stabil** ist und dass ihre Eigenschaften über die Zeiten in allen Experimenten in gleicher Weise in Erscheinung treten, eine plausible Erklärung im Rahmen der klassischen Physik des neunzehnten Jahrhunderts. Eigentlich wäre für die klassische Physik eine **Kontinuumstheorie der Materie** natürlich gewesen, so wie sie für Gase, Flüssigkeiten und feste Körper von *Bernoulli*, *Euler* und anderen entwickelt worden war. Dass Newtons Himmelsmechanik die Sonne und die Planeten näherungsweise als Punktteilchen zu beschreiben imstande ist, erklärt sich aus der $1/r^2$ Form des Newtonschen Gravitationsgesetz, ist also kein Grund zur Annahme einer atomistischen Konstitution der Materie. Die Phänomene, die durch die Wärmelehre beschrieben werden, schienen damals noch nicht auf die Existenz von Atomen hinzuweisen. Aber der Atomismus und die Idee des punktförmigen Teilchens geisterten als Irrlichter durch das Reich der klassischen Physik. Sie schienen durch Entdeckungen wie diejenige des Elektrons immer plausibler zu werden, führten aber in ihrem Rahmen gleichzeitig zu grossen Widersprüchen, weshalb berühmte Wissenschaftler bis in die ersten Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts an einer Kontinuumstheorie der Materie festhielten, die allerdings deren Eigenschaften auch nicht zu erklären imstande war.

Schon in den Jahren 1851 und 1853 führte *Fizeau* berühmte optische Experimente durch, die anzudeuten schienen, dass eine Bewegung relativ zum Aether nicht festgestellt werden könne, respektive, dass der Aether von bewegten Flüssigkeiten mitgeführt werden müsse. Andererseits passte die Aberration des Sternenlichtes als Folge der Erdbewegung gut zur Aetherhypothese. Die amerikanischen Physiker *Michelson* und *Morley* versuchten 1886, durch optische Interferenzexperimente die Erdbewegung relativ zum Aether direkt nachzuweisen. Aber ihre experimentellen Ergebnisse waren negativ.

Experimente mit Elektronenstrahlen schienen später anzudeuten, dass die träge Masse eines Elektrons von seiner Geschwindigkeit abhängt, ein im Rahmen der Newtonschen Mechanik unverständlicher und darum äusserst verwirrender Befund.

Was rein theoretische Erwägungen anbetrifft, so wurde erkannt, dass die Symmetrien der Grundgleichungen der klassischen Newtonschen Mechanik und diejenigen der Maxwell'schen Gleichungen der Elektrodynamik nicht zueinander passen wollten. Dieser Sachverhalt fiel insbesondere dem grossen Mathematiker *Henri Poincaré* auf. Er überlegte sich ausserdem scharfsinnig, dass das Konzept der Gleichzeitigkeit von Ereignissen höchst problematisch wird, wenn man davon ausgeht, dass die Lichtgeschwindigkeit die grösstmögliche Geschwindigkeit ist, mit der Kräfte, Wirkungen und Daten übertragen werden können.

Ich gehe davon aus, dass Leuten wie Poincaré auch der höchst problematische Sachverhalt auffiel, dass die Bewegungsgesetze der Mechanik nur in speziellen Bezugssystemen, nämlich den sog. Inertialsystemen von Beobachtern, auf die keinerlei äussere Kräfte einwirken, eine einfache Form haben. In beschleunigten Bezugssystemen aber treten sog. Scheinkräfte, *Zentrifugal-* und *Corioliskräfte*, auf. Auf Grund des oben im Zusammenhang mit Hertz erwähnten Äquivalenzprinzips schien es jedoch nicht ohne Weiteres möglich zu sein, zwischen Gravitations- und Scheinkräften zu unterscheiden,

und damit war nicht klar, wie Inertialsysteme allgemein zu definieren wären. Die Wahl von Bezugssystemen ist allerdings willkürlich – was die Mathematiker damals schon klar verstanden – und man hätte aus allgemeinen Gründen zur Überzeugung gelangen müssen, dass die Naturgesetze eine von der Wahl des Bezugssystems unabhängige, invariante Form haben sollten; (man sagt, sie sollen die Form von Gleichungen zwischen Tensorfeldern haben). Klar wurden diese Dinge allerdings erst im Verlauf langer Beschäftigung mit der allgemeinen Relativitätstheorie.²⁰

Angeregt durch Bedürfnisse der eben entstehenden elektrischen Beleuchtungsindustrie machten an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt zu Berlin anno 1900 zwei Gruppen von Experimentalphysikern, nämlich *Lummer* und *Pringsheim* und dann *Rubens* und *Kurlbaum*, Experimente über die spektrale Zusammensetzung und deren Temperaturabhängigkeit des Lichtes, das von einem Ofen, resp. einer Glühbirne im thermischen Gleichgewicht ausgesandt wird. Sie fanden höchst merkwürdige Resultate, die auf den ersten Blick im Rahmen der klassischen Physik gar nicht zu deuten waren. Schon ältere experimentelle Resultate zu dieser sog. thermischen Strahlung führten *Wien* Ende des neunzehnten Jahrhunderts auf eine Strahlungsformel, die im Rahmen der klassischen Physik keine Erklärung fand. Aber sie gab die neueren experimentellen Resultate nicht korrekt wider. *Max Planck* war damals sozusagen der Haustheoretiker in Berlin. Ihm gelang es im Jahre 1900, eine relativ einfache Formel zu erraten, die die experimentellen Befunde seiner experimentellen Kollegen mit grosser Genauigkeit wiedergab: Wir sprechen von der **Planckschen Formel** für die spektrale Energiedichte der Hohlraumstrahlung, und diese Formel steht für die **Geburtsstunde der Quantentheorie**.

In Plancks Formel kamen eine schon bekannte und zwei neue fundamentale Naturkonstanten vor: die Lichtgeschwindigkeit, c , die für die Wärmelehre fundamentale Boltzmannsche Konstante, k , und die für die Quantentheorie zentrale Plancksche Konstante, h , die man auch **Plancksches Wirkungsquantum** nennt. Die Werte dieser Konstanten hat Planck mit ansprechender Genauigkeit aus den experimentellen Resultaten seiner Berliner Kollegen bestimmt. Bekannt war ihm ausserdem die Gravitationskonstante, G_{Newton} , die in Newtons Gesetz der universellen Gravitation vorkommt. Planck erkannte, dass es sich bei diesen vier Konstanten um *fundamentale Naturkonstanten* handelt, und dass sich aus ihnen natürliche Einheiten der Zeit, der Länge, der Masse und der Temperatur ergeben, die sog. *Planckschen Einheiten*. Er sagt dazu: “Diese Grössen behalten ihre natürliche Bedeutung so lange bei, als die Gesetze der Gravitation, der Lichtausbreitung im Vacuum und die beiden Hauptsätze der Wärmetheorie in Gültigkeit bleiben; sie müssen also, von den verschiedensten Intelligenzen nach den verschiedensten Methoden gemessen, sich immer wieder als die nämlichen ergeben.” Er erahnte, dass sie gegen alle seine ursprünglichen Absichten für revolutionäre Veränderungen im physikalischen Weltbild stehen, und von diesen soll im folgenden die Rede sein. Hier ein erster kurzer Hinweis:

k und h : Atomismus und nichtrelativistische Quantentheorie

c : Spezielle Relativitätstheorie, Nahwirkungstheorie des Elektromagnetismus

c und G_{Newton} : Allgemeine Relativitätstheorie, Nahwirkungstheorie der Gravitation

k , h , und c : Relativistische Quantenfeldtheorie (Gravitationskräfte vernachlässigt)

k , h , c und G_{Newton} : Noch unbekannt, aber “the handwriting is on the wall” – *vielleicht*

²⁰ Siehe z.B. Abschnitt 2.5 des Buches “General Relativity”, von Norbert Straumann, erschienen im Springer-Verlag, 2004

Planck selbst hat Wesentliches zu diesen Veränderungen beigetragen. Aber der grosse Revolutionär war *Albert Einstein*.

3. Von den revolutionären Veränderungen im physikalischen Weltbild im ersten Viertel des zwanzigsten Jahrhunderts

Die Physik hat während des letzten Jahrhunderts radikale Umwälzungen durchgemacht, aus denen grossartige neue Möglichkeiten der Technik hervorgingen und, damit verbunden, Segnungen und Bedrohungen unserer Zivilisation. Um gleich ein gängiges Missverständnis zu beseitigen, betone ich, dass jene Umwälzungen die alte, klassische Physik weder unbrauchbar, noch "falsch" gemacht haben. *Viktor Weisskopf* hat dies wie folgt formuliert²¹: "We are all working for a common and well defined aim: to get more insight into the workings of Nature. It is a constructive endeavour, where we build upon the achievements of the past; we improve but never destroy the ideas of our predecessors."

Neue Theorien lehren uns Wichtiges über die Beschränkungen, Gültigkeits- und Genauigkeitsgrenzen von älteren Theorien, machen diese, sind sie durch Experimente solid untermauert, aber keineswegs überflüssig. Niemand würde die Bewegung der Planeten um die Sonne aus den Bewegungsgesetzen der Quantenmechanik bestimmen wollen, obwohl die Quantenmechanik eine fundamentalere Theorie als die Newtonsche Mechanik ist. Die quantenmechanischen Korrekturen zur Newtonschen Theorie der Planetenbewegung sind derart gering, dass sie für alle praktischen Zwecke keine Rolle spielen. Es ist eine Erfahrungstatsache, dass neue Theorien Vorgängertheorien, aus denen sie hervorgegangen sind, i.a. in denjenigen Grenzbereichen, in denen die Vorgängertheorien im Vergleich mit dem Experiment erfolgreich waren, reproduzieren.

Am Anfang der Umwälzungen in der Physik des zwanzigsten Jahrhunderts, so wie sie aus den Entdeckungen des ausgehenden neunzehnten Jahrhunderts hervorgingen, standen die experimentelle Bestätigung eines alten, aber immer wieder bezweifelten **Paradigmas** und **drei Revolutionen**, die Quantentheorie, die spezielle Relativitätstheorie und die allgemeine Relativitätstheorie. Das Gebäude der modernen theoretischen Physik steht auf dem damals geschaffenen Fundament. Neuere Entdeckungen entsprechen neuen Stockwerken dieses Gebäudes.

Das Paradigma ist die **atomistische Konstitution** der Materie. Es wird erst im Lichte der ersten der drei Revolutionen, der **Quantenrevolution**, plausibel und gehört zu ihr wie ein Zwilling zum anderen. Die Quantenrevolution wurde durch die experimentellen Entdeckungen an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt zu Berlin und ihre theoretische Deutung durch Planck ausgelöst. Diese führten auf einen höchst merkwürdigen Sachverhalt. Obwohl z.B. Newton sich das Licht als aus kleinen Teilchen zusammengesetzt dachte und damit verschiedene Erscheinungen der Optik, etwa die Brechungs- und Reflexionsgesetze zu deuten imstande war, hatte sich zu Beginn des neunzehnten Jahrhunderts die Wellentheorie des Lichtes, die dieses im Anschluss an die Ideen von Huygens als Wellenerscheinung deutete, durchgesetzt. Sie wurde durch Maxwells Entdeckung der elektromagnetischen Natur des Lichtes zur Gewissheit. Ausgehend von Plancks Formel für die Hohlraumstrahlung und mit Hilfe

²¹ V. Weisskopf, "The Privilege of Being a Physicist", erschienen bei Freeman, 1989

thermodynamischer Betrachtungen fand nun *Einstein* in der vielleicht revolutionärsten seiner fünf berühmten Arbeiten aus dem Jahre 1905, dass das Licht **atomistisch** konstituiert sei. Er fand nämlich, dass das Licht aus Lichtquanten – man nennt sie heutzutage *Photonen* – zusammengesetzt ist, die sich nicht weiter teilen lassen und sich in mancher Beziehung wie Teilchen benehmen. Sie haben eine bestimmte Energie und einen bestimmten Impuls, die durch die Wellenlänge des Lichtes bestimmt sind. Einstein hat seine Entdeckung, für die er 1921 den Nobelpreis erhielt, wie folgt beschrieben:

“Monochromatische Strahlung von geringer Dichte ... verhält sich in wärmetheoretischer Beziehung so, wie wenn sie aus voneinander unabhängigen Energiequanten von der Grösse $h \cdot \nu$ bestünde.” (Dabei bezeichnet ν die Frequenz des Lichtes.)

Diese Entdeckung entsprach eher der Auffassung des Lichtes als einer korpuskularen Erscheinung, wie sie Newton vertreten hatte. Daraus hat Einstein u.a. das Gesetz des zuerst von Heinrich Hertz experimentell erforschten photoelektrischen Effektes hergeleitet. Im Anschluss an einen Vortrag von *Fierz*²² versuche ich nun zuerst die verwirrende Natur der Einsteinschen Entdeckung zu erklären.

Nach Maxwell können sich Lichtwellen durchkreuzen, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen. Wo ein Wellenberg einer Lichtwelle auf denjenigen einer anderen Welle trifft, verstärkt sich das Licht; wo ein Wellenberg und ein Wellental zusammentreffen, wird es schwächer. Darauf beruhen die optischen Interferenzerscheinungen, die man z.B. zur Messung der Wellenlänge einer Lichtwelle benützen kann. Zu diesem Zweck kann man eine Lichtwelle auf eine ebene geschliffene Glasplatte auffallen lassen. Ein Teil der Welle wird dann durch die Glasplatte dringen, ein anderer Teil wird auf ihrer Oberfläche reflektiert. So erhält man zwei phasenkohärente Teilstrahlen, die man anschliessend, durch weitere Reflektionen oder Linsen, auf einem Leuchtschirm wieder zur Interferenz bringen kann. Die beiden Teilstrahlen haben vorher verschiedene Wege durchlaufen. Falls dieser Wegunterschied ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge beträgt, so verstärken sich die beiden Teilstrahlen, weil dann wieder ein Wellenberg auf einen Wellenberg trifft. Andernfalls stellt man eine Schwächung der Lichtintensität fest, die von der Wellenlänge und vom Wegunterschied abhängt. Die Wegunterschiede kann man messen und so die Wellenlänge der Lichtwelle bestimmen. Für solche Versuche ist es entscheidend, dass sich bei Reflektionen oder nach Durchdringen der Glasplatte die Wellenlänge der Lichtwelle nicht geändert hat.

Nun besteht aber nach Einstein das Licht aus unteilbaren Lichtquanten, die sich z.B. im photoelektrischen Effekt wie räumlich lokalisierbare Teilchen verhalten. Man würde demnach erwarten, dass im oben beschriebenen Experiment Lichtquanten in bestimmten Augenblicken von der Lichtquelle in der Fortpflanzungsrichtung der Lichtwelle ausgesandt werden. Da ein Lichtquant nicht teilbar ist, so würde man sich vorstellen, dass es auf der Oberfläche der Glasplatte **entweder** reflektiert wird, **oder** sie durchdringt. Von einer Aufspaltung in zwei Teilstrahlen könnte dann nicht die Rede sein. Anschaulich kann man sich nur eine der beiden Möglichkeiten, entweder die Wellennatur des Lichtes oder dessen Teilchennatur, vorstellen. **In der Natur treten aber, je nach Experiment, beide auf.** Die Paradoxie rührt davon her, dass wir uns vorstellen, ein Lichtquant sei so etwas wie ein punktförmiges Teilchen, das im oben beschriebenen Interferenzexperiment einen **bestimmten** Weg, entweder denjenigen des reflektierten Teilstrahles oder

²² *M. Fierz, loc. cit.*

denjenigen des durch die Platte dringenden Strahles durchlaufen müsse. Wenn wir nun experimentell feststellen wollen, welchen der beiden Wege ein Lichtquant durchläuft, so müssen wir messend in seine Reise eingreifen. Durch eine solche Messung, die das Aufstellen von Apparaten erfordert, wird aber das von der Wellentheorie vorausgesagte Interferenzbild zerstört, ja das Lichtquant wird i.a. von der Messapparatur absorbiert, und die Wellenlänge der Lichtwelle kann daher nicht mehr durch Interferenz gemessen werden. Das Interferenzmuster wird aber wieder erscheinen, sobald wir **nicht** mehr messen wollen, auf **welchem** Wege das Lichtquant von der Lichtquelle auf den Interferenzschirm gelangt ist. Offenbar macht es ohne eine Messung **keinen** Sinn, von einem bestimmten Weg eines Lichtquants von der Lichtquelle zum Interferenzschirm zu sprechen. Intuitive Bilder, die sich gegenseitig auszuschliessen scheinen, können nie gleichzeitig zur Erklärung **eines** experimentellen Befundes, hingegen zur Erklärung sich scheinbar widersprechender Befunde herangezogen werden und werden im Anschluss an *Niels Bohr* "**komplementär**" genannt.

Einsteins Entdeckung der Lichtquanten hat gezeigt, dass das Licht atomistisch konstituiert ist. Lichtquanten sind elementare Systeme, die man nicht als aus mehreren Teilsystemen zusammengesetzt beschreiben soll. Sie existieren in beliebig vielen **identischen** Exemplaren, die sich durch kein Experiment unterscheiden lassen. Versteht man den Begriff "*Atom*" wörtlich, so würde man unter einem "*Atom*" ein Exemplar eines solchen elementaren physikalischen Systems verstehen. Davon gibt es quantenmechanisch zweierlei Sorten, die sog. *Fermionen* und die sog. *Bosonen*.²³ Der *Atomismus* des Lichtes ist eine Folge seiner *Quantennatur* und macht in der klassischen Physik keinen Sinn. Was hier im Spezialfall des Lichts zutage tritt, scheint aber ein allgemeiner Sachverhalt zu sein: Der Atomismus und die Quantennatur der Materie gehören untrennbar zusammen. In einem gewissen, präzisen Sinn kann sogar die Newtonsche Mechanik unteilbarer Punktteilchen als eine Quantisierung einer Kontinuumstheorie der Materie aufgefasst werden.

Die Quantenmechanik nichtrelativistischer materieller Teilchen, also z.B. von langsamen Elektronen oder Atomkernen, wurde im Anschluss an Arbeiten *Einsteins*, *Bohrs*, *Sommerfelds*, *de Broglies* u.a. im Jahre 1925 in drei epochalen Arbeiten von *Born*, *Heisenberg* und *Jordan* und kurz darauf, in einer etwas anderen, aber äquivalenten Form von *Schrödinger* 1926 zu einer mathematisch geschlossenen Theorie entwickelt. Ein Ergebnis dieser fundamentalen Entdeckungen war, dass materielle Teilchen, wie das Elektron, nebst ihrem Korpuskelcharakter gleichzeitig Wellencharakter haben. *Dirac* hat sie in den Jahren 1928 und 1929 so verallgemeinert, dass sie mit der speziellen Relativitätstheorie und der Quantentheorie des elektromagnetischen Feldes zusammenpasste. Die Notwendigkeit, die atomare oder korpuskulare Natur von Licht und Materie mit deren Wellennatur zu versöhnen, steht an der Wurzel einiger der seltsamen Eigenschaften der Quantenmechanik, wie ihrer Deutung als einer Theorie der Wahrscheinlichkeiten von Ereignissen.

Es war *Heisenberg*, der in seiner ersten Arbeit von 1925 erkannt hat, dass die intuitiven Vorstellungen der klassischen Mechanik und insbesondere ihr vom Beobachter unabhängiger **objektiver** Zustandsbegriff in der Mechanik des Atombaus versagen. Das Konzept des "objektiven (vom Beobachtungsakt unabhängigen) Zustandes" eines

²³ In zweidimensionalen Systemen – 'Filmen' und Grenzschichten – gibt es nebst Bosonen und Fermionen tatsächlich noch unendlich viele weitere Typen von "Atomen" (solche mit "fraktionärer Statistik")

“physikalischen Systems” – oder, wenn man so will, des “Dings an sich” – wird in der Quantenmechanik zur Chimäre. Man kann nicht abstrakt vom objektiven Zustande eines physikalischen Systems sprechen, sondern nur davon, in welchen möglichen Zuständen sich ein System manifestieren wird, wenn es gewissen experimentellen Eingriffen unterzogen wird, aus denen *Ereignisse* resultieren. Dabei ist unter einem Ereignis ein Vorgang zu verstehen, aus dem ein Beobachter wenigstens im Prinzip Information über das beobachtete System gewinnen kann. Als orthodoxer Quantenmechaniker denkt man, dass sich für das Eintreten eines bestimmten Ereignisses (oder einer Folge von Ereignissen) nur eine Wahrscheinlichkeit angeben lässt; mit Sicherheit können die meisten Ereignisse nicht vorhergesagt werden. Die Theorie gestattet lediglich, solche Wahrscheinlichkeiten zu berechnen, und sagt offenbar **nichts** darüber aus, auf welche Weise und wieso ein bestimmtes Ereignis eintritt.

Das ist ein sehr merkwürdiger und verwirrender Sachverhalt. Grosse Physiker wie Einstein und Schrödinger hielten ihn zeit ihres Lebens für ein Indiz dafür, dass die gegenwärtige Formulierung der Quantenmechanik nur vorläufig sei.²⁴ (Er ist auch philosophisch problematisch. Man hat sich zu fragen, was überhaupt unter einer Theorie von *Wahrscheinlichkeiten* von Ereignissen zu verstehen ist, worüber sich schon *Jakob Bernoulli* wichtige Gedanken gemacht hat. Man kann vermuten, dass zwar die Quantenphänomene keiner radikal neuen theoretischen Beschreibung jenseits der quantenmechanischen bedürfen, dass aber die konventionelle *Interpretation* der Quantenmechanik zu überdenken ist.) Ich versuche den oben angedeuteten Sachverhalt noch ein wenig genauer zu illustrieren, indem ich über das Verhalten von **Korrelationen** zwischen verschiedenen, räumlich weit getrennten Ereignissen, für die sich die Physik besonders interessiert, spreche: Denken Sie sich zwei Astronauten, von denen einer rote Socken trägt, der andere aber grüne. Einer von beiden tritt nun eine Reise zum Mond an, der andere bleibt auf Erden. Ich weiss nicht, ob derjenige, der die roten, oder derjenige, der die grünen Socken trägt, zum Mond gereist ist. Wenn ich aber feststelle, dass der Astronaut, der hier geblieben ist, die roten Socken trägt, dann weiss ich sogleich, dass derjenige, der nun auf dem Mond herumspaziert, die grünen trägt, und dies liesse sich dadurch direkt überprüfen, dass derjenige auf dem Mond eine Fotografie seiner Socken schickt. An diesem Sachverhalt ist nichts Ungewöhnliches. Wenn wir nun aber die Astronauten durch zwei Photonen mit derselben Energie ersetzen, von denen eines zum Mond gesandt wird, das andere aber in einem mit perfekten Spiegeln ausgekleideten Hohlraum gefangen bleibt, so ergibt sich eine sehr verwirrende Situation. Photonen sind Korkenziehern zu vergleichen, die entweder linksdrehend oder rechtsdrehend sind. Sie können aber, wie man auf Grund der Wellentheorie des Lichtes erwarten würde, in einem Zustand der kohärenten Überlagerung eines rechtsdrehenden und eines linksdrehenden Korkenziehers, nämlich “linear polarisiert” sein. Man kann nun die beiden Photonen, von denen oben die Rede ist, so erzeugen, dass wenn das eine linksdrehend ist, das andere notwendig rechtsdrehend sein **muss**. Da Photonen aber ununterscheidbare Teilchen sind, ist prinzipiell nicht anzugeben, welches der beiden linksdrehend und welches rechtsdrehend ist. Misst man nun die zirkuläre Polarisation des im Hohlraum gefangenen Photons und stellt beispielsweise fest, dass es linksdrehend ist, so weiss man sogleich, dass dasjenige, das sich auf seiner Reise zum Mond befindet, rechtsdrehend sein muss.

²⁴ Viel Wichtiges zu diesem Thema kann man im Büchlein “speakable and unspeakable in quantum mechanics”, von *J. S. Bell*, erschienen bei Cambridge University Press, 1993, finden

Mit Hilfe einer von *Brewster* entdeckten Anordnung könnte man aber stattdessen auch die **lineare** Polarisierung des Photons im Hohlraum messen und etwa feststellen, dass es einer Schwingung des elektrischen Feldes entspricht, die senkrecht auf der Erdoberfläche steht. Fragt man dann, ob das Photon, das sich auf der Reise zum Mond befindet, links- oder rechtsdrehend ist, so kann man lediglich sagen, die Wahrscheinlichkeit für den einen oder den anderen Befund sei je $\frac{1}{2}$, denn dieses Photon sei nun in einem Zustande der kohärenten Überlagerung einer Links- und einer Rechtsschraube.

Viele Physiker haben sich die Frage gestellt, ob man die Befunde der Quantenmechanik allenfalls auch durch eine klassische, aber statistische Theorie beschreiben könnte, die davon ausgeht, dass man objektiv vom Zustand eines physikalischen Systems sprechen kann, auch wenn man diesen i.a. nicht explizit kennt. Gestattet man sich, statt nur Experimente mit zwei Photonen, solche mit z. B. **drei** Elektronen ins Auge zu fassen, dann kann man Polarisierungsexperimente beschreiben, für die jede klassische, objektive Theorie den Messwert 1 voraussagt, wogegen die Quantenmechanik den Messwert -1 voraussagt²⁵. Das ist ein recht verblüffendes Ergebnis.

In jüngerer Zeit hat man herausgefunden, 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 übermitteln, ohne dass ein Gegner sie dekodieren kann, oder um für klassische Computer unlösbar schwierige, z.B. zahlentheoretische Probleme auf sog. Quantencomputern in erträglicher Zeit zu lösen. Ich füge allerdings sogleich an, dass die technologischen Probleme, die sich der Konstruktion eines funktionstüchtigen Quantencomputers entgegenstellen, bis anhin noch nicht gelöst sind.

Die Implikationen der Quantenmechanik und des damit verknüpften Atomismus der Materie waren und sind **spektakulär**. Die Quantenmechanik hat z.B. Erklärungen der **Stabilität** und vieler spezifischer – z.B. der magnetischen – Eigenschaften der kondensierten Materie zutage gefördert²⁶. Sie hat eine Erklärung des periodischen Systems der Elemente geliefert und lässt uns verstehen, wieso sich die chemischen Elemente in chemischen Reaktionen stets gleich verhalten. In Verbindung mit der Speziellen Relativitätstheorie hat sie zur Voraussage der **Antimaterie** geführt, die dann experimentell glänzend bestätigt wurde, und lässt uns verstehen, wieso es keine stabilen Sterne gibt, die viel grösser als die Sonne sind. Unter den technologischen Anwendungen der neuen Physik sind nicht nur die Kernenergie und die Kernwaffen zu nennen, sondern auch die Halbleitertechnologie, die hinter jedem “Handy”, jedem Flachbildschirm, jedem Computer und jeder Solarzelle steckt, die Laser, die heute in jedem CD Player und von vielen Zahnärzten benützt werden, die Kernspinresonanz, die man z.B. in der medizinischen Bildgebung verwendet. Eine Aufzählung aller wichtigen technologischen Anwendungen der Quantenmechanik würde ins Unermessliche führen. Lassen wir es damit bewenden, und kommen wir noch kurz auf die zwei weiteren Revolutionen in der Physik des zwanzigsten Jahrhunderts zu sprechen, nämlich auf die **spezielle** und die **allgemeine Relativitätstheorie Einsteins**.

²⁵ Siehe z.B. *Norbert Straumann*, “Quantenmechanik”, erschienen im Springer-Verlag, 2002, und dort angegebene Literatur

²⁶ Sie alle beruhen wesentlich auf der Tatsache, dass die Elektronen das Ausschlussprinzip von *Pauli* erfüllen, d.h. dass sie *Fermionen* sind, und, damit verbunden, dass sie einen halbzahligen inneren Drehimpuls ($1/2$, in Einheiten der Planckschen Konstante) haben

Die spezielle Relativitätstheorie ist das Resultat von Entdeckungen, an denen Forscher wie *Lorentz* und *Poincaré* einen wichtigen Anteil haben. Sie vollständig und mit grosser Klarheit formuliert zu haben ist jedoch das Verdienst *Einsteins*. Sie revolutionierte unsere Vorstellungen von Raum und Zeit. Einstein hat ausserdem erkannt, dass sie einen zwingt, die Gesetze der Mechanik so zu modifizieren, dass sie dieselben Symmetrien haben wie diejenigen der Elektrodynamik. Daraus hat er die vielleicht berühmteste Formel der Physik

$$E = m c^2$$

hergeleitet. Er hat als ein *Grundpostulat* der Theorie erkannt, dass jeder kräftefreie Beobachter, unabhängig von seinem Bewegungszustand, für die Lichtgeschwindigkeit stets denselben Wert,

$$c = 300'000 \text{ km/sec}$$

findet, unabhängig davon, ob die Lichtquelle ruht oder bewegt ist. Sieht ein kräftefreier Beobachter einen sphärisch symmetrischen Himmelskörper, etwa einen grossen Stern am Nachthimmel als Kreisscheibe, so wird ihn jeder andere kräftefreie Beobachter auch als Kreisscheibe sehen, unabhängig von seiner Geschwindigkeit, was eigentlich sehr überraschend ist, wenn man darüber nachzudenken beginnt. Die Implikationen der speziellen Relativitätstheorie erscheinen uns auch heute noch höchst verwirrend. Sie führt auf scheinbare Paradoxien. Sie besagt beispielsweise, dass es **keinen** allen relativ zueinander beliebig bewegten Beobachtern gemeinsamen Fluss der Zeit gibt.²⁷ Beobachtet man z.B. instabile Teilchen in einem Labor, so stellt man fest, dass ihre Lebensdauer von ihrer Geschwindigkeit abhängt. Was ein Beobachter für gleichzeitige Ereignisse hält, hängt von seinem Bewegungszustand ab. Stellen wir uns zwei eineiige Zwillinge vor, die man gar nicht unterscheiden kann – so ähnlich sind sie einander. Der eine, Schwarz genannt, trete nun eine lange Reise durch den Weltraum an, die er mit grosser Geschwindigkeit durchläuft; der andere, er heisse Weiss, aber bleibe auf der Erde zurück. Nach geraumer Zeit kehrt Schwarz von seiner Reise auf die Erde zurück. Nach seiner Zeitrechnung war er z.B. vier Jahre unterwegs. Nun teilt ihm aber Weiss mit, er sei acht Jahre unterwegs gewesen, und tatsächlich hat Weiss schon ziemlich weisse Haare, wogegen Schwarz noch immer schwarzhaarig ist, obschon ja beide die gleichen Erbanlagen haben. Das hat den Vorteil, dass man sie nun inskünftig unterscheiden kann. Es ist immer so, dass derjenige, der eine Reise tut, etwas langsamer altert als derjenige, der auf der faulen Haut liegen bleibt. Vergleichen sie nun ihre Tagebücher, so stellen sie zwar vielleicht fest, dass sie ähnliche Ereignisse im Weltall beobachtet haben, dass sich die von ihnen gemessenen zeitlichen Abstände zwischen diesen Ereignissen oder gar ihre Reihenfolge aber von einander unterscheiden. Ausserdem mag der eine irgendwo im Weltall Effekte eines magnetischen Feldes beobachtet haben. Der andere aber wird sagen, er habe an der gleichen Stelle eine Mischung von einem Magnetfeld und einem

²⁷ Es mag mir erlaubt sein, hier an das wunderschöne Gedicht von Gottfried Keller, "Die Zeit geht nicht" zu erinnern:

"Die Zeit geht nicht, sie stehet still,/wir ziehen durch sie hin;/ sie ist ein Karawanserei,/wir sind die Pilger drin.//Ein Etwas, form- und farbenlos,/das nur Gestalt gewinnt,/wo ihr drin auf und niedertaucht,/bis wieder ihr zerrinnt.//...//Es ist ein weisses Pergament/die Zeit, und jeder schreibt/mit seinem roten Blut darauf,/bis ihn der Strom vertreibt.//..."

elektrischen Feld beobachtet. Was wir als elektrisches und was als magnetisches Feld wahrnehmen, hängt nämlich von unserem Bewegungszustand ab!

Alle Hypothesen, auf denen die spezielle Relativitätstheorie ruht, und alle ihre Implikationen scheinen der Existenz des Aethers als eines die elektromagnetischen Wellen tragenden, elastischen Mediums zu widersprechen oder diesen zumindest zu einer überflüssigen Fiktion zu machen. Einstein hat deswegen die Aetherhypothese endgültig aus der Physik verbannt und damit dem Trend, dass die Physik die Erscheinungen nicht auf die Eigenschaften fundamentaler "Substanzen" zurückzuführen versucht, zum Durchbruch verholfen.

Die dritte Revolution in der Physik des zwanzigsten Jahrhunderts war die **allgemeine Relativitätstheorie**, die im Gegensatz zur speziellen im wesentlichen das alleinige Verdienst *Einsteins* ist. Er hat sie nach ca. achtjährigem Ringen im Dezember 1915 definitiv formuliert. Sie verallgemeinert die Raum-Zeit Geometrie der speziellen Relativitätstheorie zu einer allgemeineren metrischen Geometrie der Raum-Zeit, deren spezifische Eigenschaften von der Konfiguration der in ihr gelagerten, ponderablen Materie und Energie abhängen, wie es schon *Riemann* vorschwebte, der ja eine Geometrie, die wesentliche Züge der zur Formulierung der allgemeinen Relativitätstheorie nötigen trägt, als einen Gegenstand der Mathematik schon im neunzehnten Jahrhundert geschaffen hatte. Die Krümmung der Raum-Zeit – zu vergleichen mit der Krümmung der Oberfläche eines Fussballs, oder eines Autoreifens, oder einer Brezel²⁸ – hängt in der allgemeinen Relativitätstheorie von der raum-zeitlichen Verteilung der Materie ab. In infinitesimal kleinen Gebieten der Raum-Zeit geht die Geometrie der allgemeinen Relativitätstheorie in diejenige der speziellen Relativitätstheorie über – wie ja auch die Geometrie einer gekrümmten Fläche in kleinen Bereichen mehr und mehr derjenigen der Euklidischen Ebene gleicht. Die Gravitationskraft, die auf einen Körper einwirkt, stellt sich als eine Folge der Raum-Zeit Krümmung heraus. Der Zusammenhang zwischen der Raum-Zeit Krümmung und der Verteilung der Materie und die Bewegungsgesetze im Gravitationsfeld werden in den *Einsteinschen Feldgleichungen* ausgedrückt. Diese Gleichungen erfüllen die Forderung einer Nahwirkungstheorie. Die allgemeine Relativitätstheorie kann als krönender Abschluss der klassischen "vorquantenmechanischen" Physik gesehen werden. Wie sie mit der Quantenmechanik zu vereinigen ist, wissen wir trotz heldenhafter Anstrengungen vieler Theoretiker noch immer nicht.

Einsteins Feldgleichungen der Gravitation haben viele äusserst interessante und merkwürdige Lösungen, unter denen vielleicht die Schwarzen Löcher, deren Gravitationsfeld derart stark ist, dass nicht einmal das Licht aus ihnen zu entweichen vermag²⁹, die unter Laien und Science-Fiction Autoren bekanntesten sind. Dank dieser Gleichungen wurde die **Kosmologie** erstmals zu einer Naturwissenschaft. Im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie macht es, wissenschaftlich betrachtet, Sinn, über die Geschichte und Struktur des Universums nachzudenken; und das hat Einstein selbst auch schon getan. Die Theorie gibt uns eine reiche Auswahl an möglichen Universen. Darunter gibt es sehr exotische. Ein Beispiel eines exotischen Universums wurde vom berühmten

²⁸ Gekrümmte Flächen wurden mathematisch zuerst von *Gauss*, dem "Fürsten der Mathematiker", untersucht

²⁹ Die Idee des Schwarzen Lochs geht ursprünglich auf Mitchell (1784) und *Laplace* (1796) zurück

Logiker *Kurt Gödel* gefunden. Es hat die Eigenschaft, dass es darin Reisen durch die Raum-Zeit gibt, auf denen man durch die Zukunft in die Vergangenheit gelangen kann. Eine Untersuchung des berühmten Theoretikers *Edward Witten* führt auf noch schockierendere Folgerungen: Für gewisse Modelle der Materie gibt es Lösungen, für die sich die Raum-Zeit in “**Nichts**” auflöst. “Ein Loch bildet sich spontan im Raum und expandiert ins Unendliche...”³⁰ Man erwartet allerdings nicht, dass solche Lösungen viel mit dem Universum zu tun haben, in dem wir leben. Es ist eine höchst spannende Entwicklung der neueren Vergangenheit, dass es dank raffiniertester astronomischer Experimente, u.a. auch solchen, die auf künstlichen Erdtrabanten montiert sind, möglich geworden ist, Objekte wie Schwarze Löcher dank der von ihnen ausgehenden Gravitationskraft im Weltall aufzufinden und auszumessen und die Raum-Zeit Geometrie des für uns sichtbaren Teils des Universums wenigstens in grossen Bereichen zu bestimmen.³¹ Die plausibelste Interpretation der experimentellen Befunde zur grossräumigen Geometrie des Universums führt auf eine Folgerung, deren theoretische Möglichkeit schon seit geraumer Zeit bekannt war: Aus der uns **maximal** zugänglichen Kenntnis der Vergangenheit unseres Universums ist es auch im Rahmen einer klassischen Theorie **prinzipiell unmöglich**, seine Zukunft mit Sicherheit vorauszusagen. Allgemein zu reden macht es die allgemeine Relativitätstheorie einem räumlich endlich ausgedehnten Beobachter endlichen Alters – auch einem Laplaceschen Dämon – prinzipiell (und nicht nur praktisch) unmöglich, eine hinreichend vollständige Kenntnis der Vergangenheit zu erlangen, um daraus durch Lösen deterministischer Gleichungen die Zukunft vorherzusagen. Diese Einsicht steht im Gegensatz zu den Erwartungen des ausgehenden neunzehnten Jahrhunderts, hat aber **nichts** mit der Quantennatur der Materie zu tun, sondern eben damit, wie die Relativitätstheorie über die Raum-Zeit spricht, und insbesondere mit dem Umstand, dass sie eine Nahwirkungstheorie ist. Man kann sich vorstellen, dass sie die Fantasie der Philosophen anregt, aber davon möchte ich nicht reden.

Wenn man die Geschichte der Physik gerne als eine Abfolge von Revolutionen verstehen will, so würde man behaupten, dass es auch nach der Entdeckung des Atomismus, der Quantenmechanik und der Relativitätstheorien noch Revolutionen in der Physik gab, die grössten wohl im Bereich neuer experimenteller Methoden und von technologischen Anwendungen der neuen Physik, grössere und kleinere aber **auch** im Bereich der Theorie. Man denke etwa an die Eichtheorien der Teilchenphysik, die Entdeckung oder theoretische Erklärung unzähliger, höchst erstaunlicher emergenter Phänomene in der Physik der kondensierten Materie – wie der Supraleitung oder des quantisierten Hall Effekts – die Theorie der kontinuierliche Phasenumwandlungen begleitenden kritischen Phänomene, etc. Man kann diese Revolutionen, insofern sie die Theorie betreffen, aber weitgehend als Versuche auffassen, einige oder alle der vier Bereiche, Atomismus und Quantenmechanik, spezielle und allgemeine Relativitätstheorie, in eine einheitliche mathematische Beschreibung von Teilausschnitten der Natur zusammenzufassen. Versucht man Atomismus und Quantenmechanik zu einer statistischen Beschreibung makroskopisch grosser Systeme auszugestalten, so gelangt man zur Quantenstatistischen Mechanik, einer höchst erstaunlichen Theorie, die für alle Bereiche der Physik der

³⁰ *Edward Witten*, Nuclear Physics **B 195** (1982), Seite 481

³¹ Siehe z.B. *Norbert Straumann*, “Materie-Antimaterie und Dunkle Energie”, Preprint 2006

kondensierten Materie fundamental wichtig ist und auch in der reinen Mathematik äusserst interessante Entwicklungen angeregt hat. Aus dem Bedürfnis, die Quantenmechanik in den Rahmen der speziellen Relativitätstheorie einzufügen, die Gravitationskräfte aber zunächst zu vernachlässigen, entstand die **relativistische Quantenfeldtheorie**. Sie hat auf die spektakuläre Voraussage der Existenz von Antimaterie geführt, die darauf experimentell glänzend bestätigt wurde, und hat in Form der Quantenelektrodynamik auf die präziseste physikalische Theorie geführt, die je entdeckt wurde. Die für die Teilchenphysik relevanten Modelle relativistischer Quantenfeldtheorie sind Eichtheorien, und diese haben unsere Begriffe von Symmetrie revolutioniert. Die Zeit der Entdeckung des “Standard Modells” der Teilchenphysik und der Theorie der kritischen Phänomene in der statistischen Mechanik, etwa von der Mitte der sechziger Jahre bis zum Ende der siebziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts, gilt zurecht als ein **goldenes Zeitalter** der Physik.

Das **zentrale Problem** aber, nämlich eine Theorie zu schaffen, die den Atomismus, die Quantenmechanik und die allgemeine Relativitätstheorie so in sich vereinigt, dass alle vier von Plancks fundamentalen Naturkonstanten, k , h , c , und G_{Newton} , ihre natürlichen endlichen Werte haben, ist nach wie vor **offen**, auch wenn es viele interessante Lösungsansätze gibt.³² Dass die Lösung dieses Problems äusserst schwierig sein muss, kann man auf Grund des schon Gesagten leicht verstehen: Die ganze bekannte Physik beruht darauf, natürliche Erscheinungen als in Raum und Zeit angeordnete Sequenzen von Ereignissen zu beschreiben. Raum und Zeit kommen dabei eine *objektive* Bedeutung zu. In der klassischen Physik lassen sich die Ereignisse in einem System im Prinzip – wenn auch i.a. nicht in der Praxis – aus seinem (allerdings prinzipiell i.a. nur unvollständig bestimmbar) Anfangszustand bestimmen, der eine vom Beobachter *unabhängige, objektive Bedeutung* hat. In der Quantenmechanik ist das Konzept eines Ereignisses problematisch; jedenfalls kann die Theorie offenbar nur die Bedingungen angeben, unter denen bestimmte Ereignisse auftreten **können**, und für ihr tatsächliches Auftreten Wahrscheinlichkeiten voraussagen. Dem Begriff des Zustandes eines quantenmechanischen Systems käme demnach keine objektive Bedeutung zu. Es liegt in der Natur einer Wahrscheinlichkeitstheorie, dass sie sich nur dadurch testen lässt, dass die nämlichen für das Eintreten einer bestimmten Folge von Ereignissen notwendigen Bedingungen wiederholt geschaffen werden und in einer Reihe identischer Experimente festgestellt wird, wie häufig jene Folge eintritt. Nun sagt aber die allgemeine Relativitätstheorie, die Geometrie der Raum-Zeit hänge wesentlich von der Anordnung materieller Ereignisse ab, die man beobachtet, und umgekehrt. Da diese quantenmechanisch aber gar nicht mit Sicherheit vorauszuberechnen ist, sondern für eine bestimmte Anordnung von Ereignissen lediglich eine gewisse Wahrscheinlichkeit angegeben werden kann, so müsste man schliessen, dass auch über die Geometrie der Raum-Zeit, der wir gerne eine objektive Bedeutung zuschreiben würden, nur Wahrscheinlichkeitsaussagen gemacht werden können. Das ist aber höchst verwirrend; denn wie sollen sich Wahrscheinlichkeitsaussagen über Raum und Zeit überhaupt testen lassen, wenn sich die Geschichte des Universums nicht beliebig oft wiederholen lässt.

³² In “Dreams of a Final Theory”, erschienen bei Vintage, 1993, sagt *Steven Weinberg* nach einer Hymne auf die gewaltigen Fortschritte der Physik im zwanzigsten Jahrhundert: “But now we are stuck. The years since the mid-1970s have been the most frustrating in the history of elementary particle physics. We are paying the price of our own success...”

Die Geometrie der allgemeinen Relativitätstheorie beruht auf der Annahme, dass in infinitesimal kleinen Raum-Zeit Gebieten die spezielle Relativitätstheorie gültig sei. Verbindet man die allgemeine Relativitätstheorie und die Quantentheorie heuristisch, dann kommt man relativ leicht zum Schluss, dass sich Ereignisse prinzipiell nicht in beliebig kleinen Raum-Zeit Gebieten lokalisieren lassen. Das bedeutet aber, dass man operationell gar nicht nachprüfen kann, ob die Geometrie der Raum-Zeit in sehr kleinen Raum-Zeit Gebieten derjenigen der speziellen Relativitätstheorie entspricht. (Sie wird dies vermutlich **nicht** tun.) Diese Situation erinnert an eine, die in den Anfängen der Quantentheorie der Atome vorlag: Man konnte zwar von den klassischen Bahnen der Elektronen in der Umgebung eines Atomkerns sprechen, und sie gingen in die theoretischen Rechnungen von Bohr und Sommerfeld ein; aber es war prinzipiell nicht möglich, diese Bahnen messend zu verfolgen. Diese paradoxe Situation wurde erst durch die Entdeckung der “definitiven” Form der Quantenmechanik überwunden, und in dieser war kein Platz mehr für das klassische Konzept einer Elektronenbahn.

Man muss davon ausgehen, dass Raum und Zeit, im klassischen Sinn, **keine** fundamentalen Kategorien unserer geistigen Repräsentation der Natur sind – wie *Immanuel Kant* es sich dachte – sondern dass sie in makroskopischen Bereichen, in Gegenwart sehr vieler praktisch identischer Ereignisse relativ langer Dauer, aus einer fundamentalen mikroskopischen Beschreibung als unserem Erleben der Natur angemessene Struktur emergieren. Bis anhin sind uns nur “halbklassische” Näherungen einer solch fundamentalen Beschreibung bekannt. Man bezeichnet sie mit den Worten “*Stringtheorie*” oder “*Schleifengravitation*” – je nach der Sekte, zu der man gehört. Diese stellen aber noch gar keine *Theorie* im eigentlichen Sinne dieses Wortes dar; ähnlich wie das Bohrsche Modell des Wasserstoffatoms noch keine Theorie war, sondern nur eine Näherung für eine zunächst noch unbekannte Theorie. Wir wissen aber nicht, was für eine Theorie sich hinter der Stringtheorie oder der Schleifengravitation verbirgt. Man kann wahrscheinlich erwarten, dass eine solche Theorie unsere Vorstellungen von Raum und Zeit und die konventionelle “Kopenhagener” Interpretation der Quantenmechanik als einer Theorie nicht von Ereignissen, sondern nur von Wahrscheinlichkeiten von Ereignissen fundamental erweitern wird. Um sich ihr anzunähern zu versuchen, läge es nahe, die konventionelle Interpretation der Quantenmechanik einer kritischen Analyse zu unterziehen. In diesem Geschäft bestünde Aussicht auf Erfolg; denn die Quantenmechanik ist einfach genug, und wir kennen sie hinreichend gut, dass Fortschritte erwartet werden können. Leider beschäftigen sich nur Leute (wie ich) mit diesem Problem, die schon zu alt sind, um hart nachzudenken und schwierige Rechnungen auszuführen. Deshalb sind die Fortschritte langsam.

Meine kurze Exkursion in die Bereiche der modernen Physik will ich hier mit der freudigen Feststellung abschliessen, die Physik sei keineswegs einem endgültigen Abschluss nahe, und ihr Bild von der Welt habe noch viele weisse Flecken. Das soll den jungen Menschen, die gerne Physik studieren möchten, Hoffnung geben, sie hätten die Chance, fundamentale Entdeckungen zu machen.

4. Noch ein wenig Nachdenken über Physik: Versuch einer Zusammenfassung

Die theoretische Physik liefert in einem ähnlichen Sinne nur ein symbolisches Abbild oder einen Plan eines Ausschnitts der Wirklichkeit wie ein Fahrplan, der angibt, wo ein

Zug wann und für wie lange anhält, nur eine symbolische Repräsentation einer Bahnreise ist, oder wie der Plan eines Architekten für ein Wohnhaus nur eine symbolische Repräsentation des Hauses ist. Die Physik "erklärt" unser Erleben des Seins in der Gegenwart, das "Jetzt", genauso wenig, wie der Fahrplan das Erleben des Eintreffens in einem bestimmten Bahnhof während einer Bahnreise erklärt, die tatsächlich stattfindet. Offensichtlich besteht ein Unterschied zwischen dem Plan eines Hauses und dem Haus selbst, wenn es denn einmal gebaut ist. Wir sind uns des fundamentalen Unterschiedes zwischen materieller Existenz von Dingen und einer nur geistig-symbolischen Repräsentation derselben gewiss. Nehmen wir die konventionelle Interpretation der Quantenmechanik ernst – ob sie nun strikte oder nur näherungsweise korrekt ist bleibe dahingestellt – so ist die Physik sogar ein sehr merkwürdiger Fahrplan; nämlich einer der gar nicht sagt, **welche** von mehreren möglichen Strecken vom Ausgangspunkt zum Bestimmungsort ein Zug fährt. Ob er überhaupt eine bestimmte unter allerlei möglichen Strecken fahre hänge nämlich davon ab, ob an dieser Strecke ein Bahnhofvorstand auf einem Perron eines bestimmten Bahnhofs stehe und nachsehe, ob der Zug vorbeifahre, um dann seine Kelle zu heben. Für das Ereignis, dass der Zug auch wirklich vorbeifährt, wenn der Vorstand auf dem Perron steht, bereit seine Kelle zu heben, gibt der Fahrplan der Quantenmechanik nur eine *Wahrscheinlichkeit* an. Will man diese Angabe überprüfen, so muss man die Reise sehr oft wiederholen, bis sich die "moralische Gewissheit" (*Jakob Bernoulli*) einstellt, die Voraussage des Fahrplans sei richtig. Ohne von der "moralischen Gewissheit" auszugehen, der Zug fahre bei hinreichend häufiger Wiederholung der Fahrt eine bestimmte Strecke, an der ein Bahnhofvorstand steht und nachsieht, ob der Zug vorbeifährt, so häufig wie es ihrer im Fahrplan angegebenen Wahrscheinlichkeit entspricht, wäre der Fahrplan gänzlich unnützlich. Wäre eine Bahnreise quantenmechanischer Natur, dann könnte aber ein Reisender prinzipiell nicht sagen, welche von verschiedenen möglichen Strecken der Zug gefahren sei, wenn **keine** Bahnhofvorstände an den Strecken stehen, die nachsehen, ob der Zug vorbeifährt. Es ist als ob die Bahnwagons keine Fenster hätten!

Im Fahrplan der Welt, wie ihn die Physik darstellt, gibt es ausserdem eine durch die Relativitätstheorie beigefügte Fussnote, man wisse prinzipiell nicht sicher, ob der Zug im Bestimmungsort ankomme, der im Fahrplan vorgesehen sei, da ja die Strecken dorthin unterbrochen werden könnten, was a priori nie auszuschliessen sei.

Die moderne Physik spricht nicht über die "*Dinge an sich*", sondern nur darüber wie sie einem über einen Ausschnitt der Natur Information sammelnden Beobachter *erscheinen*. Man ist zu denken geneigt, dass sie offenbar nur eine sehr lückenhafte Repräsentation der Welt darstelle und das physikalische Weltbild ein nur sehr verschwommenes Abbild der Welt sei. Aber dieses Bild ist präzise genug, dass es zu Einsichten geführt hat, die die Welt, in der wir leben, verändert haben.

Wir haben gesehen, dass die klassische Physik des ausgehenden neunzehnten Jahrhunderts das physikalische Weltbild von religiösen und seelischen Projektionen, wie sie *Bruno*, *Galilei* und *Newton* noch selbstverständlich waren, befreit hat. Es gibt Leute, die denken, die Quantenmechanik habe in der Physik wieder Platz für das Seelisch-Geistige geschaffen und die Bereiche des Physikalischen und des Psychischen zusammengeführt. Ich teile diese Auffassung höchstens insofern, als wir nun verstehen, dass die Physik stets nur eine sehr unvollständige symbolisch-*geistige*, genauer eine mathematische Repräsentation der Welt, sozusagen einen Fahrplan der Welt gibt, der das,

was einem Beobachter auf seiner Reise durch die Welt widerfahren kann, bestenfalls mehr oder weniger genau beschreibt und deutet, das Geschehen aber nie erklärt; dass die Physik davon zu sprechen hat, wie Information über die Welt beschafft wird – denn einen vom Beobachtungsakt unabhängigen, objektiven Zustand der Welt gibt es offenbar gar nicht – und damit gewissermassen das experimentierende Subjekt in die Welt der physikalischen Objekte intergriert. Ein Freund der konventionellen “Kopenhagener” Interpretation der Quantenmechanik bin ich jedoch nicht. Ich halte sie für eine Heuristik, wenn auch eine sehr erfolgreiche. Ich erwarte, dass die Theorie tief genug ist, dass sie eines Tages ihre Interpretation selbst hervorbringen wird.

Die moderne Physik vermeidet ontologische Fragen und hat Diskussionen über die Existenz fundamentaler Substanzen wie des Aethers aus ihrem Reich verbannt. In anderen Bereichen führt sie dagegen lebhaftere Diskussionen und Debatten, z.B. über “Reduktionismus” versus “Emergenz”. Darauf einzugehen würde uns aber zu weit vom Hauptthema wegführen.

Ludwig Wittgenstein beklagte, dass “an der Basis der ganzen modernen Sicht der Welt die *Illusion*” liege, “dass die sogenannten Naturgesetze die Erklärungen der natürlichen Erscheinungen” seien. Offenbar hat er die moderne Physik nicht gekannt! Sie erklärt nichts, schon gar nicht unser Erleben der Existenz und des Jetzts, sondern bescheidet sich auf den Versuch einer möglichst akkuraten, einheitlichen, einfachen und vollständigen, aber stets lückenhaften symbolisch-mathematischen Repräsentation der Welt. Sie geht davon aus – und wir nehmen an, dies sei keine Illusion – dass unser Erleben der Welt gewissen Gesetzmässigkeiten folgt, die eine mathematische Repräsentation der Welt ermöglichen. *Steven Weinberg*, einer der Väter des “Standard Modells” der Teilchenphysik, entgegnet auf die Klage Wittgensteins: “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*.”³³ Nun ja, diese Zitate zeigen, dass die Philosophen i.a. nicht viel von Physik verstehen und die Physiker nicht viel von Philosophie. Und weil ich selbst ja Physiker bin, wird es Zeit, diese Darlegungen mit der “endgültigen” Erklärung von *Richard Feynman* dafür, wieso es Naturwissenschaft gibt, zu beendigen: “Science is a way of trying not to fool yourself.”

“Soweit er (*Dick Feynman*) ihn verstand, murmelte der Professor (für Philosophie) etwas ähnliches wie: “Mumm bumm wugga mumm bumm...” *Dick* hatte keine Ahnung, worum es in dem Aufsatz ging. Der Professor las einen anderen Aufsatz vor: “Mugga wugga mumm bumm wugga...” *Dick* verstand wieder kein Wort”³⁴

Ich danke den Leserinnen und Lesern für ihre Aufmerksamkeit meinem “Mumm bumm wugga wugga...” gegenüber und meinen Kollegen *Björn Graneli*, *Klaus Hepp*, *Ulrich Müller-Herold*, und *Norbert Straumann* für ein paar nützliche Hinweise.

³³ *Steven Weinberg*, loc. cit.

³⁴ In: “Richard Feynman”, von John und Mary Gribbin, erschienen bei Pieper, 2001. Da las der Professor tatsächlich einen Aufsatz vor, den der Student Richard Feynman für sein Seminar hatte schreiben müssen