

Zur Renaissance der klassischen Physik

Ingo Tesmann

Sommer 2001

Zusammenfassung

Auch hundert Jahre nach Entdeckung des Wirkungsquantums werden die Grundlagen der Quantentheorie immer noch intensiv diskutiert. In letzter Zeit mehren sich aber die Anzeichen für ein Verständnis der Quantentheorie aus klassischen Prinzipien. Beispiele dafür sind insbesondere die Ausarbeitungen der Bohmschen Mechanik zur statistischen Mechanik der Quantendynamik sowie eine Grundlegung der Quantentheorie durch stochastische Prozesse in der stochastischen Elektrodynamik. Zudem ist das Einsteinsche Forschungsprogramm zur Vervollständigung der Quantenmechanik durch Rückführung ihres Zufallscharakters auf eine unterliegende Ebene deterministischer Vorgänge wiederbelebt worden.

1 Einleitung

Hundert Jahre Quantentheorie geben Anlaß zur Rückbesinnung auf die Entstehungsbedingungen der Modernen Physik. Die unglaublichen technologischen Konsequenzen und mathematischen Einsichten des physikalischen Formalismus haben allerdings nicht das mangelnde Verständnis der Grundlagen zu beheben vermocht. Die unzureichende Interpretation des Formalismus hat zu einer positivistischen Verengung geführt, die *for all practical purposes (FAPP)* hinreichen mag, aber keine Lösungen der Seins- und Erkenntnisprobleme in Aussicht stellt. Das Fehlen einer rationalen naturphilosophischen Reflexion hat darüber hinaus zu weitreichenden quantenphilosophischen Spekulationen geführt, die bis in die Esoterik der Postmoderne hineinreichen. Ziel meiner Überlegungen wird es sein, die Moderne Physik als Übergangsstadium des 20. Jahrhunderts darzustellen und für eine Renaissance der klassischen Physik zu argumentieren.

2 Klassische Physik

Das Paradigma der klassischen Physik begann mit Galilei und wurde zum Vorbild für Wissenschaft schlechthin. Seit Galileis genialer Verbindung von mathematischer Argumentation und experimenteller Technik hat sich das Programm einer *näherungsweise-vereinheitlichenden* Behandlung der Naturbeobachtungen und Experimentierresultate im Zuge der Verwissenschaftlichung unserer Zivilisation zu einem Weltbild von faszinierender Reichhaltigkeit entwickelt. Die Extrapolationen des physikalischen **Standardmodells** erstrecken sich über 61 Größenordnungen und die Meßergebnisse sind mit einer Präzision von bis zu 14 Stellen mit den Folgerungen der Theorie vergleichbar. Die Quantentheorie lieferte neben der Relativitätstheorie nicht nur die Grundlage für das Standardmodell, sondern machte darüber hinaus auch Chemie und Biologie zu physikalischen Wissenschaften. Gegenwärtig dehnen die Physiker ihr Betätigungsfeld auf die Sozialforschung und die Wirtschaftswissenschaften aus. Das Programm einer sozialen Physik entstand bereits im Zuge der Aufklärung und wurde mit den verbessertern wissenschaftlichen Methoden verfeinert. So nimmt es nicht wunder, daß die Behandlung stochastischer Prozesse bereits 1900 durch den Mathematiker Bachelier in die Ökonomie eingeführt wurde, fünf Jahre vor Einsteins grundlegender Arbeit zur Brownschen Bewegung.

Im Rahmen des näherungsweise-vereinheitlichenden Paradigmas (NVP) der neuzeitlichen Naturphilosophie führte Newton in seiner Gravitationstheorie die Galileischen Wurfparabeln und die Keplerschen Ellipsenbahnen auf ein gemeinsames Kraftgesetz zurück. Damit vereinigte er die Bewegungen von Kanonenkugeln auf der Erde mit den Planetenbahnen am Himmel. Zielgerichtete Geschößbahnen im Schwerfeld der Erde wurden in gleicher Weise behandelt wie bewirkte Planetenbahnen im Gravitationsfeld der Sonne. Voltaire überhöhte die Newtonsche Mechanik zum **mechanistischen Weltbild**: *Entweder ergibt sich alles aus dem notwendigen Wesen der Dinge oder aus der ewigen Ordnung, die ein absoluter Geist gestiftet hat.* Wirk- und Zielursache wurden durch Euler und Lagrange im **Prinzip der kleinsten Wirkung** vereint:

$$\delta S = \delta \int L(q_i, \dot{q}_i, t) dt = 0.$$

Als Wirkung S wird das Produkt aus Energie und Zeit bezeichnet. Dem Integralprinzip der Wirkungsvariation δS entspricht das Differentialprinzip der Bewegungsgleichung:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0.$$

Die Lagrangefunktion L wird aus der Differenz von Bewegungs- und potentieller Energie bestimmt: $L = T - V$.

Neben der Bewegung von Gestirnen am Himmel und Geschossen auf der Erde, haben sich die Menschen von altersher auch für die Ausbreitung von Lichtstrahlen und Wasserwellen interessiert. In der Eulerschen Mechanik der Kontinua wurden nicht mehr diskrete Massenpunkte m_i betrachtet, sondern im Grenzübergang dm kontinuierliche Massendichten $\rho = dm/dv$ per Volumenelement dv berechnet. Die kontinuierliche Ausbreitung

periodischer Schwingungen in einem Medium wurde in linearer Näherung durch **Wellengleichungen** beschrieben:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = \Delta \rho(\vec{r}, t)$$

In der Wellengleichung steht Δ für den Laplace-Operator, \vec{r} bezeichnet den Ortsvektor und c bedeutet die Wellengeschwindigkeit. Akustik und Optik wurden zu Teilgebieten der Mechanik. Die Lösungen der Wellengleichung lieferten nicht nur ein Verständnis der Schallausbreitung in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern, sondern auch die Berechnung der faszinierenden Interferenzmuster bei der Überlagerung von Schall- oder Lichtwellen. Nach dem **Huygenschen Prinzip** konnte im Einklang mit der Wellengleichung jeder Punkt einer Wellenfront wieder zum Ausgangspunkt einer Elementarwelle ψ_i werden, jede Wellenfront also aus der Überlagerung aller Elementarwellen gebildet werden: $\psi(\vec{r}, t) = \sum \psi_i(\vec{r}, t)$. Mit der Wellenlänge λ , der Wellenzahl $k = 2\pi/\lambda$, der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi\nu$ sowie $c = \lambda\nu$, ließ sich als Lösung der Wellengleichung z.B. eine ebene Welle erhalten, die sich in z -Richtung ausbreitet:

$$\psi(z, t) = A e^{i(kz - \omega t)}$$

Den Atomismus der Punktmechanik und Strahlungsoptik sowie das Kontinuum der Fluidodynamik und Wellenoptik verband der Astronom Hamilton zu einer genialen Synthese, aus der die Newtonsche Mechanik als geometrisch-optischer Grenzfall einer Wellenbewegung hervorging. Den jeweils aus Elementarwellen gebildeten Wellenfronten konnte er eine geometrische Strahlungsrichtung zuordnen, indem er die Flächen konstanter Wirkung als Wellenfronten ansah, die im Konfigurationsraum fortschritten. Denn so wie sich die Lösungen der Wellengleichung $\psi(az \pm bt)$ nach Ort und Zeit aufspalten ließen, konnte auch die Wirkungsfunktion $S = \int L dt$ separiert werden:

$$S = \int (2T - H) dt = \int \vec{p} d\vec{r} - Ht = \vec{p}\vec{r} - Ht,$$

wenn es sich um eine gleichförmige Bewegung mit Impuls \vec{p} und Gesamtenergie H handelt. Der letzte Ausdruck für die Wirkung S erinnert an die Phase einer Welle: $\phi = \vec{k}\vec{r} - \omega t$. Im allgemeineren Fall folgt aus dem Wirkungsintegral:

$$S = \int \vec{p} d\vec{r} - Ht = W(\vec{r}) - Ht,$$

so daß $\vec{p} = \vec{\nabla} S = \vec{\nabla} W$ wird und W die charakteristische Funktion bezeichnet. Anschaulich stehen die Impuls-Feldlinien damit senkrecht auf den Flächen gleicher Wirkung; ganz so wie die Strahlen senkrecht auf den Wellenfronten stehen. Hamilton war nichts geringeres als die näherungsweise **Vereinheitlichung von Wellen- und Strahlungsoptik** gelungen. Der bis heute in der Physik und Naturphilosophie herumgeisternde Welle-Teilchen-Dualismus wurde bereits vor über 150 Jahren von Hamilton gelöst!

Neben den mechanischen Phänomenen der Bewegung von Massen nach dem Prinzip der kleinsten Wirkung, waren es vom Anbeginn der menschlichen Kultur auch die Erscheinungen der Reibungselektrizität (beim Bernstein) und des Magnetismus (von Eisenstein),

die die Menschen immer wieder neugierig machten. Ganz zu schweigen von dem gewaltigen Naturschauspiel eines Gewitters, in dem Elektrizität, Licht und Schall aufs innigste zusammenwirken. Goethe hatte es dem Physiker seinerzeit ins Stammbuch geschrieben: *Natur ist weder Kern noch Schale. Alles ist mit einem Male.*

Coulomb gelang es im Anschluß an Newton, ein dem Gravitationsgesetz ähnliches Kraftgesetz für die Anziehung und Abstoßung zwischen elektrischen Ladungen zu formulieren. Ampere führte den Magnetismus auf das Fließen elektrischer Ströme zurück. Und Faraday sah die Wirkungen der Ladungen aufeinander in der Existenz eines Feldes, dessen Wirkungslinien er durch die Ausrichtung von Eisenfeilspänen zwischen magnetischen Polen veranschaulichte. Maxwell endlich gelang es dann in einem visionären Entwurf, aus den Prinzipien der Ladungs- und Energieerhaltung, Elektrizität und Magnetismus in *einer* Theorie zu vereinigen. Krönung seiner Elektrodynamik war die Herleitung einer Wellengleichung, nach der Licht als elektromagnetische Welle verstanden werden konnte!

In Verbindung mit der Analyse der diskreten Absorptionslinien im kontinuierlichen Spektrum des Sonnenlichtes, fand Kirchhoff 1859 ein weitreichendes Gesetz zur Strahlungsleistung J eines schwarzen Körper. Aufgrund allgemeiner thermodynamischer Prinzipien konnte er nachweisen, daß die **Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers** allein von der Frequenz ν und der absoluten Temperatur T abhängt: $J = J(\nu, T)$. Kirchhoff erkannte die Tragweite seines Gesetzes und wies ausdrücklich darauf hin, daß es eine Aufgabe von großer Wichtigkeit sei, diese Funktion zu finden. Aufgrund der enormen experimentellen Schwierigkeiten, konnte das Strahlungsgesetz erst 41 Jahre später durch Planck formuliert werden. Der nächste bedeutende Schritt auf dem Weg zur Quantentheorie gelang Balmer 1885, indem er eine einfache Formel für die Frequenzfolge ν_n im **Emissionsspektrum des Wasserstoffs** fand:

$$\nu_n = \text{const.} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Die durch Becquerel 1896 entdeckte **Radioaktivität** gab den Physikern neue Rätsel auf. Wie sollte das um die Jahrhundertwende aufgestellte **Zerfallsgesetz** $dn = -n dW$ interpretiert werden? Das Wahrscheinlichkeitsmaß $dW = \lambda dt$ bestimmte durch die Zerfallskonstante λ im Zeitintervall dt den Zerfall der Teilchenzahl n im Intervall dn . Was war die Ursache für den spontanen Zerfall der radioaktiven Stoffe?

Die experimentellen Befunde der Schwarzkörperstrahlung, der Atomspektren und der Radioaktivität harrten einer theoretischen Erklärung. Planck und Einstein suchten nach Problemlösungen in der statistischen Mechanik und in der Elektrodynamik. Boltzmann hatte bereits 1877 mit seiner **Entropieformel** einen Zusammenhang zwischen Makro- und Mikrophysik hergestellt: $S = k \ln W$. Die Entropie S eines makroskopischen Systems wird danach aus der thermodynamischen Wahrscheinlichkeit W und der heute sogenannten Boltzmannkonstanten k berechnet. W wird dabei durch eine diskrete Abzählmethode zur Verteilung der Energien auf die Teilchen bestimmt. Am wahrscheinlichsten ist ein Zustand mit den meisten Realisierungsmöglichkeiten. Um die gemessene Verteilung

der Strahlungsdichte im Hohlraum $u(\nu, T)$ zu verstehen, verteilte Planck um die vorletzte Jahrhundertwende P *ununterscheidbare* Energiequanten ϵ über N *unterscheidbare* elektrische Oszillatoren in den Hohlraumwänden. Er ging von folgenden Annahmen aus: $S_N = k \ln W$, $U_N = P\epsilon$, $W = (N + P - 1)! / (n - 1)! P!$, $S = f(U/\nu)$ und $\epsilon = h\nu$. Heraus kam das mit den Experimenten übereinstimmende **Strahlungsgesetz des schwarzen Körpers**:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Die Abzählmethode der Statistik enthielt eigentlich schon den Atomismus, der in den diskreten Energiequanten wieder seinen Ausdruck fand. Unverständlich, aber für die Herleitung notwendig, blieb die Annahme der Ununterscheidbarkeit der Energiequanten. Die Lösung dieses Problems gelang später Bose und Einstein.

Die mathematische Struktur der Maxwell'schen Elektrodynamik war es, die Einstein 1905 in seiner Arbeit **Zur Elektrodynamik bewegter Körper** zu seiner speziellen Relativitätstheorie führte. Im Vierervektor-Formalismus der vereinigten Raumzeit konnte die gesamte Elektrodynamik durch *eine* Gleichung beschrieben werden:

$$\square \mathbf{A} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$$

\square meint den D'Alembert-Operator, \mathbf{A} das Vierervektor-Potential, dessen Krümmung die elektrischen und magnetischen Feldstärken bestimmt, und \mathbf{j} steht für die Viererstromdichte. Welch ein Triumph des NVP! Im Detail blieben aber noch einige Ungereimtheiten. Vor allem die Diskrepanz zwischen den diskreten elektrischen Ladungen und den von ihnen ausgehenden kontinuierlichen elektromagnetischen Wellen ließen den Welle-Teilchen-Dualismus wieder aufleben. Zumal Einstein ebenfalls 1905 im Anschluß an Plancks Entdeckung des Wirkungsquantums **Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt** nachdachte und darauf hinwies, daß monochromatische Strahlung von geringer Dichte sich wärmetheoretisch so verhielte als ob sie aus voneinander unabhängigen Energiequanten bestünde. Diese Übertragung der Planckschen Quantenhypothese von den elektrischen Oszillatoren in den Hohlraumwänden des schwarzen Körpers auf das elektromagnetische Strahlungsfeld stand in bemerkenswertem Einklang mit der speziellen Relativitätstheorie, in der Einstein die Proportionalität zwischen der Energie und der Frequenz eines Lichtkomplexes hergeleitet hatte: $E = h\nu = \hbar\omega$. Wellenerscheinungen und kontinuierliche Felder waren für Planck und Einstein nur genäherte Mittelwerte über diskrete Teilchenverteilungen. Und so ging es Einstein in seiner dritten Arbeit von 1905 darum, *Tatsachen zu finden, welche die Existenz von Atomen von bestimmter endlicher Größe möglichst sicherstellten*. **Die zufälligen Bewegungen von in ruhender Flüssigkeit suspendierten Teilchen** konnte er zur Gänze durch die deterministischen Newton'schen Gesetze erklären! Stochastische Prozesse, wie die zufällige Bewegung suspendierter Teilchen aufgrund der thermischen Bewegung der Wassermoleküle, waren also allein durch Mittelwertbildung über die als kausal geordnet angenommenen Mikrovorgänge erklärbar. 1906 überprüfte Einstein Plancks Ableitung des

Strahlungsgesetzes. In seiner Untersuchung **Zur Lichterzeugung und Lichtabsorption** hob er hervor, daß die Plancksche Theorie implizit von der Lichtquanten-Hypothese Gebrauch machte. Er schrieb: *Die Energie eines Elementarresonators kann nur Werte annehmen, die ganzzahlige Vielfache von $h\nu$ sind; die Energie eines Resonators ändert sich durch Absorption und Emission sprunghaft, und zwar um ein ganzzahliges Vielfaches von $h\nu$.* 1909 äußerte sich Einstein **Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems**. Im Rahmen der statistischen Mechanik untersuchte er die mittleren quadratischen Energieschwankungen $\langle \epsilon^2 \rangle$ einer im thermischen Gleichgewicht befindlichen Strahlungsdichte ρ im Volumen v . Genügte ρ dem Planckschen Gesetz, erhielt er folgendes Ergebnis:

$$\langle \epsilon^2 \rangle = \left(h\nu\rho + \frac{c^3}{8\pi\nu^2}\rho^2 \right) v d\nu$$

Damit hatte Einstein klar den **Doppelcharakter der Wärmestrahlung** herausgearbeitet; denn der erste Term in der Klammer steht für den *Teilchenanteil* und der zweite Term beschreibt den *Wellenanteil* der Strahlung. Er zog eine programmatische Forderung: *Deshalb ist es meine Meinung, daß die nächste Phase der Entwicklung der theoretischen Physik uns eine Theorie des Lichtes bringen wird, welche sich als eine Art Verschmelzung von Undulations- und Emissionstheorie des Lichtes auffassen läßt.*

Beim zweiten Versuch, sein Strahlungsgesetz zu verstehen, kam Planck 1911 im Rahmen der statistischen Mechanik zu dem Ergebnis, daß sich die mittlere Energie $\langle \epsilon \rangle$ eines elektrischen Oszillators der Frequenz ω im Gleichgewicht mit dem Strahlungsfeld der Temperatur T über zwei Terme verteilt:

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{1}{2}\hbar\omega + \frac{\hbar\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}$$

Den Ausdruck für $T = 0$ nannte er **Nullpunktsenergie** $\epsilon = \frac{1}{2}\hbar\omega$. Nernst übertrug dann 1913 Plancks Existenzannahme einer Nullpunktsenergie von den materiellen Oszillatoren auf das Strahlungsfeld. Im Anschluß an die Einsteinsche Lichtquanten-Hypothese dachte er sich auch das freie elektromagnetische Feld als aus einer Vielzahl von Energiequanten schwingender Feldoszillatoren zusammengesetzt. Im Grenzübergang zum absoluten Nullpunkt war das Vakuum damit von einem stochastischen **Nullpunktsfeld** (ZPF) erfüllt.

Bohr versuchte 1913, die Balmerformel zu erklären. Dazu machte er Annahmen über die Struktur der Atome. In seinen Arbeiten zum **Aufbau der Atome und Moleküle** postulierte er sogenannte stationäre Zustände der Elektronen. Weiter nahm er an, daß Emission und Absorption von Photonen durch sprunghafte Übergänge zwischen solchen Zuständen möglich sein sollten. Er schrieb: *Die Energiemenge ΔE , die ausgestrahlt wird bei dem Übergang des Systems aus einem Zustand, der $n = n_2$, in einen, der $n = n_1$ entspricht, ist daher unter der Voraussetzung homogener Strahlung mit $\Delta E = E_{n_2} - E_{n_1} =$*

$h\nu$:

$$\Delta E = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

Wir sehen, daß dieser Ausdruck das Gesetz erklärt, das die Linien in dem Wasserstoffspektrum verbindet. Neben den üblichen Abkürzungen steht m für die Elektronenmasse. Mit dem Geniestreich seiner Quantentheorie hatte Bohr nicht nur die Balmerformel erklärt, sondern den gesamten Aufbau des periodischen Systems der Elemente auf die Beschreibung stationärer Elektronenzustände zurückgeführt. Die Chemie wurde Teilgebiet der Physik!

1917 wandte sich Einstein in seiner Untersuchung **Zur Quantentheorie der Strahlung** den stochastischen Elementarprozessen zwischen den Molekülen und Lichtquanten zu. Im Anschluß an das Zerfallsgesetz der Radioaktivität nahm er **Übergangswahrscheinlichkeiten** für Absorptions- sowie für *spontane* und *induzierte* Emissionsprozesse an und leitete daraus das Plancksche Strahlungsgesetz ab. Den Strahlungsquanten bei der Wechselwirkung zwischen Feld und Materie schrieb er dabei nicht nur Energien $h\nu$ zu, sondern auch Impulse $h\nu/c$. Im Anschluß an Einstein und unter Rückgriff auf die Hamiltonsche Wirkungswelle konnte dann de'Broglie 1924 die Existenz von **Materiewellen** postulieren. Mit der Proportionalitätskonstanten \hbar schloß er aus den Phasenbeziehungen für eine Welle $\phi = \vec{k} \vec{r} - \omega t$:

$$S = \hbar\phi, \quad \vec{p} = \hbar\vec{k}, \quad E = \hbar\omega$$

auf die Wirkungsphase einer Materiewelle gemäß $\phi = S/\hbar$. Denn im Viervektor-Formalismus gilt: $(p_\mu) = (E/c, \vec{p}) = \hbar(\omega/c, \vec{k})$. D.h. aus der Gleichheit der ersten Komponente, die Energie und Frequenz eines Lichtkomplexes in Beziehung setzte, folgte de'Broglie auch die Gleichheit der weiteren Komponenten, die Impuls und Wellenzahl verknüpften. Was für das Licht galt, sollte fortan für die gesamte Materie gelten! Wie aber sah die Wellengleichung der Materie aus?

3 Moderne Physik

Es waren im wesentlichen drei Ergebnisse experimenteller Forschung, die zur Entwicklung der Quantentheorie geführt hatten: Schwarzkörperstrahlung, Atomspektren und Radioaktivität. Die Universalität des Kirchhoffschen Strahlungsgesetzes basierte auf den allgemeinen Prinzipien der Thermodynamik. Eine Herleitung des speziellen gemessenen Strahlungsgesetzes gelang Planck aber nur, indem er die Boltzmannsche Abzählmethode der statistischen Mechanik für ununterscheidbare Teilchen abwandelte. Wie die Analyse der Energieschwankungen im Strahlungsfeld zeigte, erwachsen die Fluktuationen aus zwei Quellen: einer thermostatischen gemäß kT und einer quantenstatistischen gemäß $h\nu$. Die Existenz einer Nullpunktsenergie für $T = 0$ sprengte den Rahmen der Thermodynamik. Neben der äußeren Wärmebewegung der Atome mußten sie noch über innere Schwingungszustände verfügen, deren Energie nur für $\nu = 0$ verschwände. Nach Einsteins

Untersuchungen verteilte sich die Energie E_n dieser Elementarresonatoren nur über ganzzahlige Vielfache n von $h\nu$:

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) h\nu$$

Im Grundzustand für $n = 0$ blieb noch die Nullpunktsenergie. Einsteins Analyse der Absorption und Emission von Lichtquanten durch die Elementarresonatoren im Strahlungsfeld führte zu der Annahme spontaner Emission, ganz so wie beim radioaktiven Zerfall. Was war die Ursache dieser Zufälligkeit, die den Dingen gleichsam innewohnte? Konnte es, wie bei der Brownschen Bewegung, eine unterliegende Schicht der Ordnung geben, aus der die Spontanzerfälle durch Mittelung verstanden werden konnten? Erforderte die Quantentheorie eine Erweiterung der statistischen Mechanik?

Im Gegensatz zu Einstein, suchte Bohr nicht nach einer objektiven Ursache des Zufalls in den Mikrovorgängen. Im ging es eher um eine selbstkonsistente Theorie, die den Einfluß der Meßsituation zu berücksichtigen hatte. Seiner **Komplementaritäts-Philosophie** entsprechend, daß man nicht zugleich denken und über das Denken denken könne, dürfe man auch nicht versuchen, zugleich Teilchen- und Welleneigenschaften der Objekte messen zu wollen. So wie man den Bewußtseinsstrom störe, wenn man ihn reflektiere, verflüchtige sich auch die Interferenz, wenn man die Bahnen der interferierenden Quanten verfolge. Seine Komplementaritäts-Philosophie hatte ihm bei der Formulierung des Atommodells gute Dienste erwiesen. Die diskreten Strahlungsübergänge *zwischen* den Energieniveaus im Atom verband er geschickt mit der Annahme strahlungsloser Elektronenzustände, die als stehende Wellen gleichsam den Kern umhüllten. Die Quantisierung der Elektronenwelle erfolgt dann durch ganzzahlige Verteilung der jeweiligen Wellenlängen des Schwingungszustandes über den Atomumfang.

Aufgrund der endlichen Größe des Wirkungsquantums stört andererseits der mit jeder Messung verbundene Austausch von Energiequanten das Meßobjekt. Sind Messungen aber sogar am absoluten Nullpunkt nicht störungsfrei möglich, so werden die Ergebnisse mehrerer Messungen im allgemeinen nicht mehr unabhängig voneinander sein können und von der Reihenfolge abhängen. Ein solcher Einfluß der meßpraktischen *Operationen* konnte in der Theorie durch mathematische *Operatoren* berücksichtigt werden, die im allgemeinen nicht vertauschten.

Im Anschluß an die Poisson-Klammern der Hamiltonschen Mechanik gelang Heisenberg 1926 die Formulierung einer algebraischen Theorie, in der er die Meßoperatoren durch Matrizen darstellte. Er ging aus von den kanonisch-konjugierten Variablen des Phasenraumes p und q , für die er aber eine nichtverschwindende **Vertauschungsrelation** annahm: $\mathbf{qp} - \mathbf{pq} = i\hbar$. Nach Heisenberg wird also mit dem Wirkungsquantum eine nichtkommutative Algebra der Atome eingeführt. Im Kontinuumsübergang großer Quantenzahlen konnte die **Matrizenmechanik** mit $\hbar \rightarrow 0$ auf die Hamiltonschen Mechanik zurückgeführt werden. Die Anwendung seiner Matrizenmechanik auf beliebige Hamiltonsche Systeme, ergab eine dynamische Grundgleichung für den Meßoperator A in Abhängigkeit

von der Zeit und dem Energieoperator H :

$$i\hbar \frac{dA}{dt} = AH - HA$$

Die algebraische Berechnung der möglichen Energieniveaus n_k für den Energieoperator des Elementarresonators n lieferte auch den Grundzustand der Nullpunktsenergie, den die kommutative Theorie für kontinuierliche Energieverteilungen nicht voraussagte:

$$H = \sum_k h\nu_k \left(n_k + \frac{1}{2} \right)$$

Bohr und Heisenberg waren derart beeindruckt von ihrer neuen Theorie, daß sie einen fundamentalen **Bruch mit dem mechanistischen Weltbild** annahmen und fortan die sogenannte **Quantenmechanik als moderne Physik** von der klassischen Physik des 19. Jahrhunderts abzugrenzen suchten. Aus den Vertauschungsrelationen konnte Heisenberg seine berühmt gewordenen **Unbestimmtheitsrelationen** für kanonisch-konjugierte Variablen ableiten, die in der klassischen Theorie keine Entsprechung hatten. Danach war es z.B. unmöglich, Impuls und Ort eines Elektrons *zugleich* beliebig genau zu messen. Heisenberg sah in der Quantenmechanik den schon von Einstein in der speziellen Relativitätstheorie fruchtbar gemachten **Positivismus** Machs weitergeführt. In seiner grundlegenden Arbeit **Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik** ging es ihm darum, den *Kampf der Meinungen um Diskontinuums- und Kontinuumstheorie, Korpuskeln und Wellen* durch Beziehungen zwischen experimentell gegebenen Zahlen zu ersetzen. Heisenberg glaubte, die Entstehung der klassischen „Bahn“ so formulieren zu können: *Die „Bahn“ entsteht erst dadurch, daß wir sie beobachten.*

Was mag Heisenberg zu einem derartigen Schritt in den Subjektivismus, gleichsam von der Seins- in die Erkenntnistheorie, bewogen haben? Einstein hatte mit der allgemeinen Relativitätstheorie seinen Positivismus der frühen Phase überwunden. In seiner Feldgleichung hatte er einen objektiven Zusammenhang zwischen Materieverteilung und Raumzeit gefunden. Mit dem Erfolg seiner Gravitationstheorie verknüpfte er seinen Maßstab der Vollkommenheit: *Es ist klar, daß man im allgemeinen eine Theorie als umso vollkommener beurteilen wird, eine je einfachere Struktur sie zugrunde legt und je weiter die Gruppe ist, bezüglich welcher die Feldgleichungen invariant sind.*

Diesem Ideal fühlte sich auch Schrödinger verbunden, als er im Anschluß an die Hamiltonsche Wirkungswelle ebenfalls 1926 seine **Wellengleichung der Materie** formulierte:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi$$

Im Gegensatz zur Heisenbergschen Matritzgleichung für Meßoperatoren, fand die Schrödingergleichung unter den Physikern rasche Aufnahme, da sie in gewohnter Weise mit einer Differentialgleichung arbeiten konnten. Für Heisenberg mag das ein Grund gewesen sein, sich über den anschaulichen Inhalt seiner Theorie Gedanken zu machen. Born benutzte die Schrödingergleichung 1927 in der Streutheorie zur Berechnung von Wirkungsquerschnitten für Streuexperimente mit Teilchenbeschleunigern. In diesem Zusammenhang gelang es ihm, die Wellenfunktion ψ als **Wahrscheinlichkeitsamplitude**

zu deuten. D.h. ihr Betragsquadrat $\psi^*\psi$ sah er als Wahrscheinlichkeitsdichte an, so daß $dW = \psi^*\psi dq$ das Wahrscheinlichkeitsmaß darstellte, einen Zustand im Intervall dq des hochdimensionalen Konfigurationsraums zu finden. Da Schrödinger kurze Zeit später die Äquivalenz zwischen der Wellen- und Matrizenmechanik beweisen konnte, drohte die Heisenbergsche Theorie ins Hintertreffen zu geraten. Zumal de'Broglie 1927 auf die Ergänzung der Schrödingergleichung durch eine Potentialgleichung hingewiesen hatte, nach der die Teilchenbahnen in gewohnter Weise aus einem Potential berechnet werden konnten. Die Interpretation dieses **Quantenpotentials** fiel allerdings der vehementen Kritik Paulis zum Opfer, da es eine instantane Wirkungsausbreitung zur Folge hatte, die der Relativitätstheorie widersprach. Für eine Wahrscheinlichkeitswelle mochte das noch angehen, aber für eine Wirkungswelle? Einsteins Haltung blieb zwiespältig. Die Wellenfunktion hielt er für ein *Gespensterfeld* und am instantanen Quantenpotential störte ihn natürlich die fehlende relativistische Invarianz. De'Broglie deutete die Wellenfunktion in seiner Vervollständigung der Quantenmechanik als **Führungswelle**, die den Teilchen gleichsam den Weg wies, ganz so wie ein Kraftfeld die Bahnen der Massen oder Ladungen bestimmte. Im Gegensatz zur Gravitation oder zum Elektromagnetismus Einsteins, war die Wirkung der Führungswelle auf die Teilchen jedoch einseitig und instantan.

Die sich unter der Vorherrschaft Bohrs schnell verbreitende **Kopenhagener Deutung** der Quantenmechanik machte aus der Not, es mit einem Gespensterfeld zu tun zu haben, die Tugend, daß es sich dabei lediglich um das *Wissen* handelte, das wir von einem atomaren System haben könnten. Dieses Wissen mußte darüber hinaus die gesamte physikalische Situation des Experiments umfassen und garantierte insofern Vollständigkeit. Die Ergänzung der *Wissensfunktion* als Lösung der Schrödingergleichung durch Teilchenbahnen als Wirkung eines Quantenpotentials wurde damit überflüssig. Der Mathematiker von Neumann brachte die Quantenmechanik 1932 in eine mathematische Form, die bis heute Bestand hat und von den Abwechslern gerne als *orthodox* bezeichnet wird. Die atomaren Zustände werden darin als Vektoren in einem hochdimensionalen, komplexen Zustandsraum, dem Hilbertraum, dargestellt. Die Meßoperatoren werden zu selbstadjungierten Operatoren, die auf die Zustandsvektoren anzuwenden sind, deren Dynamik durch unitäre Transformationen beschrieben wird. Als Wahrscheinlichkeitsmaß fungiert die Summe der Betragsquadrate der Eigenwerte bei der Entwicklung der Zustandsvektoren nach dem vollständigen System von Eigenfunktionen der Meßoperatoren. Einem Theorem Gleasons zufolge ist ein solches Wahrscheinlichkeitsmaß sogar das einzig mögliche im Hilbertraum.

Von Neumann verfolgte mit seiner mathematisch rigorosen Formulierung der Quantenmechanik aber noch ein weiteres Ziel. Er wollte die Möglichkeit einer Ergänzung seiner Darstellung durch *verborgene Variablen* ausschließen. Dazu konnte er innerhalb seines Formalismus einen strengen mathematischen Beweis führen. Sein Beweis enthielt jedoch eine wesentliche, physikalisch unsinnige, Voraussetzung und wurde von den Physikern, die sich die Mühe machten, ihn nachzuvollziehen, nicht ernst genommen. Das waren zunächst aber nur sehr wenige. Die Mehrheit begnügte sich mit dem Glauben, daß die Bohr-Heisenbergsche Quantenmechanik nunmehr sogar durch einen berühmten Mathematiker als nicht durch verborgene Variablen erweiterbar bewiesen worden war. De'Broglies Theo-

rie wurde vergessen, er selbst konvertierte zur Orthodoxie. 1935 allerdings trat Einstein wieder auf den Plan und fragte in einer Gemeinschaftsarbeit mit Podolsky und Rosen: **Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?** In einem Gedankenexperiment mit korrelierten Quantenzuständen wiesen die Autoren nach, daß die **Quantenmechanik nicht vollständig** sein könne, wenn sie *realistisch* und *lokal* sein solle. Der Orthodoxie gelang eine Rettung der Vollständigkeit natürlich durch die Kritik des klassischen Realitätspostulats. Die de'Brogliesche Erweiterung durch ein nichtlokales Quantenpotential war andererseits mit der Einsteinschen Realitätsauffassung vereinbar. Einstein hatte sein Dilemma mal wieder in brillianter Klarheit auf den Punkt gebracht. Da er Realismus und Lokalität für unabdingbar hielt, stand die Quantenmechanik für ihn weiterhin in dem Ruch, unvollständig zu sein.

Die Avantgarde der Theoretiker nahm allerdings kaum Notiz von der Einsteinschen Arbeit. Die jungen Physiker waren vollends damit beschäftigt, eine relativistisch invariante Quantentheorie durch Quantisierung des Materiefeldes und des elektromagnetischen Feldes auf den Weg zu bringen, die später **Quantenelektrodynamik** (QED) genannt wurde. Sie begannen damit, die unverständenen Meßergebnisse beim Experimentieren mit Atomen in elektromagnetischen Feldern zu erklären. Die Experimente legten für das magnetische Moment μ_e des Elektrons folgenden Ausdruck nahe:

$$\mu_e = -g \frac{e \hbar}{2 m} \frac{1}{2}$$

Der g -Faktor des gyromagnetischen Verhältnisses lag bei 2 und der Ausdruck $\hbar/2$ stand für den Eigendrehimpuls (Spin) des Elektrons. Pauli erweiterte die Schrödingergleichung für Elektronen im elektromagnetischen Feld um einen Term, der die Wechselwirkung zwischen Elektronenspin $\vec{\sigma}$ und Magnetfeld \vec{B} beschrieb:

$$i\hbar \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \left(\frac{1}{2m} (-i\hbar \vec{\nabla} + e\vec{A})^2 + \frac{e\hbar}{2m} \vec{\sigma} \vec{B} - e\phi \right) \varphi$$

\vec{A} meint das Dreier-Vektorpotential und ϕ steht für das elektrostatische Skalarpotential. Unter Berücksichtigung des Ausschließungsprinzips für die *unterscheidbaren* Elektronen mit halbzahligem Spin stimmte die Pauligleichung gut mit den Experimentierergebnissen überein. Einen Theoretiker ließ sie allerdings unbefriedigt, da sie nicht aus *ersten Prinzipien* folgte.

Warum gab es einen Zusammenhang zwischen Spin und Statistik? Planck hatte bereits 1900 eine Abzählmethode für *ununterscheidbare* Elementarresonatoren annehmen müssen. Die von Einstein daraufhin postulierten Lichtquanten hatten die ganzzahlige Spinquantenzahl eins. Im Anschluß an Arbeiten Boses und Fermis um die Mitte der 1920er Jahre gab es einen generellen Zusammenhang zwischen der thermischen Verteilung der mittleren Besetzungszahlen $\langle n_i \rangle$ für Quantenzustände gleichartiger bzw. ungleichartiger Teilchen. Die Verteilungsfunktionen nach Bose $\langle n_i \rangle_B$ und Fermi $\langle n_i \rangle_F$ unterschieden sich durch das Vorzeichen im Nenner:

$$\langle n_i \rangle_B = \frac{1}{e^{\alpha + \beta \epsilon_i} - 1}, \quad \langle n_i \rangle_F = \frac{1}{e^{\alpha + \beta \epsilon_i} + 1}$$

Die Plancksche Abzählmethode für Teilchen mit ganzzahligen Spinquantenzahlen hat eine symmetrische Wellenfunktion zur Folge und korrespondiert mit der *Bosestatistik* $\langle n_i \rangle_B$. Das Paulische Ausschließungsprinzip für Teilchen mit halbzahligen Spinquantenzahlen führt auf eine antisymmetrische Wellenfunktion, der eine *Fermistatistik* $\langle n_i \rangle_F$ entspricht. Die von Einstein erstmals postulierten Feldquanten des elektromagnetischen Feldes zählen zu den **Bosonen**. Die Feldquanten der Materiewellen dagegen verhalten sich wie **Fermionen**.

Warum haben die fundamentalen Bausteine der Materie, die Fermionen, halbzahligen Spin? Für Dirac lag die Antwort auf diese Frage in der Forderung, daß die Wahrscheinlichkeit immer positiv sein müsse bzw. $\psi^* \psi \geq 0$. Und warum gibt es überhaupt Bosonen und Fermionen? Weinberg stellte dazu folgende Plausibilitätsbetrachtung an: *First note that if two particles with momenta and spins p, σ belong to identical species n , then the state-vector $\Phi(\dots p \sigma n \dots p' \sigma' n \dots)$ and $\Phi(\dots p' \sigma' n \dots p \sigma n \dots)$ represent the same physical state; if this were not the case then the particles would be distinguished by their order in the labelling of the state-vector, and the first listed would not be identical with the second. Since the two state-vectors are physically indistinguishable, they must belong to the same ray, and so*

$$\Phi(\dots p \sigma n \dots p' \sigma' n \dots) = \alpha_n \Phi(\dots p' \sigma' n \dots p \sigma n \dots)$$

where α_n is a complex number of unit value. We may regard this as part of the definition of what we mean by identical particles. The crux of the matter is to decide on what the phase factor may depend. If it depends only on the species index n , then we are nearly done. Interchanging the two particles again, we find

$$\Phi(\dots p \sigma n \dots p' \sigma' n \dots) = \alpha_n^2 \Phi(\dots p \sigma n \dots p' \sigma' n \dots)$$

so that $\alpha_n^2 = 1$, yielding

$$\Phi(\dots p \sigma n \dots p' \sigma' n \dots) = \pm \Phi(\dots p \sigma n \dots p' \sigma' n \dots)$$

as the only two possibilities.

Einstein hatte 1905 zwei fundamentale physikalische Prinzipien eingeführt: das Quantisierungs- und das Geometrisierungsprinzip. Plancks Entdeckung der Proportionalität von Energie und Frequenz für die sich im Strahlungsgleichgewicht befindlichen Elementarresonatoren des Hohlraums deutete er in kühner Weise als Quantisierungsvorschrift und postulierte die Existenz diskreter Lichtquanten. Und Lorentzens Kontraktionsgleichung für schnell bewegte Körper gegenüber dem Äther reformulierte er als Relativitätsprinzip, dem alle physikalischen Theorien zu genügen hätten. Das **Quantisierungsprinzip** hatte zur Entdeckung zweier fundamentaler Teilchenarten geführt, den Bosonen und den Fermionen. Zu den Bosonen zählten die als Quanten des elektromagnetischen Feldes postulierten Lichtquanten, die später auch Photonen genannt wurden. Ihre Wellengleichung war seit

Maxwells Herleitung von 1864 bekannt. Als Vertreter der Fermionen wurde das Elektron erkannt, das erstmals 1858 in den Kathodenstrahlen experimentell in Erscheinung trat. Schrödinger hatte die erste Wellengleichung für Elektronen im elektrostatischen Potential des Protons formuliert. Nach der Quantisierung der kanonisch-konjugierten Variablen des Phasenraumes durch Einführung des Energieoperators H als Funktion des Orts- und Impulsoperators, stand noch die Quantisierung der Felder aus. Ihre Durchführung zur Erlangung der entsprechenden Feldoperatoren gelang Heisenberg und Pauli 1929. Ihre Untersuchungen markieren den Beginn der **Quantenfeldtheorien** (QFT).

Die Übertragung des Relativitätsprinzips der Elektrodynamik auf die Gravitationstheorie führte in der allgemeinen Relativitätstheorie (ART) zum **Geometrisierungsprinzip**. Aus den konstanten Koeffizienten $\eta_{\alpha\beta}$ der Minkowski-Metrik in flacher Raumzeit wurden die kontinuierlich veränderbaren Metrik-Koeffizienten $g_{\mu\nu}$, deren Änderung ein *affiner Zusammenhang* Γ bestimmte, der auch Verschiebungs- oder Führungsfeld genannt wurde. Nach dem *Äquivalenzprinzip* läßt sich ein konstantes Gravitationsfeld durch ein gleichförmig beschleunigtes Bezugssystem nachbilden. Für die Geodätengleichung in gekrümmter Riemannscher Raumzeit ergab das mit der Eigenzeit τ gemäß $d\tau = -\eta_{\alpha\beta}d\xi^\alpha d\xi^\beta$ für die frei fallenden Koordinatensysteme ξ^α , ξ^β folgenden Zusammenhang:

$$\frac{d^2 x^\lambda}{d\tau^2} + \Gamma_{\mu\nu}^\lambda \frac{dx^\mu}{d\tau} \frac{dx^\nu}{d\tau} = 0$$

Dabei stellte sich natürlich sofort die Frage, ob die flache Metrik $\eta_{\alpha\beta}$ bloß in krummlinigen Koordinaten geschrieben worden war oder durch die Gravitation zu $g_{\mu\nu}$ gekrümmt wurde:

$$\eta^{\alpha\beta} = g^{\mu\nu} \frac{\partial \xi^\alpha}{\partial x^\mu} \frac{\partial \xi^\beta}{\partial x^\nu} \text{ bzw. } g_{\mu\nu} = \frac{\partial \xi^\alpha}{\partial x^\mu} \frac{\partial \xi^\beta}{\partial x^\nu} \eta_{\alpha\beta}$$

Der Metrik kam jedenfalls eine Doppelbedeutung zu: als metrischer Tensor der vierdimensionalen Riemannschen Raumzeit und zur Repräsentation des Gravitationsfeldes. Existierte die Raumzeit überhaupt noch unabhängig von der Gravitation? Ein nicht-verschwindender Krümmungstensor R drückte die Existenz eines Gravitationsfeldes aus: $R_{\mu\kappa} = g^{\lambda\nu} R_{\lambda\mu\nu\kappa}$. Für Einstein bildeten die physikalischen Felder die Basis der Raumzeitgeometrie. Nach ihm dynamisierte das Gravitationsfeld die Geometrie der Raumzeit. Den Zusammenhang zwischen Krümmungstensor R und Energie-Impulstensor T mit der Gravitationskonstanten G lieferte 1915 Einsteins berühmte Feldgleichung:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -8\pi G T_{\mu\nu}$$

D.h. die gesamte Energie *aller* Wechselwirkungen trägt zur Krümmung der Raumzeit bei. Eine Quantentheorie der Gravitation ist allerdings bis heute nicht gelungen. Die masselosen Spin-2-Gravitonen werden lediglich in linearer Näherung durch Quantisierung der Gravitationswellen gewonnen. Die Annahme kontinuierlicher Teilchenbahnen im gekrümmten Raum widerspricht zwar der Kopenhagener Deutung, steht aber im Einklang mit den Teilchenbahnen unter dem Einfluß der de'Broglieschen Führungswelle.

Ein weiteres Fundamentalprinzip zur Geometrisierung der Physik wurde 1918 von dem Mathematiker Weyl eingeführt. Bei seinem Versuch, Gravitation und Elektromagnetismus zu vereinheitlichen, erweiterte er das Prinzip der lokalen Bewegungsinvarianz der ART durch die Forderung nach lokaler Skaleninvarianz der Maßstäbe, die er **Eichinvarianz** nannte. Das Verschiebungsfeld Γ ergänzte er dafür um einen Ausdruck, der neben den Metrik-Koeffizienten zudem die Komponenten eines Vektorpotentials enthielt, das in üblicher Weise die Berechnung des Feldtensors erlaubte. Die physikalischen Konsequenzen dieser Erweiterung der ART hielten allerdings nicht der Kritik Einsteins stand. Nachdem Weyl aber 1929 die Eichinvarianz auf die Quantentheorie übertragen hatte, wurde den Physikern die ganze Tragweite seines Konzeptes bewußt und sie machten es zu einem der leitenden Prinzipien bei der Formulierung der QFT der subatomaren Wechselwirkungen.

Dirac verallgemeinerte 1927 die Schrödingergleichung für Elektronen im elektromagnetischen Feld zu einer relativistisch-invarianten **Wellengleichung der Materie**. Für ein freies Elektron machte er folgenden Ansatz: $H = -i\hbar c\alpha\nabla + \alpha_4 mc^2$. Mit $c = \hbar = 1$, $\gamma = -i\alpha_4\alpha$ und $\gamma^0 = -i\alpha_4$ erhielt er folgende Gleichung für Vierervektoren x und Vierermatrizen γ^μ im elektromagnetischen Feld des Vierervektorpotentials A_μ :

$$\left(i\gamma^\mu \frac{\partial}{\partial x^\mu} - m \right) \psi(x) = e\gamma^\mu A_\mu \psi(x)$$

Diracs Gleichung erklärte zwar die Feinstrukturen im Wasserstoffatom sowie den Elektronenspin und den g -Faktor im magnetischen Moment. Da der Magnetismus allgemein als relativistischer Effekt verstanden werden kann, war das zu erwarten gewesen. Zudem folgt die Diracgleichung auch schlicht aus der Multiplikation der quellenfreien Maxwellgleichung mit dem Paulivektor der Spinmatrizen. Das bemerkte aber erst Sallhofer 1978.

Als schwerwiegender erwies sich das Problem negativer Energien. Dirac hatte sich nämlich mit Lösungen für negative Energien herumzuschlagen gemäß $E = \pm\sqrt{p^2 + m^2}$. Als Ausweg postulierte er die Existenz einer Art von **Antiteilchen**, die er als *Lochzustände* im Vakuum ansah. Als Anderson 1932 das Positron entdeckte, konnte es als Lösung der Diracgleichung verstanden werden. Feynman faßte den Triumph Diracs in seiner Memorial Lecture zusammen: *If we insist that particles can only have positive energies, then you cannot avoid propagation outside the light cone. If we look at such propagation from a different frame, the particle is traveling backwards in time: it is an antiparticle. Then, looking at the idea that the total probability of something happening must be one, we saw that the extradiagrams arising because of the existence of antiparticles and pair production implied Bose statistics for spinless particles. When we tried the same idea on fermions, we saw that exchanging particles give us a minus sign: they obey Fermi statistics. The general rule was that a double time reversal is the same as a 360° rotation. This gave us the connection between spin and statistics and the Pauli exclusion principle for spin 1/2.*

Im Anschluß an die Arbeiten Diracs, Heisenbergs und Paulis entwickelten in den 1940er Jahren Feynman, Schwinger und Tomonaga die Eichtheorie der elektromagne-

tischen Wechselwirkung. Die weiteren **Eichtheorien** des Standard-Modells zur Beschreibung der starken und schwachen Wechselwirkung im Bereich der subatomaren Physik wurden in den 1960er und 70er Jahren von Gell-Mann, Glashow, Salam und Weinberg sowie 't Hooft und Veltman entwickelt und folgten im Prinzip dem gleichen Schema. In ihm werden die Bauteilchen oder Fermionen (Quarks, Leptonen) durch Materiefelder beschrieben. Die Existenz der Austauschteilchen oder Bosonen (Gluonen, W/Z-Bosonen, Photon, Graviton) folgt mathematisch aus der Forderung, daß die Materiefelder eichinvariant sein sollen und die Austauschströme dem Äquivalenzprinzip zu genügen haben.

Bei der Vereinheitlichung der elektromagnetischen mit der schwachen und starken Wechselwirkung der Kernkräfte kam allerdings die Schwierigkeit hinzu, daß die Austauschteilchen oder Eichbosonen der schwachen Wechselwirkung, die W/Z-Bosonen, kurzreichweitig wirken und damit im Gegensatz zu den Photonen eine Ruhemasse haben. Um die Konsistenz der vereinheitlichten elektroschwachen Theorie zu erhalten, wurde ein Mechanismus übernommen, der schon seit langem in der Festkörperphysik benutzt und von Higgs auf die Hochenergiephysik übertragen worden war. Danach können die Eichbosonen ihre Masse aus dem Symmetriebruch eines angenommenen Vakuumfeldes erhalten. So wie im Kristallgitter eines Festkörpers z.B. die Cooperpaare beim Übergang zur Supraleitung auskondensieren, bilden sich im **Phasenübergang des Vakuums** die Massen der Eichbosonen. D.h. vor dem Symmetriebruch bei hohen Energien sind die Austauschteilchen masselos und unbegrenzt weit wirksam. Nach dem Symmetriebruch bzw. Phasenübergang erlangen die W/Z-Bosonen mit abnehmender Energie ihre Masse, wirken nur noch über kurze Distanzen und entkoppeln von dem Photonenfeld der QED. Neben dem elektromagnetischen ZPF ist das Vakuum mit dem Higgsfeld um eine weitere Struktur bereichert worden. Nach dem **Higgsboson** als Austauschteilchen zwischen elektroschwachem und Vakuumfeld wird seit Jahren intensiv gefahndet. Da seine Masse aber bei über 250 GeV vermutet wird, dürfte es erst mit der nächsten Beschleunigergeneration nachweisbar sein.

Das prinzipielle Vorgehen bei der Formulierung einer Eichtheorie soll am Beispiel der QED näher erläutert werden. Der Clou dabei ist, daß die Forderung nach lokaler Eichinvarianz des Materiefeldes die Existenz eines Eichfeldes zur Folge hat, das die Wechselwirkung vermittelt. In der QED wird das freie Materiefeld der Elektronen durch die Diracgleichung beschrieben, die folgender Lagrangefunktion L_D entspricht:

$$L_D = \bar{\psi}(x) (i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi(x)$$

Als *globale* Eichinvarianz wird die Unabhängigkeit der Lagrangefunktion von einer globalen Änderung der Wellenphase bezeichnet. D.h. $\psi'(x) = e^{iq\Lambda} \psi(x)$ läßt L_D unverändert und hat Ladungserhaltung zur Folge. Denn aus dem ersten Noetherschen Theorem folgt die Existenz eines Stromes, für den die Kontinuumsgleichung gilt: $j_\mu = q\bar{\psi}\gamma_\mu\psi$, wobei $\partial_\mu j^\mu = 0$.

Die weitergehende Forderung nach *lokaler* Eichinvarianz $\Lambda = \Lambda(x)$ zieht die Existenz eines Eichpotentials nach sich: $A_\mu(x) = \partial_\mu \Lambda(x)$. Die Potentialkrümmung bzw. Rotation ergibt die Eichfeldstärke: $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$. Noetherstrom und Eichpotential bestimmen

den Wechselwirkungsterm:

$$L_W = -j_\mu^{(E)} A^\mu$$

Das Eichfeld der elektromagnetischen Wechselwirkung ergibt sich aus der Maxwell'schen Lagrangefunktion:

$$L_M = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

Der Zusammenhang zwischen Stromvektor und Feldtensor wird durch die Maxwell'sche Wellengleichung beschrieben:

$$\partial^\mu F_{\mu\nu} = j_\nu^{(Q)}$$

Gemäß Äquivalenzprinzip wird die Gleichheit beider Ströme angenommen, d.h. Eichstrom $j_\mu^{(E)}$ und Quellenstrom $j_\nu^{(Q)}$ sind identisch. Die lokale Eichinvarianz hat also die Existenz eines Eichpotentials zur Folge, dem ein realer Wechselwirkungsstrom und ein wirkliches elektromagnetisches Feld erwächst. Die Lagrangefunktion der vollständigen QED umfaßt damit drei Terme:

$$L_{QED} = L_D + L_W + L_M$$

Einstein hatte die Newton'sche Gravitationstheorie durch Geometrisierung zur ART verallgemeinert. Im Rahmen des eichtheoretischen Programms Weyls entspricht die lokale Eichinvarianz dem allgemeinen Relativitätsprinzip, nach dem die Gravitation unabhängig von der Wahl der Raumzeit-Koordinaten bzw. invariant bzgl. beliebiger kontinuierlicher Raumzeit-Transformationen sein sollte. Der Diracgleichung des Materiefeldes entspricht in der ART die Geodätengleichung in gekrümmter Raumzeit. Dem Ladungsstrom der QED korrespondiert der Energiestrom der ART. Und dem elektromagnetischen Feldtensor als Eichfeld entspricht das Verschiebungsfeld. Das Eichpotential korrespondiert mit dem metrischen Tensor und die Maxwell'sche Feldgleichung steht der Einsteinschen Feldgleichung gegenüber. Im Wechselwirkungsbild der Eichtheorien wird das Gravitationsfeld als Wechselwirkungsfeld eines masselosen Spin-2-Bosons, des Gravitons, angenähert. Die lokale Lorentz-Invarianz der Gravitationstheorie einer Kopplung zwischen Graviton und Energie-Impulstensor hat nach Weinberg das Äquivalenzprinzip zwischen träger und schwerer Masse zur Folge: *It seems to be impossible to construct any Lorentz-invariant quantum theory of particles of mass zero and spin two unless the corresponding classical field theory obeys the Principle of Equivalence*

Im Rahmen der mathematischen Theorie der Faserbündel konnten die physikalischen Theorien der vier fundamentalen Wechselwirkungen gemäß NVP formal zusammengeführt werden. Ein physikalisches Verständnis des Zusammenhangs zwischen Teilchenphysik und Gravitationstheorie ist aber erst unter der Annahme einer weiteren Invarianzforderung möglich: der **Supersymmetrie** zwischen Bosonen und Fermionen. Die experimentelle Überprüfung der Niederenergieabschätzungen in der vereinheitlichten supersymmetrischen Theorie (SUSY) ebenso wie in der Theorie der Superstrings wird aber erst der nächsten Beschleunigergeneration am CERN oder bei DESY möglich sein.

4 Neoklassische Physik

Quantisierung und Geometrisierung haben zu einer faszinierenden, näherungsweise vereinheitlichten Theorie geführt, dem Standard-Modell. Eine supersymmetrische Vereinigung von ART und QFT ist allerdings erst im Bereich der Planckenergie von 10^{28} eV zu erwarten und damit astronomisch weit von den experimentell zugänglichen Energien bei 10^{12} eV entfernt. Aufgrund mangelnder empirischer Prüfbarkeit kommt der Sorgfalt beim Entwurf der Forschungsprogramme, ihrer ersten Prinzipien und der mathematischen Ausformulierung besondere Bedeutung zu.

Im **Forschungsprogramm der klassischen Physik** war die Natur selbst zum Gegenstand der Untersuchung auserkoren worden. Von der Beschreibung der Planetenbahnen durch Kepler bis hin zur Kosmologie Einsteins, ging es um ein rationales Verständnis der beobachtbaren Naturvorgänge. Die Natur wurde dabei als an sich seiend unterstellt, die unabhängig davon existierte, ob es Menschen gab, die sie untersuchten. Die Naturforscher folgten einer realistischen Weltsicht mit dem Ziel einer objektiven Erklärung der Naturereignisse. Die Grundvorgänge wurden als kausal und deterministisch geordnet angenommen. Die statistischen Methoden der Thermodynamik änderten nichts am Prinzip der Ordnung auch auf dem atomaren Beschreibungsniveau. Lediglich das menschliche Unvermögen, die astronomische Vielfalt in der Bewegung von 10^{23} Teilchen zu verfolgen, zwang zu statistischen Mittelwertbildungen und Schwankungsberechnungen. Die makroskopischen Sterne, Planeten und Asteroiden konnten anhand ihrer Bewegungsverläufe identifiziert und durch Zustandsbeschreibungen charakterisiert werden, so daß weitreichende Extrapolationen in Vergangenheit und Zukunft möglich waren. Hinsichtlich der Myriaden von Sternen und Galaxien sowie der unzähligen schwarzen Materie im gesamten Kosmos war die Situation allerdings ganz ähnlich wie auf dem atomaren Niveau. Analog zur Thermodynamik eines abgeschlossenen Systems wurde die Einsteinsche Feldgleichung zu einer Zustandsgleichung der Raumzeit umformuliert. So wie z.B. Druck und Temperatur das Volumen eines Gases bestimmen, legen Energie und Impuls die Geometrie der Raumzeit fest.

Im **Forschungsprogramm der modernen Physik** ist die Natur selbst nicht mehr als Forschungsgegenstand erhalten geblieben. Das atomare Naturgeschehen wurde nur noch insoweit untersucht, wie es sich zeigte, wenn es mit realisierbaren Meßgeräten registriert werden konnte. Die Alltagsrationalität, die der menschlichen Erfahrung mit wahrnehmbaren und handhabbaren Dingen und Vorgängen der Umwelt erwuchs, wurde als unzureichend überwunden. Der Natur wurde keine eigene Seinsweise mehr unterstellt, sondern ihre Erkennbarkeit durch den Menschen stand im Vordergrund. Die Naturforscher folgten einer positivistischen Weltsicht mit dem Ziel einer subjektgebundenen Erklärung der Naturerscheinungen. Die Grundvorgänge wurden als zufällig und indeterminiert angenommen. Im Gegensatz zu den statistischen Methoden der Thermodynamik bezogen sich die Quantenstatistiken bereits auf einzelne Teilchen, deren Zustände aufgrund der prinzipiellen Meßwechselwirkungen fluktuierten. Die mikroskopischen Elementarteilchen konnten nur noch in Abhängigkeit technisch aufwendiger Experimente in Zustände ver-

setzt werden, die kaum mehr Extrapolationen im Rahmen der sich ausweitenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen zuließen. Weitreichende Zustandsbeschreibungen waren nicht mehr möglich. Vielmehr wurden die Meßoperationen beim Experimentieren als Operatoren in die Theorie aufgenommen. Mit dem Aufbau des Experiments wurde überhaupt erst festgelegt, welche Zustände möglich waren bzw. welche Eigenschaften die Atome haben konnten. Da es bei Meßoperationen, wie bei allen Handlungen, im allgemeinen auf die Reihenfolge ankommt, wurde dem atomaren Zustandsraum die nichtkommutative Struktur der Operatorenalgebra aufgeprägt: $\mathbf{qp} - \mathbf{pq} = i\hbar$. Diese Vertauschungsrelation bildet den theoretischen Kern der gesamten modernen Physik.

Im **Forschungsprogramm der neoklassischen Physik** geht es darum, die Prinzipien der klassischen Physik wiederzubeleben und auch die Mikrophysik in natürlicher Weise der Alltagsrationalität zugänglich zu machen. Nicht das Trennende zwischen klassischer und moderner Physik gilt es herauszuarbeiten, sondern das Gemeinsame wird im Vordergrund stehen. Folgende Parolen sollen als Richtlinien dienen, um zu sehen, wie weit die **klassischen Prinzipien** zwingend abgeschwächt werden müssen bzw. um zu prüfen, ob sie nicht vielleicht auch überzogen sind:

- Seinslehre statt Erkenntnistheorie!
- Realismus statt Positivismus!
- Objektivität statt Subjektivismus!
- Determinismus statt Wahrscheinlichkeit!
- Kausalität statt Zufälligkeit!
- Ordnung statt Chaos!

Wie weit das Festhalten bzw. Wiedererlangen der klassischen Prinzipien reichen wird, soll am Beispiel dreier Theorien näher ausgeführt werden: der Bohmschen Mechanik, der stochastischen Elektrodynamik und der Quantengravitation.

Unzufrieden mit dem Positivismus Bohrs und Heisenbergs geht es Bohm im Anschluß an die Einsteinsche Arbeit zur Unvollständigkeit der Quantenmechanik darum, die Quantentheorie wieder aus klassischen Prinzipien heraus zu verstehen. 1952 tritt er mit zwei Arbeiten hervor: **A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables, I and II**. Er beginnt mit den Worten: *The usual interpretation of the quantum theory is self-consistent, but it involves an assumption that cannot be tested experimentally, that the most complete possible specification of an individual system is in terms of a wavefunction that determines only probable results of actual measurement processes.* Demgegenüber stellt er in Aussicht, *that it is not necessary for us to give up a precise, rational, and objective description of individual systems at a quantum level of accuracy.* Seine physikalische Interpretation der Schrödingergleichung beginnt mit dem Ansatz:

$$\psi = Re \frac{iS}{\hbar}$$

Im Gegensatz zur komplexen Funktion ψ werden R und S als reel angenommen. Für die Wahrscheinlichkeitsdichte $P = R^2$ erhält er im Anschluß an Hamilton:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \vec{\nabla}(P\vec{v}) = 0$$

Das Geschwindigkeitsfeld \vec{v} folgt dabei aus dem Gradienten der Wirkungsfunktion S :

$$\vec{v} = \frac{1}{m} \vec{\nabla} S$$

Mit der Zusatzbedingung für den Impuls: $\vec{p} = \vec{\nabla} S$ und dem skalaren Potential $V(\vec{x})$ erhält Bohm folgende Newtonsche Bewegungsgleichung:

$$m \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = -\vec{\nabla} V(\vec{x}) - \frac{\hbar}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R}$$

Im Gegensatz zu Heisenberg nimmt Bohm die objektive Existenz der Teilchenbahnen $\vec{x}(t)$ an, die nicht erst dadurch entstünden, daß wir sie beobachteten. Die Statistik des Quantenpotentials ist nach Bohm lediglich die Konsequenz unserer Unkenntnis der genauen Anfangsbedingungen der Teilchenbahnen. Unter folgenden drei Annahmen folgt die Quantenmechanik aus der Bohmschen Mechanik:

- Die Wirkungswelle ψ genügt der Schrödingergleichung.
- Die Teilchenimpulse folgen dem Gradienten der Wirkungsfunktion: $\vec{p} = \vec{\nabla} S$.
- Das Teilchenensemble wird durch die Wahrscheinlichkeitsdichte $\psi^* \psi$ bestimmt.

Bohm hatte durch Herleitung einer Newtonschen Bewegungsgleichung für die Teilchenorte im Konfigurationsraum eine realistische Interpretation der Quantentheorie erreicht. Die Existenz des nichtlokalen Quantenpotentials allerdings blieb für Einstein weiterhin ein Stein des Anstoßes.

1964 griff Bell das Problem der quantenmechanischen Unvollständigkeit auf. In seiner Untersuchung **On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox** konnte er zeigen, daß jede Ergänzung der Quantentheorie um *lokale* verborgene Variable den statistischen Vorhersagen der Quantenmechanik widersprach. Für eine Realisierung des Einsteinschen Gedankenexperiments nahm er Spinmessungen an zwei von einander separierten Teilchen eines gemeinsamen Spin-Zustandes an. Als verborgene Variable setzte er einen beliebigen Parameter λ an, von dem die Resultate der Messungen A und B der Spin-Zustände $\sigma_1 \mathbf{a}$ und $\sigma_2 \mathbf{b}$ abhängen konnten: $A(\mathbf{a}, \lambda) = \pm 1$, $B(\mathbf{b}, \lambda) = \pm 1$. Als wesentliche Annahme setzte Bell die jeweilige statistische Unabhängigkeit der Meßergebnisse von A und B voraus. Mit der Wahrscheinlichkeitsdichte $\rho(\lambda)$ erhielt er für den Erwartungswert $P(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ des Produktes der beiden Spin-Komponenten $\sigma_1 \mathbf{a}$ und $\sigma_2 \mathbf{b}$:

$$P(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \int d\lambda \rho(\lambda) A(\mathbf{a}, \lambda) B(\mathbf{b}, \lambda)$$

Dieses allgemeine Resultat widersprach allerdings dem quantenmechanischen Erwartungswert:

$$\langle \sigma_1 \mathbf{a} \sigma_2 \mathbf{b} \rangle = -\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$$

Bzgl. vier verschiedener Spin-Orientierungen, die um jeweils $\pi/4$ verschoben angenommen wurden, kam folgende Form der berühmten Bellschen Ungleichung heraus:

$$|P(a, b) - P(a, b') + P(a', b) + P(a', b')| \leq 2$$

Seitdem erstmals 1982 die Gültigkeit der Quantenmechanik im Gegensatz zu einer Theorie mit *lokalen* verborgenen Parametern experimentell bestätigt werden konnte, galt Einstein als widerlegt und die Kopenhagener Deutung erhielt ungeheuren Auftrieb. Kaum jemand hatte allerdings zur Kenntnis genommen, daß Bells Ungleichung zwar eine Erweiterung der Quantenmechanik um *lokale* Parameter ausschloß, die nichtlokalen verborgenen Ortsvariablen der Bohmschen Mechanik aber unberührt ließ.

Für Realisten blieb die **Bohmsche Mechanik als Grundlage der Quantenmechanik** weiterhin attraktiv. Und so stellt Dürr in seinem gleichnamigen Lehrbuch *eine neue Theorie für die Bewegung von Teilchen auf, die in gewissem Sinne minimal ist, die die Galileische Raum-Zeit-Symmetrie respektiert und die die Newtonsche Mechanik als Näherung enthält. Die statistische Mechanik dieser Theorie liefert in idealisierten Situationen den quantenmechanischen Formalismus zur Beschreibung der statistischen Ausgänge von Experimenten*. Für ein N -Teilchensystem mit Massen m_k und Orten q_k im Konfigurationsraum gelten folgende Gleichungen:

$$\frac{dq_k}{dt} = \frac{\hbar}{m_k} \Im \frac{\vec{\nabla}_k \psi}{\psi}(q, t)$$

dq_k/dt bestimmt das Geschwindigkeitsfeld $v^\psi(q_k, t)$ und ψ gehorcht der Schrödingergleichung:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(q, t) = \sum \frac{\hbar^2}{2m_k} \Delta \psi(q, t) + V(q) \psi(q, t)$$

Mit dem Quantenfluß

$$\vec{j}_k^\psi = (\hbar/m_k) \Im \vec{\nabla}_k \psi$$

ergibt sich folgender Zusammenhang für das Geschwindigkeitsfeld:

$$\vec{v}^\psi = \vec{j}^\psi / \psi^* \psi$$

Unter der Annahme der *Äquivarianz* von Wahrscheinlichkeitsmaß und Geschwindigkeitsfeld formuliert Dürr die **Quantengleichgewichtshypothese**, nach der das Bornsche statistische Gesetz gilt: $\rho = \psi^* \psi$. In Analogie zur Boltzmann-Verteilung: $\rho \sim e^{-\beta \epsilon}$ ist die Bohmsche Mechanik eine statistische Mechanik zur Quantenmechanik. Für Dürr ist sie die minimale Vervollständigung der Schrödingerschen Theorie, die darin bestehe, *daß wir auch „Teilchen“ meinen, wenn wir „Teilchen“ sagen*.

Die Bohmsche Mechanik als statistische Mechanik der Quantenmechanik erfüllt alle Bedingungen, die an eine klassische Theorie zu stellen sind. Sie nimmt die reale Existenz von Teilchen an, denen in objektiver Weise Orte und Geschwindigkeiten, Massen und Ladungen, Impulse und Energien zugeordnet werden können. Damit ist die Bohmsche Mechanik eine realistische und objektive Seinslehre. Die Entwicklungsgleichungen für das Führungs- und Geschwindigkeitsfeld sind kausal und deterministisch. D.h. fixierte Anfangs- und Randbedingungen legen den zeitlichen Verlauf des Führungsfeldes und der Teilchenorte fest. Die Quantengleichgewichtshypothese trägt lediglich dem Umstand Rechnung, daß die Anfangs- und Randbedingungen für Mikroobjekte nicht beliebig genau angebar sind. Und in Analogie zur Boltzmannkonstanten k handelt es sich bei der Planckkonstanten h bloß um einen Skalierungsfaktor zwischen Mikro- und Makrophysik.

Warum hat sich die Bohmsche Einsicht bisher nicht durchsetzen können? Sie wurde im Ansatz bereits 1927 von de Broglie formuliert. Was machte die orthodoxe Quantenmechanik demgegenüber so attraktiv? Wirkten sich ähnlich wie auf die kritische Theorie die politischen Verhältnisse der Weimarer Republik auf das Theorienverständnis aus? War es die Komplementaritäts-Philosophie und vor allem die überragende Persönlichkeit Bohrs, die der Quantenmechanik ihren prägenden Stempel aufdrückte? Oder dominierten eher innerphysikalische Gründe die Ignoranz gegenüber Alternativen? Die Bohmsche Mechanik ist aufgrund ihrer Nichtlokalität nicht Lorentz-invariant. Das ist die orthodoxe Quantenmechanik auch nicht. Wie ist die Lokalität der QFT damit zu vereinbaren? Nach Mack ist die Nichtlokalität lediglich ein Definitionskriterium für *Emergenz*. D.h. nichtlokale Effekte sollen letztlich aus lokalen Wechselwirkungen im Rahmen einer verallgemeinerten Eichtheorie verstanden werden können. Das ist bisher noch Programm. Ebenso unvollendet ist der Versuch einer Vereinheitlichung von ART und QFT geblieben.

Bell und Goldstein haben wiederholt darauf hingewiesen, daß eine am Meßverfahren orientierte Theorie in der Kosmologie keinen Sinn mache. Vielmehr sei es gerade die objektiv-realistische Behandlung der Teilchenorte und des Führungsfeldes (q_k, ψ) innerhalb der Bohmschen Mechanik, die eine naheliegende Verbindung mit der ART erlaube, indem die Ortskoordinaten zur Metrik und das Bohmsche Führungsfeld zum Materiefeld verallgemeinert würden: $(g_{\mu\nu}, \Psi)$. In seiner Arbeit **Ontological clarity and the conceptual foundations of Quantum Gravity** formuliert Goldstein im Anschluß an das Verfahren der kanonischen Quantisierung einen ähnlichen Zusammenhang für die Metrik wie Dürr für die Orte:

$$\frac{dg_{ij}}{d\tau}(x^a) = G_{ijab} \mathfrak{S} \left(\frac{1}{\Psi(g)} \frac{\delta \Psi(g)}{\delta g_{ab}(x^a)} \right) N(x^a)$$

Die Wheeler-DeWitt-Gleichung der Quantenkosmologie bestimmt $\Psi(g)$ und übernimmt die Rolle der Schrödinger-Gleichung. G_{ijab} steht für die *Supermetrik*, die eine Funktion der Metrik ist. Und $N(x^a)$ bezeichnet die sogenannte Lückenfunktion, die von der Wahl der Hyperflächen-Schichtung abhängt. Ihre Eindeutigkeit ist noch ein offenes Problem. In der Quantengravitation wird die allgemein-relativistische Invarianz der vierdimensionalen Raumzeit durch eine zeitliche Schichtung dreidimensionaler Ortsräume dargestellt. Analog

zur lokalen Annäherung des gekrümmten Riemannschen Raumes durch den Minkowski-Raum in der ART kann die Hyperflächen-Schichtung der Quantengravitation durch eine *Relativzeit-Invarianz* der Bohrschen Mechanik für den Labormaßstab angenähert werden. Wie Bell in Verbindung mit der Frage **Are there quantum jumps?** hervorhebt, ist die Relativzeit-Invarianz als Näherung der Lorentz-Invarianz im Rahmen einer nichtrelativistischen Theorie auffaßbar. Zudem könnten, wie beim Konzept der Symmetriebrüche im Standard-Modell, die abgeschwächten Raumzeit-Invarianzen als Symmetriebrüche im Rahmen der Quantengravitation verstanden werden.

Die orthodoxe Quantenmechanik ist auf die experimentelle Situation im Labor zugeschnitten. Dieser im Vergleich mit der Kosmologie eher bescheidene Anspruch ist der Hauptgrund für die instrumentalistische Sichtweise und die positivistische Philosophie. Entsprechend wird die Wellenfunktion nicht als Wirkungs- oder Führungsfeld angesehen, sondern lediglich als Wissensreservoir oder Information interpretiert. Die durch das Wahrscheinlichkeitsmaß beschriebene Zufälligkeit der Grundvorgänge beim radioaktiven Zerfall wie bei der spontanen Emission von Lichtquanten wird dem Meßeingriff in Verbindung mit der experimentellen Situation zugeschrieben. Demgegenüber sehen die Physiker mit objektiver Sichtweise und realistischer Philosophie den Grund der Zufälligkeit in den Naturvorgängen selbst. Sie unterstellen eine objektive **Existenz stochastischer Prozesse**. Eine Zwischenposition nimmt die Ensemble-Interpretation der Wahrscheinlichkeit in der statistischen Mechanik ein. Man gerät allerdings in Schwierigkeiten, wenn man sie auf das Universum als Ganzes anzuwenden versucht. Alternative Quantentheorien auf der Basis stochastischer Prozesse wurden bereits Ende der 1920er Jahre vorgeschlagen. Versuche einer klassischen Alternative zur QED werden unter dem Titel **stochastische Elektrodynamik** (SED) verfolgt. Als Ursache der stochastischen Prozesse werden die reale Existenz der ZPE und des ZPF angesehen. In der QED dagegen ist die ZPE lediglich das Reservoir *virtueller* Quanten im Rahmen der Unbestimmtheitsrelationen.

Die SED geht aus von der Planckschen Entdeckung der ZPE bei der Analyse seiner Strahlungsformel. Danach setzt sich die spektrale Energiedichte $\rho(\omega, T)$ zusammen aus dem Produkt $N(\omega)$ der Zahl der Eigenschwingungen im Einheitsvolumen und der mittleren Energie $E(\omega, T)$ der Feldoszillatoren der Frequenz ω . Mit $N(\omega) = \omega^2/\pi^2 c^3$ und $E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$ folgt für $\rho_0 = \rho(\omega, 0)$:

$$\rho_0(\omega) = \frac{\hbar\omega^3}{2\pi^2 c^3}$$

Damit ist die Planckkonstante als Intensitätsmaß für die Fluktuationen des ZPF eingeführt worden. Ähnlich wie die Boltzmannkonstante als Intensitätsmaß für die Wärmeschwankungen angesehen werden kann. Als Zufallsvariablen des ZPF erweisen sich die Amplituden $a_{\mathbf{k}\lambda}$, $a_{\mathbf{k}\lambda}^*$, z.B. in der Entwicklung des Vektorpotentials $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t)$ nach ebenen Wellen im Volumen V :

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = c \sum_{\mathbf{k}\lambda} \sqrt{\frac{\pi\hbar}{\omega_k V}} \mathbf{e}_{\mathbf{k}}^\lambda \left(a_{\mathbf{k}\lambda} e^{-i\omega_k t + i\mathbf{k}\mathbf{x}} + a_{\mathbf{k}\lambda}^* e^{i\omega_k t - i\mathbf{k}\mathbf{x}} \right)$$

\mathbf{k} meint den Wellenvektor und λ den Polarisationsindex. Für die Amplituden gilt natürlich

im Mittel: $\langle a_{\mathbf{k}\lambda} a_{\mathbf{k}\lambda}^* \rangle = 1$. Werden die Untersuchungen des ZPF auf das thermische Gleichgewicht des Strahlungsfeldes ausgedehnt, ergibt sich auch das Verteilungsgesetz $\langle n_i \rangle_B$ der Bosestatistik. Und zwar ohne die Existenzannahme diskreter Lichtquanten. Denn beim ZPF handelt es sich im Prinzip um ein kontinuierliches Maxwellfeld, dessen Amplituden eine Zufallsmenge bilden.

Zudem werden die Einsteinschen Übergangswahrscheinlichkeiten bei der Absorption sowie der spontanen und induzierten Emission als ZPF-Effekte verständlich. Auch Streuungseffekte wie der Compton-Effekt sind ohne Quantisierungsannahmen berechenbar. Und als Umgebungseffekte des ZPF erweisen sich der Casimir-Effekt, die Van der Waals – Kräfte und der Unruh-Effekt. Last but not least läßt sich die träge Masse aus der Gegenwirkung des ZPF beim Beschleunigen von Objekten verstehen. Aufgrund des Äquivalenzprinzips wäre die Masse damit schlechthin auf ZPE zurückgeführt. Der Clou dabei ist die instantane Allgegenwart des Vakuums. Da das ZPF Lorentz-invariant ist, scheint der Einsteinsche Traum von einer lokalen *und* realistischen Theorie verwirklicht zu sein. Auch die Annahme der statistischen Unabhängigkeit als Voraussetzung der Bellschen Ungleichung erscheint im Rahmen der SED nicht mehr zwingend.

Schwierigkeiten ergeben sich allerdings mit der Anzahl der Eigenschwingungen im ZPF, die jeweils den Energiebeitrag von $\frac{1}{2}\hbar\omega$ enthalten und im Prinzip mit beliebig hoher Frequenz auftreten können. D.h. die Gesamtenergie des Vakuums strebte gegen unendlich und als Beitrag zum Einsteinschen Energie-Impuls-Tensor wäre die Auswirkung auf die Raumkrümmung so groß, daß das Universum sofort im Unendlichen verschwände. Trägt das ZPF also überhaupt zur Gravitation bei? Wo läge die *cutoff* – Frequenz einer sinnvollen Theorie? Bei der Planckfrequenz ω_P oder eher bei der Comptonfrequenz ω_C ? Fairerweise muß angemerkt werden, daß Divergenzprobleme auch in der QED auftreten. Dort sind ausgeklügelte *Renormierungsverfahren* entwickelt worden, um die Ergebnisse der Theorie mit den prinzipiell immer endlichen Resultaten der Experimente vergleichen zu können. Warum das mit einer unglaublichen Genauigkeit von bis zu 12 Stellen gelingt, ist noch weitgehend unverstanden. In der SED tritt weiterhin das Problem auf, schon beim Verständnis eines so einfachen Systems wie dem Wasserstoffatom zu scheitern; denn das *isolierte* H-Atom ist innerhalb der SED instabil. Da isolierte Betrachtungen einzelner Atome allerdings höchst künstlich sind, hat das Scheitern eher Erkenntniswert. Zudem weisen astronomische Untersuchungen darauf hin, daß freie H-Atome im All in der Tat nicht stabil sind. Die jeweilige Umgebung scheint also wesentlich zur Stabilität beizutragen. Der in den instantanen Quantenkorrelationen aufscheinende Holismus könnte in der realen Existenz des ZPF seine Erklärung finden. Es sind noch bei weitem nicht alle Ergebnisse der QED in der SED nachvollzogen worden. Insbesondere bei nichtlinearen Effekten höherer Ordnung versagt die SED. De la Pena und Cetto weisen in ihrem Buch **The Quantum Dice** im Ausblick darauf hin, daß die SED letztlich zu einer schon im Ansatz nichtlinearen Theorie komplexer Systeme erweitert werden müßte.

Die Ansicht, daß kontinuierliche Felder in Verbindung mit dem Atomismus nur jeweils genäherte Mittelwerte über endliche Volumina sein können, vertrat schon Einstein. Und

bereits 1924 nahm er die Existenz zufälliger Fluktuationen des metrischen Tensors an, um die Beschreibung eines wirklichen, allgegenwärtigen Materiefeldes zu ermöglichen. Dabei galt ihm jegliches Indiz für Zufälligkeit als Anzeichen einer statistisch-näherungsweise Beschreibung der exakt-geordneten Grundvorgänge. Nicht nur die ART, sondern auch die QFT sind demnach lediglich *effektive* Theorien auf mittlerem Beschreibungsniveau. Die Mehrzahl der Theoretiker nimmt Quantenfluktuationen auch auf dem Niveau der Plancklänge an:

$$l_P = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \sim 10^{-35} \text{ m}$$

Objektiv-stochastische Theorien des Universums werden von Sidharth aus den **Fluctuations in the Quantum Vacuum** entwickelt sowie im Rahmen einer allgemeinen **Prozessphysik** aus den Iterationen eines selbstbezüglichen Rauschens (SRN) zu formulieren versucht. Danach sind Ordnungsstrukturen im Kosmos die seltenen Ausnahmen und von flüchtiger Vergänglichkeit. Diese Weltansicht wird in verblüffender Weise gestützt durch Einsichten der Zahlentheorie. Die Berechnung der Haltewahrscheinlichkeit einer universalen Turing-Maschine hat nämlich gezeigt, daß sie gleichbedeutend mit reinem Zufall ist, also nicht vom idealen Münzwurf unterschieden werden kann. Beweise sind die höchst seltene Ausnahme, Wahrheiten ohne Gründe, Ereignisse ohne Ursache der astronomisch häufige Regelfall.

Zu den Ausnahmen unter den Physikern, die nach wie vor eine realistisch-deterministische Beschreibung des Universums im Rahmen einer vereinheitlichten Theorie der **Quantengravitation** für möglich halten, gehört 't Hooft. In seinem populären Buch **In search of the ultimate building blocks** hebt er hervor: *The history books say that Bohr has proved Einstein wrong. But others, including myself, suspect that in the long run, the Einsteinian view might return.* Unterdessen ist er mit mehreren Arbeiten hervorgetreten, in denen er die Quantengravitation als dissipativ deterministisches System untersucht. Er schreibt: *A theory is developed that will not postulate the quantum states as being its central starting point, but rather classical deterministic degrees of freedom. Quantum states, being mere mathematical devices enabling physicists to make statistical predictions, will turn out to be derived concepts, with a not strictly locally formulated definition.* Und ganz im Sinne Einsteins, Chaos aus einer unterliegenden Schicht der Ordnung zu erklären, formuliert 't Hooft die Perspektive: *It may still be possible that the quantum mechanical nature of the phenomenological laws of nature at the atomic scale can be attributed to an underlying law that is deterministic at the Planck scale but with chaotic effects at all larger scales.*

5 Ausblick

Nach den vielen erfolglosen Versuchen, ART und OFT im Rahmen einer Theorie der Quantengravitation zu vereinigen, stellt sich die Frage, ob es nicht an der Zeit ist, wieder das Geometrisierungsprinzip als grundlegend anzusehen und die Quantisierungsvorschrift

lediglich als nachgeordnete Statistik zu ergänzen. Jedenfalls ist das Urteil über ein Versagen der klassischen Physik und ihrer Prinzipien mit Blick auf eine vereinheitlichte Theorie aller Wechselwirkungen vielleicht voreilig gewesen. Die Zukunft mag erweisen, wie viele Mitstreiter 't Hooft für die Ausgestaltung seines Forschungsprogramms wird gewinnen können. Womöglich wird das 21. Jahrhundert einst als die Renaissance der klassischen Physik in die Annalen der Wissenschaftsgeschichte eingehen. Warten wir es ab und halten die Augen offen für Alternativen zur Orthodoxie!

6 Literatur

1. A. Afriat, F. Sellerie, The Einstein, Podolsky and Rosen paradox, New York 1999
2. J.S. Bell, Speakable and unspeakable in quantum mechanics, Cambridge 1993
3. R.T. Cahill, Process Physics, arXiv: gr-qc/0009023
4. T.Y. Cao, Concept. development of the 20th cent. field theories, Cambridge 1998
5. L. de la Pena, A.M. Cetto, The quantum dice, Dortrecht 1996
6. D. Dürr, Bohmsche Mechanik als Grundlage der Quantenmechanik, Berlin 2001
7. R. Feynman, Elementary Particles and the Laws of Physics, Cambridge 1999
8. S. Goldstein, Quantum spacetime without observers, arXiv: quant-ph/9902018
9. T. Jacobson, Thermodynamics of Spacetime, arXiv: gr-qc/9504004
10. H. Lyre, Zur Wissenschaftstheorie moderner Eichfeldtheorien, Bielefeld 2000
11. G. Mack, Universal Dynamics, Hamburg 2000
12. P.W. Milonni, The quantum vacuum, San Diego 1994
13. A. Pais, Raffiniert ist der Herrgott, Braunschweig 1986
14. L. O’Raifeartaigh, Gauge Theory, Rev. Mod. Phys., Vol.72, No.1, 2000
15. H.H. Sallhofer, Sackgasse Quantenphysik, München 2000
16. R. Schulman, The Collected Papers of Albert Einstein, Princeton 1987ff
17. B.G. Sidharth, The Chaotic Universe, New York 2001
18. G. ‘t Hooft, In search of the ultimate building blocks, Cambridge 1997
19. G. ‘t Hooft, Quantum Mechanics and Determinism, arXiv: hep-ht/0105105
20. G. ‘t Hooft, Determinism and Dissipation in Quantum Gravity, arXiv: hep-ht/0003005

21. H. Weil, Raum, Zeit, Materie, Berlin 1970
22. S. Weinberg, Gravitation and cosmology, New York 1972
23. S. Weinberg, The quantum theory of fields, Cambridge 1995ff
24. J.A. Wheeler, W.H. Zurek, Quantum Theory and Measurement, Princeton 1983