

Zum Stand der Elementarteilchen- und geometrisierten Physik

I. von Ludwiger

1. Die Wechselwirkungsfelder und Massen der Elementarteilchen im Standard-Modell der Teilchenphysik

Das große Ziel der Physiker ist es, die Existenz der Wechselwirkungsfelder und deren - Konstanten sowie die Ursache und Entstehung materieller Teilchen mit ihren verschiedenen Massen im Universum aus einfachsten Ursachen zu verstehen. Noch vor 50 Jahren, als durch Streuexperimente immer neue Elementarteilchen entdeckt worden waren, sah jeder Versuch, Teilchen einheitlich zu beschreiben, hoffnungslos aus. Murray Gell-Mann und George Zweig brachten zunächst eine Ordnung in den Teilchenzoo, indem sie die Eigenschaften der entdeckten Teilchen auf die noch elementarerer Bauteile in ihnen zurückführten. Dieses Standardmodell kommt dem Traum einer einheitlichen Beschreibung der Elementarteilchen bereits sehr nahe.

Bereits die anomalen magnetischen Momente von Protonen und Neutronen ließen darauf schließen, dass diese aus noch kleineren Bausteinen aufgebaut sein müssen. Schließlich wurde 1969 bei Streuexperimenten entdeckt, dass sich im Proton drei Streuzentren befinden müssen (Diese Partonen haben nur ein Tausendstel der Größe des Protons). Das konnten die drei sog. Quarks der neuen Theorie sein, die jeweils einen Spin $\frac{1}{2}$ und drei unterschiedliche neuartige Ladungszustände (sog. Farbladungen) tragen, weil Hadronen aus Symmetriegründen (SU_3) ladungsneutral sein müssen. Die Bestätigung der Existenz von drei Farbladungen ergab sich 1971 aus der Interpretation des Zerfalls des neutralen π -Mesons, das durch elektromagnetische Wechselwirkung in zwei Photonen zerfällt. (Die kürzere Lebensdauer des Pi-Mesons läßt sich bei drei Farbladungen verstehen (Adler 1970)).

Abgesehen von der Farbladung muß es drei elementare elektrische Ladungsanteile der Quarks geben (als up (u) und down (d) bezeichnet) Q_u und Q_d , damit aus je drei Quarks neutrale und geladene Teilchen kombiniert werden können. In Mesonen befinden sich je ein Quark und ein Antiquark, in Baryonen drei Quarks (mit verschiedener Farbladung). Damit läßt sich auch die Isospinsymmetrie erfüllen. Elektronen e und Neutrinos ν_e scheinen keine inneren Strukturen zu haben.

Zu jedem dieser vier Teilchen und ihren Antiteilchen gibt es noch zwei weitere sehr ähnliche aber schwerere Teilchen. Sechs Quarksorten u, d, s (strange), c (charm), t (top), b (bottom) jeweils in drei Farbladungen stehen sechs Leptonen e , ν_e , μ (Myon), ν_μ , τ (Tau-Lepton), ν_τ mit Spin $\frac{1}{2}$ gegenüber. Mit diesen drei Generationen elementarer Bausteine lassen sich sämtliche Elementarteilchen aufbauen. Die Quark-Sorten besitzen verschiedene Massen jedoch keine innere Struktur und werden als punktförmig angesehen. Nach der Entdeckung des schweren Quarks Q_c und seiner gebundenen Zustände, sowie von Messungen der Gruppen von Teilchen-Schauern nach tief unelastischen Elektron-Proton-Streuungen, besteht kein Zweifel mehr an der Existenz von Quarks.

Dass die Quarks trotz ihrer Farbladung zusammen halten, wird mit einer Bindung durch Gluonen-Teilchen erklärt. Die Bindungskraft wird umso größer, je größer der Abstand zwischen den Quarks ist. Diese Kräfte verhindern, dass Quarks aus Teilchen befreit werden können. Gluonen sind ebenfalls nicht aus Teilchen zu isolieren. Doch schließt man indirekt auf deren Existenz, weil beispielsweise bei Anihilations-Experimenten von Elektronen und

Positronen drei Schwärme aus Mesonen entstehen, die durch Bildung eines Quark-Antiquark-Paares und eines Gluons erklärt werden können.

Mitte der 80er Jahre des vergangenen Jahrhunderts wurde im Rahmen von Experimenten der European Muon Collaboration bei CERN entdeckt, dass die Quarks nur zu 20% zum Spin des Protons beitragen. Das bedeutet, dass das Modell von einem Proton, das aus drei Quarks besteht, viel zu einfach ist, und dass das Proton wahrscheinlich ein komplexer dynamischer Vielteilchenzustand ist, dessen Eigenschaften (wie der Spin) wesentlich von Quantenfluktuationen des Vakuums, das ein Proton umgibt, bestimmt werden.

In der Quantenphysik des Standardmodells läßt sich die Form irgendwelcher Wechselwirkungen aus Symmetrieforderungen herleiten. Will man beispielsweise die Ladungserhaltung eines Elektrons verstehen, kann man nicht die Maxwellsche Theorie anwenden, da sich diese nur auf das elektromagnetische Feld, nicht aber auf Teilchen anwenden läßt. Statt dessen wird die Quantentheorie der elektromagnetischen Wechselwirkung verwendet. Quantenmechanisch wird jedes Objekt durch eine Wellenfunktion beschrieben. Unter einer beliebigen Änderung der Phase der Wellenfunktion sollen sich physikalische Vorhersagen nicht ändern. Im elektromagnetischen Fall werden die freien Teilchen durch die Dirac-Gleichung angegeben. Durch Hinzufügen eines Terms wird die elektromagnetische Wechselwirkung beschrieben. Durch diese Transformation wird die elektromagnetische Wechselwirkung auf die Forderung der Gültigkeit dieser Symmetrie (Eichsymmetrie) reduziert. Formal werden die Elemente der Gruppe der unitären Matrizen mit der Dimension eins (U_1) auf die Wellenfunktion der Spin $\frac{1}{2}$ - Teilchen angewendet. Die Invarianzforderung gegenüber Phasen-Eichtransformationen kann nur erfüllt werden, wenn zum Feld des Elektrons ein weiteres, das elektromagnetische Feld bzw. das diesem entsprechende Photon (mit Spin = 1) eingeführt wird.

Das Postulat der Eichsymmetrie ermöglicht auch die Herleitung der Formen der schwachen und der starken Wechselwirkungen. An die Stelle elektrischer Ladungen im elektromagnetischen Feld treten bei der starken Wechselwirkung die Farben der drei Quarks und die Eichgruppe SU_3 (spezielle Gruppe der unitären 3×3 Matrizen mit der Determinante eins).

Die acht Gluonen, masselose Quanten der starken Wechselwirkung (mit Spin = 1), tragen Farb- bzw. Antifarbladungen und können daher auch miteinander stark wechselwirken. Die Farbkraft der Gluonen kompensieren sich in Hadronen und können auf diese nur indirekt über Polarisierungseffekte wirken.

Die schwache Wechselwirkung läßt sich ebenfalls auf eine Eichsymmetrie zurückführen (Eichgruppe SU_2), wobei wegen der drei Generatoren der Gruppe drei Feldquanten der Wechselwirkung (mit Spin = 1) auftreten, welche die Ladung +1, -1 (W-Bosonen) und 0 (Z-Boson) tragen. Die geladenen Bosonen werden beim β -Zerfall ausgetauscht.

Im Fall der neutralen Bosonen muß die Invarianz unter der Produktgruppe $U_1 \times SU_2$, also der gemeinsamen elektro-schwachen Wechselwirkung betrachtet werden. Die beiden elektrisch neutralen Feldquanten dieser Produktgruppe treten nur als quantenmechanische Linearkombinationen in Erscheinung. Das Photon ist hier eine Mischung aus Ur-Photon γ_0 und dem neutralen W^0 -Boson. Diese Mischung liefert entweder das beobachtete Photon oder das erwartete Z^0 -Boson. Während das Photon γ mit elektrisch geladenen Teilchen wechselwirkt, vermittelt das Z^0 -Teilchen Wechselwirkungen zwischen schwachen Ladungen

(der Händigkeiten), wie sie beispielsweise Neutrinos tragen. Die Linearkombination wird durch den Weinbergschen Mischungswinkel Θ_W beschrieben, den man aus den Teilchenbahnen bei hochenergetischen Neutrino-Reaktionen bestimmen kann. W-Bosonen verwandeln ein Elektron in ein Neutrino oder umgekehrt. Da W- und Z-Bosonen miteinander wechselwirken können, wird der Anstieg des Wirkungsquerschnitts der Reaktion $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ mit zunehmender Energie gedämpft. Dieser Effekt wurde durch Messungen am CERN bestätigt.

Die Herleitung der elektro-schwachen Feldquanten aus der Forderung nach Eichsymmetrie gelingt nur, wenn den Wechselwirkungsquanten - im Gegensatz zur elektromagnetischen und starken Wechselwirkung - je eine Masse zugeordnet wird. Diese Massen sollen die W und Z-Bosonen durch Wechselwirkung mit einem universalen Higgs-Feld erhalten, welches ebenfalls ein Feldquant, das Higgs-Teilchen besitzt (Glashow-Salam-Weinberg-Theorie).

Die Massen der W- und Z-Bosonen lassen sich wegen der Verknüpfung der beiden Eichsymmetrien für die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung aus dem Weinberg-Winkel und den Kopplungskonstanten dieser Felder berechnen. Die entsprechenden Massen wurden 1983 am CERN nachgewiesen.

Eine Vorhersage der Massen der Quarks und der Leptonen ist nicht möglich. Das Higgs-Teilchen wurde noch nicht gefunden. (Es wird angenommen, dass dieses eine Masse von mehr als 100 GeV besitzt und daher erst mit leistungsfähigeren Beschleunigern, wie den LHC oder das Tevatron am FNAL, zu finden sein wird). Wegen der Entdeckung der Umwandlung der Neutrinos in verschiedene Sorten (e-, μ -, τ - Neutrinos), müssen diese eine sehr geringe Masse (unterhalb 0,02 eV) besitzen.

Das Standardmodell hat Ordnung in den Teilchenzoo gebracht und eine Erklärung für die Wechselwirkungen unter den Teilchen geliefert. Aber es enthält noch etwa 30 Parameter bzw. Naturkonstanten, die innerhalb des Modells nicht berechnet werden können, beispielsweise sämtliche Massen der elementaren Fermionen und deren Ursprung. Das Problem der Berechnung der Massen bleibt selbst dann bestehen, wenn die Higgs-Teilchen entdeckt worden sind. Auch die Frage, warum es ausgerechnet drei Generationen von Elementarteilchen gibt, bleibt offen.

Beobachtungen in Neutrino-Experimenten am FNAL im Oktober 2001 ergaben wesentliche Abweichungen vom Standardmodell gerade für ein besonders genau voraus berechnetes Verhalten von Neutrinos. Das Verhältnis von durch Neutrinos bei Target-Kollisionen (Z-Bosonen) erzeugten Myonen zu gestreuten Neutrinos, was durch $\sin^2\Theta_W$ angegeben wird, ergab anstatt den außerordentlich genau bestimmten theoretischen Wert 0,2227 einen gemessenen Wert von 0,2277. Das sind 3 Standard-Abweichungen Differenz und damit hoch signifikant. Das Ergebnis weist darauf hin, dass sich Neutrinos anders verhalten als andere fundamentale Teilchen.

Die Länge, bei der die SU_5 - Symmetrie exakt erhalten ist ($\sim 10^{-29}$ cm), liegt bereits im Größenbereich der Planck'schen Länge $\sim 10^{-32}$ cm, bei welcher die Gravitation ebenso stark ist wie alle übrigen Kräfte. Die lokale Poincaré-Invarianz bedingt eine Symmetrie $SO(1,4)$, welche zu den Aussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) führt. Wenn der Spin mit der Raum-Zeit verknüpft werden soll, müssen die Naturgesetze darüber hinaus auch noch gegen eine weitere Symmetriegruppe invariant sein. Das führt auf eine Supersymmetrie, die

sich als eine Translation in der quantenmechanisch erweiterten Form der Raum-Zeit verstehen läßt. Diese Eichtheorie der Supersymmetrie führt Teilchen mit unterschiedlichen Spins, d.h. Fermionen und Bosonen durch Supersymmetrie-Rotationen im Superraum ineinander über. Um eine lokale Supersymmetrie zu bekommen, muß ein Eichfeld für jede der in einer Gleichung auftretenden Symmetrien eingeführt werden. Wiederholte Anwendung der Fermion-Boson-Transformation bewegt ein Teilchen von einem Punkt der Raum-Zeit zu einem anderen und entspricht einer Poincaré-Transformation, für die das Eichteilchen das Spin-2-Boson das Austauschteilchen der Gravitation ist. Diese Supergravitation beschreibt die ART in der Sprache der Quantentheorie, also durch einen Austausch von Quanten. Die ART wird in den Superraum umgeschrieben, d.h. in eine Riemannsche Geometrie in einer 8-dimensionalen Mannigfaltigkeit mit Graßmann-Koordinaten.

Je nach Anzahl der Boson-Fermion-Transformationen werden unterschiedlich viele Skalar-Teilchen, Fermionen, Bosonen und Gravitinos (mit Spin $3/2$) neben einem Graviton vorhergesagt. Die vorteilhafteste Dimension für die Theorie mit 8-facher Transformation ist 11. Bosonen und Fermionen treten immer paarweise auf, wobei sich die Superpartner jeweils um den Spin $1/2$ voneinander unterscheiden. Solche Massen wurden bisher nicht gefunden. Doch der wesentliche Vorteil dieser Theorie ist die Möglichkeit der Renormierung des Gravitationsfeldes.

Das zentrale Dogma der Eichtheorie besteht in folgenden Annahmen: Alle fundamentalen Wechselwirkungen sind Eich-Wechselwirkungen, Eichsymmetrien können nur spontan gebrochen werden und exakte Symmetrien sind immer lokal. Aus der Art der Wechselwirkung kann auf die Massen und deren unterschiedliche Eigenschaften geschlossen werden. Die Eichtheorien verbinden Symmetrie-Strukturen miteinander, reduzieren jedoch die fundamentalen Bausteine nicht, sondern fordern im Gegenteil noch viele weitere.

Alle Eichtheorien sehen in Quarks und Leptonen strukturlose Punktteilchen, obwohl deren deBroglie-Wellenlänge eine definierte Reichweite besitzt (die des Elektrons beispielsweise 10^{-8} cm). Allein das diese umgebende Feld erteilt den „Punkten“ physikalische Eigenschaften. Die hohen Feldstärken in deren Umgebung erzeugen aufgrund der Unschärferelation virtuelle Teilchenpaare extrem kurzer Lebensdauer, die ihrerseits die Feldstärke nicht unendlich werden lassen und deren Ausrichtung zur Quelle hin eine Vakuumpolarisation bewirken.

In der Quantenelektrodynamik (QED) wird die Wechselwirkung eines Elektrons mit einem äußeren Feld durch die Dirac-Gleichung beschrieben. Die Lösungsmöglichkeit besteht in einer störungstheoretischen Entwicklung nach der Sommerfeldschen Kopplungskonstante, wobei die höheren Näherungen divergieren. Durch das Verfahren der Massen- bzw. Ladungs-Renormalisierung werden Unendlichkeitsstellen umgangen. Das Fehlen einer begrifflichen Klärung der QED bleibt aber ein prinzipieller Mangel dieser Theorie und ist eine Konsequenz des sehr naiven Bilds vom Elektron. Trotzdem liefert die QED die genauesten Vorhersagen für Experimente und steht in völliger Übereinstimmung mit Meßergebnissen. Die Erfolge der QED waren der Grund dafür, auch alle anderen physikalischen Felder in eine renormierbare Darstellung zu bringen. Mit der Quantenchromodynamik (QCD) entstand eine renormierbare Eichtheorie der starken Wechselwirkung, die den Formalismus der QED verwendet.

Die Gravitation kann allerdings nicht auf diese Weise renormierbar gemacht werden. (Denn in der ART ist die Energie nicht mehr allgemein lokalisierbar, da die Energiedefinition an die Benutzung von Längenkoordinaten gebunden ist und mit der Nichtlokalisierbarkeit auch die Substanzialisierung der Energie fällt. Alle Versuche, einen lokalisierbaren Energiebegriff zu finden, scheiterten bisher. Daraus folgt, dass der Energiebegriff nicht von

speziellen Koordinaten abhängen, sondern durch spezielle geometrische Strukturen selbst ausgedrückt werden sollte).

QED und QCD können nur Übergangslösungen sein, bis ein vernünftigeres Bild materieller Letzteinheiten gefunden sein wird. Denn Leptonen und Quarks verlieren trotz ihrer heute allgemein akzeptierten Ausdehnungslosigkeit an Wahrscheinlichkeit, Basisteilchen der Natur zu sein. Vielleicht deutet die „Punktförmigkeit“ darauf hin, dass unterhalb der Quantenwelt unser Raum-Zeit-Konzept einer grundlegenden Korrektur bedarf (Lanius 1981). Zentren von Wechselwirkungen können nicht wirklich Punkte sein, sie müssen zumindest befähigt sein, Eigenschaften zu tragen. Das aber setzt ausgedehnte Strukturen voraus.

Die ART beschreibt weitreichende Felder und global verteilte Materie durch die Geometrie der Raumzeit. Sollen auch Gravitationsfelder einzelner Teilchen geometrisiert werden, oder das Verhalten starker Gravitationsfelder in kleinsten Raumbereichen (um Singularitäten) untersucht werden, so müssen die experimentell gewonnenen Erkenntnisse und deren theoretisches Verständnis durch die Quantentheorie berücksichtigt werden. Während in der ART die Raumzeit unserer Erfahrung die Arena ist, gibt es in der Quantenmechanik keine Punkte und von ihnen aufgespannte anschauliche Räume. Zur Beschreibung der Teilchenzustände werden stattdessen Wahrscheinlichkeitsamplituden verwendet, die in einem fiktiven, unendlich-dimensionalen komplexen Kontinuum des Hilbert-Raumes definiert werden. Die Raumzeit entspricht dem klassischen Bild, das wir uns von der Welt machen. Doch die Teilchenphysik ist auf die Beschreibung der Zustände im Hilbert-Raum angewiesen. Die Unmöglichkeit, physikalisch beobachtbare Größen gleichzeitig genau zu bestimmen und damit eindeutige Vorhersagen für das künftige Verhalten zu machen, führt dazu, dass das Konzept von Punkten in der Geometrie aufgegeben werden muß. Der Gegenwartspunkt des Lichtkegels der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) ist in Raum und Zeit verschmiert.

Wenn Energie, Impuls und Aufenthaltsorte in kleinen Bereichen unbestimmt sind, müßte die ART erst halb-klassisch für kleine Raumbereiche präpariert werden. Es müssen ganz neue Geometrien als die Riemannsche entwickelt werden. In der Twistor-Theorie von Penrose (1975) (Hughston und Ward 1979) treten beispielsweise keine Punkte mehr auf. Jedem Lichtkegel wird ein System von Twistoren zugeordnet, wobei die Geodäten an den Nullkegel fixiert bleiben. (Da die Richtung eines Nullvektors oder einer Geodäten in einen gekrümmten Raum verdrillt (twisted) sein können, heißen die Elemente Twistoren). Twistoren werden interpretiert als Objekte in einem komplexen 3-dimensionalen Minkowski-Raum, in dem alle Punkte durch 3 reelle und 3 imaginäre Koordinaten definiert werden. Die Dreidimensionalität des Raumes und die Notwendigkeit der komplexen Zahlen als Ausdruck für die Wahrscheinlichkeits-Amplituden sind durch den lokalen Isomorphismus, d.h. durch die umkehrbar eindeutige Abbildung der Gruppe aller unitären Spin-Matrizen, der Isospin-Gruppe SU_2 , auf die dreidimensionale Drehgruppe, der Lorenzgruppe SO_3 , gegeben. Es besteht also eine Korrespondenz zwischen der Raumzeit-Geometrie der Relativität und der holomorphen (komplex analytischen) Geometrie. Der Kontinuumsbegriff wird eliminiert und durch kombinatorische Prozesse und Zahlen ersetzt. Penrose (1971) entwickelt eine Theorie der Spin-Netze, in welcher die Welt durch Kombinationen von Netzen aufgebaut wird, wobei jeder Linienabschnitt ein Objekt mit dem Gesamtdrehimpuls $n/2 \hbar$ darstellt (darin numeriert n die als Weltlinien von Teilchen aufgefaßten Linienelemente).

Die Idee der Spin-Netz-Modelle von Penrose wurde zu Spin-Schaum-Modellen weiterentwickelt, mit denen die Mikrostruktur der Raumzeit beschrieben werden kann. Die

ersten solcher Modelle bauten auf gewissen Vorhersagen aus der Schleifen-Quanten-Gravitation (LQG) auf, also der Quantisierung der ART, d.h. der Quantengeometrie im Planckschen Bereich (Reisenberger 1997, Baez 1998). Eines der wichtigsten Ergebnisse der LQG ist, dass die Quantenoperation für räumliche Gebiete diskrete Spektren aufweisen (Thiemann 2001; Rovelli & Smollin 1995). Die diskreten Modelle der Raumzeit im Planckschen Bereich mit Spin-Schäumen werden als aussichtsreiche Kandidaten für eine Quantentheorie der Gravitation angesehen.

Im Rahmen der Quantengravitation wurden verschiedene Modelle vorgeschlagen: String-Netze (Markopoulou & Loll 1998; Perez & Rovelli 2001a), eine Euklidische ART (Barrett & Crane 1998; Perez & Rovelli 2001b) und eine topologische Quantenfeldtheorie (Baez 2000; Oriti 2001).

Die Spin-Schaum-Modelle ergeben sich auf natürliche Weise als höher-dimensionale Analogien zu Feynman-Diagrammen in der Quantengravitation und anderen Eichtheorien, sowohl im Kontinuum als auch in der Gitter-Eichtheorie. Die Modelle arbeiten mit Summen über irreguläre Hintergrund-unabhängige Gitter. Jede solche Theorie besteht aus einer Regel zur Berechnung der Amplituden von Spin-Schaum-Vertices, Faces (Stirnflächen) und Rändern. Das Produkt dieser Amplituden liefert die Amplitude für den Spin-Schaum, und die Übertragungs-Amplitude zwischen Spin-Netzen wird durch die Summe über die Spin-Schäume gegeben. Analog zu Feynman-Diagrammen können die Rand- und Face-Amplituden als „Propagatoren“ aufgefaßt werden und die Spin-Schaum-Vertices als „Wechselwirkungen“. Die Vertex-Amplituden charakterisieren die nicht-triviale Dynamik der Theorie.

In kausalen Spin-Netzen (Makropoulou 1997) werden lokale Bewegungen der Spin-Netz-Graphen betrachtet, wobei eine Bewegung jeweils durch einen unitären Operator für die Subgraphen, die raumartige Ereignisse darstellen, im Hilbertraum der sog. „Verflechtungen“ beschrieben wird. Die Quantenraumzeit besteht aus einer großen Anzahl offener Systeme, die durch Quantenoperationen verbunden sind.

Die Standard-Quanten-Kosmologie beruht auf dem Verfahren der kanonischen Quantisierung oder 3+1 Quantisierung der Gravitation. Bei dieser Quantisierung erhält man die sog. Wheeler-deWitt-Gleichungen $\hat{H}|\psi_{univ}\rangle = 0$. Darin bezeichnet \hat{H} einen hermiteschen Operator, der die Quantisierung der Hamilton Constraint in der 3+1 Zerlegung der Hilbert-Einstein Wirkung der ART darstellt.

Anstelle der Standard Quanten-Kosmologie, in welcher der Zustand des gesamten Universums ausschließlich von „außerhalb des Universums“ betrachtet werden kann, und in dem keine physikalischen Beobachtungen angestellt werden können, ist in der Quanten-Kosmologie des kausalen Spin-Schaum-Modells eine Beobachtung innerhalb des Universums durch die Verwendung einer lokalen mikroskopischen Wellenfunktion $|\psi_{univ}\rangle$, bzw. mit einer Kollektion gewöhnlicher offener quantenmechanischer Systeme möglich. Markopoulou führt in jedem Knoten des Spin-Netzes einen Lichtkegel ein. Die Evolution der Netze wird endlich, und die kausale Struktur bleibt erhalten. Die Lichtkegel definieren für jeden Beobachter eine konkrete Perspektive. Ein Problem bleibt beispielsweise, wie die gewöhnliche ein-dimensionale Zeit aus der Quanten-Kausalität abgeleitet werden könnte.

In diesen Spin-Schaum-Modellen gibt es keine Dinge mehr, sondern nur noch geometrische Beziehungen, so wie in der halb-klassischen Heimschen Strukturtheorie.

Auch die Arbeitsgruppe um Abhay Ashtekar, die von den Arbeiten der Gruppe um Penrose inspiriert wurde, vermeidet Punkte in der Geometrie (1993). In der „Methode der neuen Variablen“ werden geometrische Ausdrücke als Vielfache von kleinsten Flächen mit der Planckschen Länge als Seitenlängen umgeschrieben.

2 Theorien mit geometrisch strukturierten Teilchen

In der Stringtheorie werden Teilchen ebenfalls nicht mehr als Punkte, sondern als eindimensionale schwingende Saiten aufgefaßt. 1984 wurde die 10-dimensionale Supergravitationstheorie als niederenergetische Erscheinungsform der Stringtheorie behandelt. Die String-Theorie wurde in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts eingeführt, um die Bindung der Quarks verstehen zu können. Strings sollten zunächst Bosonen sein (Schwarz 1985). Scherk und Schwarz stellten eine String-Theorie auch für Fermionen auf (1974). Dabei trat ein masseloses Spin-2-Teilchen auf, das als Graviton aufgefaßt wurde und auf die mögliche Vereinigung der ART hindeutete. Aus der Stringtheorie wurde durch Einführen der Supersymmetrie die Superstringtheorie.

Um Unendlichkeitsstellen zu vermeiden, sind zur Definition von Fermionen 10 Dimensionen erforderlich. Ein String ist eine Schlinge in der Raumzeit mit möglichen Verwindungen in den zusätzlichen Dimensionen. Jede Schwingungsfrequenz soll einer Masse und Ladung eines Teilchens oder einer Teilchengruppe entsprechen. Die zusätzlichen Dimensionen werden nach der Methode von Kaluza (1921) und Klein (1926) auf Bereiche der Planckschen Länge eingerollt oder kompaktifiziert. Die kompaktifizierten Dimensionen führen zu einer unendlich großen Zahl von Teilchen in der Supergravitationstheorie. Die Wechselwirkung zwischen Strings wird durch Teilung und Vereinigung von Strings ausgedrückt.

Die Superstringtheorie scheint alle Möglichkeiten zu einer einheitlichen geometrischen Beschreibung der vier Wechselwirkungen und Elementarteilchen in sich zu schließen. Doch fehlen ihr bisher die geometrischen Grundlagen. Es ist unklar, wie sechs Dimensionen kompaktifiziert werden müssen. Es gibt beliebig viele Möglichkeiten, die höheren Dimensionen einzurollen. Aber die Anzahl und Natur der Teilchen hängen von der Art ab, wie diese kompaktifiziert werden. Ein echter Vergleich mit Experimenten ist bisher nicht möglich gewesen, da keine Möglichkeit besteht, Massen und Wechselwirkungskonstanten aus der Theorie herzuleiten.

Es wird nicht erklärt, warum die Gravitation nicht mit der Vakuumenergie wechselwirkt. Wegen der auf kleinstem Raum aufgewickelten Dimensionen sollte die Krümmung der Raumzeit ebenfalls sehr groß sein. Diese Krümmung kann durch Einfügen der kosmologischen Konstante in den Gravitationsfeldgleichungen aufgehoben werden. Eine Krümmung der Raumzeit ist jedoch nicht nachweisbar. Aufgrund der Vakuumfluktuationen sollte sie aber 10^{120} mal stärker sein.

In der Superstringtheorie haben Strings die Größe des Planck-Durchmessers, weil sie auch in den darin aufgerollten Räumen schwingen. Die Schwingungsfrequenzen werden mit Eigenschaften der Teilchen identifiziert. Allerdings haben Quarks bereits 10^{18} mal größeren Durchmesser (und die Nukleonen sind wiederum 100mal größer als diese). Ob die Natur überhaupt den Weg gegangen ist, Dimensionen einzurollen, ist durch keinen logischen Beweis begründet worden. Daher gelten die Ansätze bei einigen der bedeutendsten

Theoretiker als verfehlt (Feynman (1989), Glashow (1986), Weinberg (1989) u.a.). Schlecht begründete physikalische Annahmen werden durch komplizierte mathematische Methoden zu immer phantastischeren Strukturen ausgebaut, die zwar mit Symmetrieforderungen an das Universum übereinzustimmen scheinen, aber keinerlei Bezug zur meßbaren Realität haben.

Die Struktur der ART ergab sich aus der tiefen Einsicht in die Logik der physikalischen Gesetze. Dagegen fehlt in der Superstringtheorie ein generelles Verständnis von deren Logik. Die Strings, welche physikalische Eigenschaften elementarer Teilchen bestimmen sollen, werden in Bereichen angesiedelt, wo keine Physik mehr definiert ist. Denn Das Quadrat der Planckschen Länge ist eine Naturkonstante (Treder 1974). Nach der Unschärferelation kann es keine physikalischen Objekte mit kleineren Ausdehnungen geben. Damit ist das Konzept unphysikalischer Punkte nur unwesentlich verschoben auf das unphysikalischer Strings, sofern diese mit der Planck-Länge vergleichbar sind.

Die Versuche Einsteins und seiner Schüler, materielle Feldquanten durch eine Theorie ihrer geometrischen Strukturen verstehen zu können, schien durch die Inflation der in Beschleunigern registrierten elementaren Teilchen aussichtslos zu werden. Umgekehrt gibt es heute zu viele alternative theoretische Ansätze, die viele neue Teilchen voraussagen, zu deren Nachweis enorm hohe Energien erzeugt werden müssen.

Die Frage ist daher berechtigt, ob die Vereinheitlichungs-Bestrebungen und Untersuchungen der Wechselwirkungen nicht grundsätzlich das Auffinden von Teilchenmassen ausschließen, weil diese Theorien einen zweiten logischen Schritt vor den ersten setzen? Der erste logische Schritt sollte das Auffinden der inneren Strukturen von Materiefeldquanten und von deren Massen sein. Erst dann sollte sich entscheiden lassen, nach welchen Wechselwirkungen und Austausch-Bosonen gesucht werden muß.

Wie sich physikalische Felder geometrisieren lassen, hat Einstein für das Gravitationsfeld in der ART gezeigt. In seinen Feldgleichungen wird die Divergenz des Riemannschen Krümmungstensors der Divergenz des phänomenologischen Energie-Impuls-Dichtetensors gleich gesetzt. Das gestattet globale kosmologische Untersuchungen, wenn beispielsweise die Materie der Galaxien als gleichförmig über den Raum verteilt angesehen werden. Doch die Art, wie die Raumzeit-Geometrie mit der Materie-Verteilung verknüpft ist, störte selbst Einstein immer. Er war sich sehr bewußt, dass eine geometrische Darstellung des phänomenologischen Energie-Anteils für die Gravitationsfeld-Gleichung, speziell für elementare Gravitationsquellen, also Teilchen, nachgeliefert werden müsse.

Das Auftreten der Singularität am Zeitbeginn des Universums geht einzig darauf zurück, dass Einsteins Feldgleichungen noch unfertig sind, d.h. dass in dieser Theorie die Raumzeit nur dann existiert, wenn auch Energie-Materie vorhanden ist. In einer vollständig geometrisierten Theorie sollten sich erst im Laufe der Raumzeit-Evolution elementare geometrische Strukturen entwickeln, welche die Eigenschaften von Energie oder Materie hätten, und ein Urknall bräuchte nicht stattgefunden zu haben.

1938 gelang es Einstein, Infeld und Hoffmann, für den einfachsten Fall von metrischen Singularitäten, die Mechanik und die Gravitationskräfte zwischen den den Singularitäten entsprechenden Teilchen herzuleiten. Die metrischen Singularitäten lassen sich jedoch durch Deltafunktionen der Massendichte auf der rechten Seite der Feldgleichungen ersetzen und sind daher verkappte Inhomogenitäten der Feldgleichungen. Bereits 1935 hatten Einstein und Rosen topologisch fundierte Teilcheninterpretationen vorgeschlagen, die Wheeler 1958 in

seiner Geometrodynamik weiter entwickelte. Dabei wird die Annahme aufgegeben, dass für jeden Punkt der Raumzeit im Infinitesimalen näherungsweise ein Minkowski-Raum angenommen werden darf. Geladene Teilchen werden in der Geometrodynamik durch Wurmlöcher in einer Geometrie dargestellt, dessen Vakuum durch starke Schwankungen der Struktur beschrieben wird. Aber die Vielzahl der Teilchen kann Wheeler ebenso wenig wie Jehles Knotentheorie (1972) angeben.

Einstein hatte bereits versucht, die Metrik ganz allgemein anzusetzen. Er baute sie aus einem hermiteschen und einem nicht-hermiteschen Anteil auf. Doch die Lösungen der Feldgleichungen von Hlavaty (1952) und Tonnelat (1955) waren physikalisch nicht zu interpretieren. Auch die Versuche Einsteins, das elektromagnetische Feld durch den nicht-symmetrischen Anteil im metrischen Tensors zu geometrisieren (wobei der symmetrische Anteil weiterhin als Gravitationsfeld interpretiert wurde), ist nicht gelungen (1956). Die Lösungen der Feldgleichungen von Bonnor (1954) lieferten magnetische Monopole ohne Masse und andere nicht in der Natur vorkommende Objekte.

Allein durch Verallgemeinerung der Metrik der Riemannschen Geometrie kann die Lösungsmannigfaltigkeit nicht groß erhöht werden. Ein Beispiel dafür, wie Kernkräfte und Gravitation in geometrischer Weise vereinigt werden können, ist die Theorie von Hehl und Datta (1971). Der Strukturteil in den Einsteinschen Feldgleichungen wird in dieser Theorie in der Riemann-Cartan-Geometrie angesetzt, in welcher neben der Raumkrümmung noch eine Torsion auftritt. Durch Einführung der Wirkungsfunktion des Dirac-Teilchens, das mit einem Gravitationsfeld wechselwirkt, werden Feldgleichungen hergeleitet, die nach Eliminierung der Verzerrung in der Dirac-Gleichung auf eine nichtlineare Spinorgleichung vom Heisenberg-Pauli-Typ führen.

Isham, Salam und Strathdee versuchten, die Quellen der Gravitation durch stark wechselwirkende Felder zu beschreiben. In einer allgemein kovarianten Theorie tritt neben dem gewöhnlichen metrischen Tensor g_{ik} ein zweiter metrischer Tensor f_{ik} auf, der das massive Mesonenfeld mit Spin-2 beschreiben soll. Das metrische Feld g_{ik} ist nur an leptonischen, das zusätzliche Feld f_{ik} nur an hadronische Materie gekoppelt. Ein Mischungsterm zwischen g_{ik} und f_{ik} bewirkt, dass das g-Feld direkt über das f-Feld mit hadronischer Materie wechselwirkt. Sivaram und Sinha konnten (1974) mit dieser f-g-Theorie die Teilcheneigenschaften Spin, Isospin, Baryonen-Zahl, Strangeness und einige Elementarteilchenmassen berechnen. Zur Lösung der Feldgleichungen wird die Kerr-Metrik verwendet, die das Gravitationsfeld eines rotierenden Körpers beschreibt, sowie die Carter-Metrik, die für das Feld eines rotierenden elektrisch geladenen Körpers gilt.

Es darf demnach erwartet werden, dass sich mit einer geeigneten Geometrie tatsächlich Teilchen und deren physikalische Eigenschaften verstehen lassen, was Einstein immer vermutet hatte. Es wird angenommen, dass im Ansatz zu Theorien der Vereinigung der Kräfte mit Anspruch auf Realitätsnähe neben gravitativen und elektromagnetischen Feldern auch die schwache und die starke Wechselwirkung mit berücksichtigt werden müssten. Daher scheint es aussichtslos zu sein, eine Teilchen-Theorie mit einer verallgemeinerten Riemannschen oder Cartan-Geometrie mit vier oder mehr Dimensionen erfolgreich entwickeln zu können. Das ist nur richtig, wenn - mit Einstein - davon ausgegangen wird, dass die Beschreibung der materiellen Welt allein mit einer einzigen (mathematisch verallgemeinerten) Metrik gelingen könnte.

3. Probleme in der Teilchenphysik und die Notwendigkeit einer Strukturtheorie der Partikel

Feldtheorien sind im wesentlichen Störungstheorien, d.h. die wahren Verhältnisse werden angenähert durch Störungsrechnungen. In der QED werden durch Feynman-Diagramme alle möglichen Prozesse einer Wechselwirkung, welche die gleichen Anfangs- und End-Konfigurationen haben, symbolisch erfaßt. Alle diese energetischen Vorgänge werden aufsummiert. Die quadrierten Beiträge liefern eine reale Wahrscheinlichkeit. Alle vorstellbaren Vorgänge, die auch nur für eine extrem kurze Zeit auftreten, werden als virtuelle Prozesse mit einbezogen. Damit die virtuellen Beiträge nicht zu unendlichen Summen führen, wird die Renormalisierungstechnik angewendet.

Dabei werden neue Wechselwirkungen und neue Teilchen in der Weise postuliert, dass durch sie in den neuen Feynman-Diagrammen in der gesamten Summe die divergierenden Terme gerade ausgelöscht werden. Im Fall der Wechselwirkung zwischen Elektronen und Photonen gibt es unendlich viele Möglichkeiten der Anregung der elektrischen Ladung durch das Photon. Die beobachtete Ladung wird aufgefaßt als die Gesamtsumme aus einer Basisladung in einem Baum-Diagramm und den Beiträgen aller Diagramme höherer Ordnung. Doch die Größe der Basisladung ohne diese Korrekturen ist unbekannt. Daher wählt man die Basisladung so, dass sich abzüglich der Korrekturen der beobachtete Wert für die Ladung ergibt. Dieses Vorgehen hat sich als praktisch bewährt. Doch wenn Unendlichkeiten von Unendlichkeiten subtrahiert werden, gibt es weder eine physikalisch noch philosophisch vernünftige Begründung. Veltman (2003) kommentiert dieses Verfahren überspitzt: „Nonsense minus nonsense gives something ok.“

Die Unendlichkeiten treten in Verbindung mit freien Parametern der Theorie auf. Das sind solche, für die es keine theoretischen Vorhersagen gibt. In der QED wird die elektrische Ladung des Elektrons als ein solcher freier Parameter aufgefaßt, der nicht errechnet wird, und - wie die Masse des Elektrons - aus Messungen gewonnen wird. Auch die Gravitationskonstante wird für theoretisch nicht ermittelbar gehalten. Das weist auf einen Mangel in theoretischen Ansätzen hin.

Martinus Veltman (2003) glaubt ebenfalls, dass die QED noch unvollständig ist, wobei diese Unvollständigkeit nur isoliert werden kann und „at last for the moment swept under the rug“ (S. 265). Das Wunder der QED besteht darin, dass alle Unendlichkeiten in den in ihr enthaltenen freien Parametern absorbiert werden.

Niemand war bisher in der Lage, die Masse des Protons oder des Pions zu berechnen, obwohl die Teilchenphysiker zu wissen meinen, dass sie diese Objekte als gebundene Quark-Zustände verstehen können. Die Dreier-Familienstruktur der Quarks und Leptonen bleibt ein Rätsel. Die praktische Masselosigkeit der Neutrinos ist schwer zu verstehen. Ob es das Higgs-Teilchen überhaupt gibt und wenn ja, wie man damit die Partikel-Massen bestimmen soll, ist ungewiß.

Da sich weder aus der Supersymmetrie noch aus der Stringtheorie Vorhersagen ableiten lassen, die experimentell überprüft werden könnten, ist es unsere Auffassung, dass die meisten der genannten Probleme in der Teilchenphysik durch die Strukturtheorie von B. Heim gelöst wurden, in der die „freien Parameter“ Elementarladung und Feinstrukturkonstante sowie die Elementarteilchenmassen und -Lebensdauern - ohne Störungsrechnungen - hergeleitet werden. Auch die Quark-Familien und die Quantenzahlen finden eine geometrische Erklärung. In dieser Strukturtheorie sind Teilchen weder Punkte noch Strings,

sondern komplizierte dynamische geometrische Strukturen; jedes stellt nach Heim bereits „einen eigenen kleinen Kosmos“ dar.