Reiner Hedrich

Von der Physik zur Metaphysik

Physikalische Vereinheitlichung und Stringansatz

EPISTEMISCHE STUDIEN
Schriften zur Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie

Herausgegeben von / Edited by

Michael Esfeld • Stephan Hartmann • Albert Newen

Band 12 / Volume 12

Reiner Hedrich

Von der Physik zur Metaphysik

Physikalische Vereinheitlichung und Stringansatz

ontos verlag

Frankfurt I Paris I Ebikon I Lancaster I New Brunswick

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie;
detailed bibliographic data is available in the Internet at http://dnb.ddb.de

North and South America by
Transaction Books
Rutgers University
Piscataway, NJ 08854-8042
trans@transactionpub.com

United Kingdom, Ire, Iceland, Turkey, Malta, Portugal by
Gazelle Books Services Limited
White Cross Mills
Hightown
LANCASTER, LA1 4XS
sales@gazellebooks.co.uk

Livraison pour la France et la Belgique:
Librairie Philosophique J.Vrin
6, place de la Sorbonne ; F-75005 PARIS
Tel. +33 (0)1 43 54 03 47 ; Fax +33 (0)1 43 54 48 18
www.vrin.fr

©2007 ontos verlag
P.O. Box 15 41, D-63133 Heusenstamm
www.ontosverlag.com

ISBN 978-3-938793-47-3

2007

No part of this book may be reproduced, stored in retrieval systems or transmitted
in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording or otherwise
without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the
purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the purchaser of the work

Printed on acid-free paper
ISO-Norm 970-6
FSC-certified (Forest Stewardship Council)
This hardcover binding meets the International Library standard

Printed in Germany
by buch bücher **dd ag**

Inhalt:

1. Das Vereinheitlichungsprogramm der Physik und die Quantengravitation 7

Die Metaphysik der Vereinheitlichung – Gravitation und Quantenmechanik – Quantengeometrodynamik – Der quantenfeldtheoretische Ansatz – Eine Quantenfeldtheorie der Gravitation ? - Quantengravitation durch nomologische Vereinigung aller Wechselwirkungen ?

2. Der Stringansatz 35

2.1. Perturbative Stringtheorien: Gravitation, Supersymmetrie und höhere Dimensionalität 35

Die formale Konzeption – Quantisierung und Stringzustände – Supersymmetrie - Wechselwirkungen – Festlegung der Raumzeitdimensionen – Fünf perturbative Superstringtheorien

2.2. Kompaktifizierung und Calabi-Yau-Räume 57

2.3. Dualitäten und M-Theorie 64

T-Dualität - S-Dualität - M-Theorie

2.4. Dirichlet-Branen und Bran-Welten 79

D-Branen - Bran-Welten - Kosmologische Szenarien

3. Der Stringansatz im Spektrum der Quantengravitationstheorien 91

Das Spektrum der Alternativen - Kovariante Quantisierung - Kanonische Quantisierung – Loop Quantum Gravity – Synthese aus Stringansatz und Loop Quantum Gravity ?

4. Theorienbildung, konzeptionelle Anforderungen und Empirie 107

4.1. Die Entwicklung der Stringtheorien 112

Die Anfänge in der Hadronenphysik – Supersymmetrie und fermionische Zustände – Die entscheidende Entdeckung – Konzeptionelle Weiterentwicklung – Die erste Superstring-Revolution – Die zweite Superstring-Revolution - Das Pferd von hinten aufzäumen: Zufallsentdeckungen und tentative Mathematik

4.2. Konzeptionelle Randbedingungen 141

Fehlende empirische Randbedingungen für eine Theorie der Quantengravitation – Die grundlegende Motivation für den Stringansatz – Arten der Vereinheitlichung – Motivationen für eine Theorie der Quantengravitation – Motivationen für eine nomologische Vereinigung aller Wechselwirkungen – Die Vorteile der Supersymmetrie

4.3. Das Problem der empirischen Kontrolle 166

Die Ursachen - Das Problem der empirischen Kontrolle - Exotica als Chance ? - Die Alibi-Vorhersage – Selbstimmunisierungstechniken – Wie konnte es so weit kommen ?

4.4. Problemtypologie 185

Zwei Arten von Problemen - Externe Probleme - Legitime Erklärungsansprüche an eine fundamentale Theorie - Interne Probleme - Fehlende fundamentale Prinzipien – Interne Aufräumarbeiten

5. Das Kontingenzproblem 201

5.1. Eindeutigkeit und Einzigartigkeit 201

5.2. Uneindeutigkeit und Kontingenz 210

Gründe für die Uneindeutigkeit - Die String-Landscape

5.3. Selektion und anthropische Argumente 224

Das Selektionsproblem - Von der Kontingenz zum Ensemble der Welten - Tegmarks "Ultimate Ensemble Theory" – Anthropische Selektion ? - Dynamische Implementierung der anthropischen Selektivität - Konsequenzen - Kritik an anthropischen Argumentationsweisen

6. Das Problem der Raumzeit in der Quantengravitation 253

6.1. Das Problem der Hintergrundraumzeit im Stringansatz 253

Das Problem der Hintergrundraumzeit – Raumzeit als abgeleitete Grösse ?

6.2. Entropie Schwarzer Löcher, diskrete Raumzeit und holographisches Prinzip 268

Die Entropie Schwarzer Löcher - Die holographische Informationsdichtegrenze - Diskrete Raumzeit – Das holographische Prinzip - AdS/CFT-Korrespondenz - Das gesuchte fundamentale Prinzip der Quantengravitation ?

7. Ontologische Implikationen des Stringansatzes 289

Sind Strings fundamentale Entitäten ? - Der String als Nachfolgebegriff des traditionellen Teilchenkonzepts ? – Ontische Interpretierbarkeit des String ? – Auflösung der objekthaften Ontologie

8. Das Realismusproblem: Entitäten oder Strukturen ? 311

9. Von der Physik zur mathematisch inspirierten Metaphysik der Natur 327

Nachwort 353

10. Literaturverzeichnis 355

"Elegance requires that the number of defining equations be small. Five is better than ten, and one is better than five. On this score, one might facetiously say that String Theory is the ultimate epitome of elegance. With all the years that String Theory has been studied, no one has ever found even a single defining equation! The number at present count is zero. We know neither what the fundamental equations of the theory are nor even if it has any. Well then, what is the theory, if not a collection of defining equations? We really don't know." (Susskind (2005) 124)

1. Das Vereinheitlichungsprogramm der Physik und die Quantengravitation

Der Stringansatz existiert inzwischen, über alle seine Metamorphosen hinweg, seit mehr als drei Jahrzehnten. Dies ist für einen vorgeblich empirisch-wissenschaftlichen Theorieansatz, dem es in der ganzen Zeit nicht gelungen ist, durch konkrete quantitative Vorhersagen eine Ankopplung an die Empirie zu erreichen, nicht weniger als erstaunlich.

Will man den Stringansatz verstehen, so ist dies nicht zuletzt eine Frage der Mathematik und der Mechanismen mathematischer Modellbildung. Will man jedoch verstehen, was den Stringansatz - trotz seiner recht eigenwilligen Stellung zur herkömmlichen Methodologie der empirisch-wissenschaftlichen Forschung - für die Physik und die Physiker interessant macht, und es ihm überhaupt ermöglicht hat, solch lange Zeit zu überleben, so ist es unabdingbar, sich mit den philosophischen und metaphysischen Ideen und Konzepten hinter den methodologischen Strategien der Physik als empirischer Wissenschaft zu beschäftigen.

Der Stringansatz ist, wenn nicht gar der Endpunkt, so immerhin das konsequente Resultat einer langwährenden, die gesamte Entwicklung der Physik mindestens seit Beginn ihrer Existenz als moderne wissenschaftliche Disziplin dominierenden Strategie, die in letzter Instanz auf einer sehr alten philosophischen Idee beruht: der von der Einheit der Natur. Diese Idee, die sich schon in der antiken Naturmetaphysik festmachen lässt, hat es schliesslich durch mehr oder minder ausgeprägte adaptive Variabilität, in ihrem Kern letztlich unberührt, bis ins Zentrum des methodologischen Arsenals der neuzeitlichen empirischen Wissenschaften geschafft. Mit dem Erfolg oder Misserfolg des Stringansatzes bzw. seiner Varianten und Mitanwärter auf den Status einer letztgültigen Theorie der Quantengravitation steht nicht zuletzt auch diese metaphysische Idee auf dem Prüfstand. Die Verbindungen zwischen Physik und Metaphysik sind immerhin stark genug, dass die Entwicklungen innerhalb der Physik die in ihrem Hintergrund stehende Metaphysik mehr oder weniger unmittelbar mitbetreffen.

Andererseits droht die Physik im Rahmen dieser Entwicklung, mit dem Stringansatz als Speerspitze, zu etwas zu werden, das sie zu Beginn ihrer Ideengeschichte schon einmal war: Naturmetaphysik. Hier handelt es sich dann jedoch nicht um die originäre Metaphysik der Anfänge des Nachdenkens über die Natur, sondern um eine solche, die im fortschreitenden Alterungsprozess einer hochentwickelten wissenschaftlichen Disziplin deren empirisch-wissenschaftliche Wurzeln mittels eines komplexen Prozesses der Transzendierung hinter sich lässt. Als Katalysator bei diesem Prozess wirken möglicherweise nicht zuletzt gerade die Konsequenzen der Mathematisierung, mittels derer die modernen Wissenschaften im Rahmen der Etablierung der empirisch-wissenschaftlichen Methode bei Bacon und Galilei überhaupt erst hervorgebracht wurden.

Die Metaphysik der Vereinheitlichung

Seit ihren Anfängen in der Naturphilosophie der griechischen Antike bis in unsere Zeit gehört die Idee, dass die Natur eine Einheit bildet und in letzter Instanz nicht als die Vielheit disparater Phänomenbereiche anzusehen ist, als die sie vielleicht erst einmal in Erscheinung tritt, zu den dominanten metaphysischen Hintergrundannahmen der Physik bzw. ihrer historischen Vorläufer. Konkreter und gleichzeitig kontroverser als etwa im Aristotelischen organischen Kosmos wird diese Idee dort, wo als Grundlage der postulierten Einheit eine durchgängige Strukturierung der Natur angenommen wird, die letztlich auf eine basalste materiale und dynamische Ebene zurückgeht, ein ontisches Substrat, welches die Phänomene der verschiedenen Bereiche der Natur hervorbringt. Dieser ontologische Reduktionismus bestimmt schon die Arché-Konzepte der vorsokratischen Naturphilosophie ebenso wie den antiken Atomismus.

Im Gewand einer konkreten mathematisierten, empirisch-wissenschaftlichen Umsetzung prägt die Einheitsidee im Verbund mit dem ontologischen Reduktionismus dann auch entscheidend die moderne Physik, und hier ganz besonders die theoretischen Entwürfe der heutigen Hochenergiephysik. Hinter der reduktionistischen Komponente dieses metaphysischen Hintergrunds physikalischen Denkens steckt dabei in letzter Konsequenz die Annahme, dass das ontische Substrat letztlich schon alle Informationen

über die Natur enthält. Alle höheren Systemebenen sind dann informationstheoretisch durch das Substrat festgelegt. Und die basalste epistemologische Umsetzung dieser Annahme einer reduktionistischen Festlegung auf der ontischen Seite lautet dann konsequenterweise: Kennt man alle Eigenschaften des Substrats, so weiss man letztlich schon alles über die Welt, auch wenn dieses Wissen vielleicht in vielen Fällen ein implizites Wissen sein und bleiben mag, das sich nicht immer adäquat in Bezug setzen lässt zu den möglichen Fragen, die das Geschehen auf höheren Systemebenen betreffen mögen.[1]

In ihrer avanciertesten Form kommt die Idee der ontischen Einheit im Programm der nomologischen Vereinheitlichung zum Ausdruck.[2] Diesem zufolge sollte die Einheit der strukturierten Natur - einer Natur, die, wie ebenfalls schon in der griechischen Antike angenommen wurde, einer durchgängigen Gesetzmässigkeit unterworfen ist - sich auch innerhalb ihrer naturwissenschaftlichen Erfassung in nomologischer und dynamischer Hinsicht widerspiegeln. Konsequenterweise ist die Vereinheitlichung in der nomologischen Erfassung der in der Natur wirksamen, grundlegenden Kräfte für die Physik seit langer Zeit eines der zentralen theorieleitenden Ziele und Forschungsprogramme. Mit ihr einher geht die Hoffnung, das ontische Substrat und die für dieses geltenden grundlegenden gesetzmässigen Zusammenhänge auszumachen. Das Ziel ist letztlich und im günstigsten Falle eine vollständige dynamische Theorie des Substrats.

Im Rahmen dieser Strategie flankieren wiederum der epistemologische und der methodologische Reduktionismus die ursprüngliche metaphysische Einheitsidee: Wenn man die Natur nicht nur als Einheit, sondern als hierarchisch strukturierte und durch das Substrat (informationstheoretisch) vollständig bestimmte Einheit versteht, wird die letztgültige Substrattheorie zumindest formal zur "Theorie von Allem", auch wenn damit noch nicht unbedingt gewährleistet sein muss, dass man mit der Substrattheorie tatsächlich "Alles" angemessen beschreiben kann. Es könnten pragmatische oder komplexitätstheoretische Gründe sein, die dies verhindern.

---

[1] Für eine differenziertere Darstellung und eine Erörterung der Probleme des Übergangs vom ontologischen zum epistemologischen Reduktionismus siehe Hedrich (1990).

[2] Vgl. etwa Weinberg (1992).

Das regulative Ideal hinter dieser Strategie ist auch dann schon wirksam, wenn man es noch nicht mit dem ontischen Substrat selbst zu tun hat, sondern sich diesem nur schrittweise annähert. Die Etappen hin zum endgültigen Ziel bestehen erst einmal vor allem aus nomologischen Vereinigungsschritten von ursprünglich selbständigen Teiltheorien der Physik. Sollte sich die letztgültige nomologische Vereinigung und mithin eine vollständige Substratbeschreibung nicht verwirklichen lassen, aus welchen Gründen auch immer, so bleibt dieses Ziel am Horizont dennoch als regulatives Ideal bestehen, vor dessen Hintergrund die einzelnen Schritte einer nomologischen Vereinigung ihre Verbindung zur Einheitsidee in reduktionistischer Ausprägung zum Ausdruck bringen. Eine solche Vorgehensweise wäre nur dann unangemessen, wenn die vorausgesetzten metaphysischen Konzepte hinsichtlich Einheit und Reduzierbarkeit unserer Welt nicht gerecht würden.

Der Verbund aus Einheitsidee, reduktionistischer Ausrichtung und nomologischem Vereinheitlichungsprogramm findet, wie sich unschwer erkennen lässt, seine natürliche Umgebung innerhalb einer realistischen Sichtweise hinsichtlich des Verhältnisses von Natur und Naturbeschreibung. Nur wenn die empirischen Wissenschaften die Beschreibung der Natur anstreben, wirkt sich die metaphysische Idee ihrer Einheit unmittelbar auf unsere wissenschaftlichen Bemühungen und die ihnen zugrundeliegenden Strategien aus. Instrumentalistische Ansätze können sich leicht mit weniger zufrieden geben. Spätestens, wenn den empirischen Wissenschaften nicht mehr eine vorrangig deskriptive Funktion zugeschrieben wird, sondern sie als Mittel zur Ökonomisierung der Empirie und als Instrument zur praktischen Naturbewältigung gesehen werden, spielen metaphysische Hintergrundannahmen, wie die einer ontischen Einheit der Natur, und die aus ihnen erwachsenden Strategien keine wesentliche Rolle mehr. Vielmehr lässt sich dann die Wissenschaft ebenso gut als funktionierender Flickenteppich "effektiver Theorien" betrachten, die für die ihnen zugewiesene Aufgabe in ihrer Pluralität vollends ausreichen. Auch wenn die Natur einheitlich wäre, müsste es eine instrumentalistisch verstandene Wissenschaft noch nicht unbedingt sein.

Vielleicht, so könnte man annehmen, spiegelt der Flickenteppich der Wissenschaft aber auch einen ebenso uneinheitlichen Flickenteppich der natürlichen Phänomenbereiche wider, eine irreduzible Pluralität der Welt. Vielleicht ist also die Annahme einer Einheit der Welt letztendlich falsch.

Vielleicht haben wir es mit einer "gesprenkelten Welt" zu tun, die schlichtweg disparate Phänomenbereiche aufweist, welche jeweils eine völlig eigenständige wissenschaftliche Vorgehensweise erfordern.[3] Vielleicht gibt es sogar Bereiche der Welt, die sich jeder wissenschaftlichen Erschliessung versperren. - Aber auch diese Überlegungen stellen vor dem Hintergrund einer instrumentellen Funktionszuschreibung für unsere empirischen Wissenschaften eine unnötige metaphysische Abschweifung dar, die für eben diesen Funktionszusammenhang hochgradig irrelevant erscheinen mag. Vielleicht sollte man nicht nur der Metaphysik, sondern auch den Wissenschaften gegenüber skeptisch bleiben. Andererseits sollte man vielleicht aber auch nicht von vornherein mehr aufgeben als nötig.

Durchaus mit weniger als einer ausgeprägt realistischen Position verträglich ist eine schwächere Variante des Vereinheitlichungsgedankens: die der konzeptionellen Vereinheitlichung. Hier geht es nicht notwendigerweise um die methodologische Umsetzung der metaphysischen Annahme einer ontischen Einheit der Natur, schon gar nicht unbedingt um die empirisch-wissenschaftliche Widerspiegelung der Annahme eines ontologischen Reduktionismus, der alle Phänomene als Ergebnis des Wirkens einer fundamentalen materialen und dynamischen Strukturebene ansieht, sondern vielmehr erst einmal nur um die minimalste Form einer Einheitlichkeit der wissenschaftlichen Erfassung der Natur. Diese konzeptionelle oder modelltheoretische Einheit der Wissenschaft, die nicht notwendigerweise eine ontische Einheit der Natur voraussetzt, besteht in ihrer basalsten Form im intendierten Ausschluss von logischen und konzeptionellen Widersprüchen innerhalb der Wissenschaft und ihrer diversen Bereiche, vor allem aber innerhalb ihrer Disziplinen und Subdisziplinen. Es geht also bei der konzeptionellen Vereinheitlichung darum, die verschiedenen theoretischen Entwürfe unserer intendierten Naturbeschreibung zumindest insofern miteinander in Einklang zu bringen, dass sie sich in ihren Voraussetzungen und in ihren Resultaten nicht widersprechen.

Die auf diese Weise angestrebte grössere Einheitlichkeit der Wissenschaft, die hier nicht notwendigerweise um den Preis problematischer metaphysischer Annahmen errungen wird, könnte einerseits zu ihrer höheren Praktikabilität und effektiveren Funktionalität beitragen. Auch wenn man für theoretische Entwürfe, die keine Überschneidung in ihrem intendierten

---

[3] Siehe etwa Cartwright (1994), (1999) sowie (1983) und (1989). Vgl. auch Morrison (2000).

Gegenstandsbereich aufweisen, per se keine logischen Widersprüche antreffen wird, so könnten hier konzeptionelle Fragen der Einheitlichkeit für die Praktikabilität und Funktionalität der Wissenschaft eine Rolle spielen. Je nach epistemologischem und methodologischem Gusto könnte man, statt für die Angemessenheit des Flickenteppichs effektiver Modelle, für die traditionellen Einfachheits- und Schönheitsregulative hinsichtlich unserer empirisch-wissenschaftlichen Theorien plädieren.

Andererseits besteht dieser Freiraum stilistischer Präferenzen nicht mehr, wenn es sich um theoretische Entwürfe handelt, deren intendierte Gegenstandsbereiche Überschneidungen aufweisen. Sollten hier Widersprüche zwischen etablierten Theorieentwürfen auftreten, so ist dies zumindest kaum mit dem Selbstverständnis einer empirischen Wissenschaft verträglich, die deskriptive und prognostizistische Ziele verfolgt. Widersprechen sich zwei etablierte Theorien, so ist dies ein deutliches Zeichen für Handlungsbedarf. Die naheliegendste therapeutische Indikation lautet dann: konzeptionelle Vereinheitlichung. Es ist dann zumindest ein logisch und mathematisch konsistentes Modell der materiellen Realität anzustreben, unabhängig davon, ob dies letztlich zu einer nomologischen Vereinigung führt oder nur zur konzeptionellen und logischen Vereinbarkeit verschiedener nomologisch eigenständiger Ansätze. Ein solches Modell könnte also immer noch aus semiautonomen Teilmodellen für nicht-überlappende Gegenstandsbereiche bestehen, die aber wenigstens miteinander verträglich sein müssten.

Um diese Verträglichkeit jedoch überhaupt nachweisbar werden zu lassen, müssten sie in gewisser Weise modelltheoretisch vergleichbar sein. Diese Vergleichbarkeit ist im Rahmen der modernen empirischen Wissenschaften gemeinhin im Rahmen einer fortgeschrittenen Mathematisierung theoretischer Beschreibungsansätze gegeben. So hat wohl auch die basalste Form einer konzeptionellen oder modelltheoretischen Vereinheitlichung ihre minimalen metaphysischen Voraussetzungen. Zu diesen gehört nicht zuletzt die Idee, dass die Natur grundsätzlich im Rahmen einer mathematisierten Wissenschaft erfasst werden kann: die alte Galileische Idee also, dass das Buch der Natur in mathematischen Lettern geschrieben ist. Schon die Mathematisierung der empirischen Wissenschaften im Rahmen der Galileischen Methode schafft eine minimale modelltheoretische Form von Einheit der Wissenschaft.

Wieviel mehr an Einheit der Wissenschaft innerhalb eines Forschungsprogramms wünschenswert erscheint und in die jeweilige Strategie eingebracht wird, hängt davon ab, welche Einschätzung seine Vertreter hinsichtlich der uns umgebenden und einschliessenden Welt hegen. Ob zusätzlich die metaphysische Idee einer ontischen Einheit der Natur, vielleicht sogar einer reduktionistisch durchstrukturierten Einheit der Natur, eine Rolle spielen sollte, entscheidet sich auf dieser Grundlage. Was sich dann schliesslich in der Forschungspraxis hinsichtlich der Umsetzung der gewählten Strategie erreichen lässt, ist eine andere Frage: Wieviele derer, denen eine konzeptionelle Vereinheitlichung gelingt, hätten nicht viel lieber eine nomologische Vereinigung erreichen wollen.

Als interessant würde sich jedoch der Fall erweisen, für den sich zeigen sollte, dass eine minimale konzeptionelle und modelltheoretische Vereinheitlichung nur um den Preis einer mehr oder weniger umfassenden nomologischen Vereinigung erreicht werden kann. Hier würde die Metaphysik der Einheit post hoc aufgrund konzeptioneller Anforderungen ins Spiel gebracht, ohne schon von Beginn an vorausgesetzt werden zu müssen. Was könnte die Wirksamkeit der Verbindungen zwischen Physik und Metaphysik deutlicher hervorstreichen?

In der Geschichte der neuzeitlichen Physik finden sich vielfältige Beispiele sowohl für die Umsetzung konzeptioneller als auch nomologischer Vereinheitlichungsbestrebungen.[4] Sie können geradezu als Etappen ihrer Erfolgsgeschichte gelesen werden. Beide Formen konstituieren in ihrem Zusammenwirken das physikalische Vereinheitlichungsprogramm. Wichtige Entwicklungsschritte in seiner Verwirklichung bilden etwa die Newtonsche Physik, mit der die alte Trennung in irdische und Himmelsmechanik aufgehoben wird, die Maxwellsche Elektrodynamik, mit der die Zusammenführung von Elektrizität, Magnetismus und Optik gelingt, sowie die Einsteinschen Relativitätstheorien, mit denen nicht zuletzt die Kompatibilität von Mechanik, Gravitation und klassischer Elektrodynamik erreicht wird.

---

[4] Eine differenziertere Erörterung der verschiedenen Vereinheitlichungsschritte innerhalb der Physik hinsichtlich dieser Unterscheidung erfolgt in Kap. 4.2., wenn schliesslich die aktuellen Beispiele hinzugekommen sein werden und es um die Bewertung des Stringansatzes hinsichtlich des Vereinheitlichungsprogramms gehen wird.

Die Entwicklung der Newtonschen Mechanik ebenso wie die der Maxwellschen Elektrodynamik sind unzweifelhaft als nomologische Vereinigungen anzusehen. Die Relativitätstheorien hingegen stellen vor allem das Ergebnis einer konzeptionellen Vereinheitlichung dar. So führt die Modifikation der Newtonschen Mechanik zur Speziellen Relativitätstheorie, die im Gegensatz zu ihrem Vorläufer mit den Maxwell-Gleichungen der Elektrodynamik vereinbar ist. Hierbei wird die Galilei-Invarianz der Newtonschen Theorie durch die Lorentz-Invarianz der Speziellen Relativitätstheorie abgelöst. Raum und Zeit der Newtonschen Konzeption werden zur vierdimensionalen Minkowskischen Raumzeit zusammengeführt und verlieren ihre jeweilige Eigenständigkeit. Die Unvereinbarkeit der Speziellen Relativitätstheorie mit der Newtonschen Gravitationstheorie wird dann schliesslich in der Allgemeinen Relativitätstheorie überwunden. Eines der ihr zugrundeliegenden Prinzipien ist das der Äquivalenz zwischen schwerer Masse (der "Feldladung" der Gravitation) und träger Masse (Bewegungsgrösse, dynamische Beharrungstendenz). Die Raumzeit wird innerhalb der Allgemeinen Relativitätstheorie zu einer dynamischen Grösse. Dargestellt wird sie im Rahmen der Differentialgeometrie vierdimensionaler Riemannscher Mannigfaltigkeiten. Die Idee eines statischen Hintergrundraumes des physikalischen Geschehens verliert endgültig ihre Berechtigung. Die Raumzeit ist nicht mehr die Bühne des Geschehens, sondern Teil seiner dynamischen Entwicklung. Die Allgemeine Relativitätstheorie stellt heute gleichermassen unsere allgemeinste Theorie der Raumzeit wie auch jeglichen gravitativen Verhaltens dar. Gravitation wird als das Ergebnis bzw. der Ausdruck der dynamischen Raumzeit und ihrer differentialgeometrischen Eigenschaften verstanden. Die dynamischen Eigenschaften der Gravitation werden auf die dynamischen Eigenschaften der Raumzeit übertragen. Von der Gravitation bleibt in dieser Darstellung letztlich nichts übrig als dynamische Raumzeit. Die Beschreibung der Gravitation wird zur Geometrodynamik.

Gravitation und Quantenmechanik

Die Allgemeine Relativitätstheorie als Theorie der Gravitation und der Raumzeit ist jedoch das, was man in der Physik eine klassische Theorie nennt. D.h. sie ist keine Quantentheorie. Alle anderen Grundkräfte der

Natur - die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung - werden, im Gegensatz zur Gravitation, inzwischen mittels der Quantenfeldtheorien in zumindest konzeptionell einheitlicher Form beschrieben. Die Quantenfeldtheorien als Ergebnis des Bestrebens, die Quantenmechanik mit der speziellen Relativitätstheorie in Einklang zu bringen, - einer weiteren konzeptionellen Vereinheitlichung also - werden zur Zeit als die allgemeinsten Theorien des dynamischen Verhaltens der Materie und ihrer Wechselwirkungen angesehen. Nur die Gravitation wurde in ihrem konzeptionellen Rahmen bisher nicht erfasst. Einer der Gründe dafür besteht nach weit verbreiteter Auffassung darin, dass die Quantenmechanik und die Quantenfeldtheorien konzeptionell nicht mit der Allgemeinen Relativitätstheorie vereinbar sind. Die Art und Weise, wie die heutige Physik die Gravitation beschreibt, ist mit der zur Zeit verwendeten physikalischen Beschreibung aller anderen Wechselwirkungen letztlich nicht kompatibel.

> *"[...] QM [Quantum Mechanics] and GR [General Relativity] have destroyed the coherent picture of the world provided by prerelativistic classical physics: each is formulated in terms of assumptions contradicted by the other theory. QM was formulated using an external time variable (the t of the Schrödinger equation) or a fixed, nondynamical background spacetime (the spacetime on which quantum field theory is defined). But this external time variable and this fixed background spacetime are incompatible with GR. In turn, GR was formulated in terms of Riemannian geometry, assuming that the metric is a smooth and deterministic dynamical field. But QM requires that any dynamical field is quantized: at small scales it manifests itself in discrete quanta and is governed by probabilistic laws."* (Rovelli (2004) 3)

Die konkreten Konfliktpunkte, auf die später noch genauer einzugehen sein wird, betreffen in erster Linie einerseits die im Kontext der Einsichten der allgemein-relativistischen Gravitationstheorie deutlich werdende Unangemessenheit des von den Quantenfeldtheorien verwendeten statischen Hintergrundraumes. Andererseits erscheint das Konzept einer kontinuierlichen, unquantisierten Raumzeit, wie es innerhalb der Allgemeinen Relativitätstheorie zur Anwendung kommt, vor dem Hintergrund der Einsichten der Quantenmechanik und der Quantenfeldtheorien sehr fragwürdig. Wollte man die Allgemeine Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik in Einklang bringen, indem man die Raumzeit als Ausdruck der Gravitation

selbst quantenmechanisch erfasst, so wäre hier vermutlich eher mit einer Unschärfe der Metrik der Raumzeit zu rechnen, vielleicht sogar mit einer solchen der raumzeitlichen Topologie.[5]

Die konzeptionelle Unvereinbarkeit von Quantenmechanik und Allgemeiner Relativitätstheorie stellt ein fundamentales Problem dar, wenn wir - im Sinne einer konkreten Umsetzung der Idee einer einheitlichen Natur - davon ausgehen, dass alle natürlichen Systeme Quantensysteme sind, diese aber gleichzeitig ohne Einschränkung gravitativen Wechselwirkungen ausgesetzt sind.[6] Unter dieser Voraussetzung ist es nicht ganz abwegig anzunehmen, dass die beiden fundamentalsten, aber miteinander unverträglichen Theorienkomplexe, über welche die Physik zur Zeit verfügt, Näherungen zu einer noch fundamentaleren Beschreibung sind, innerhalb derer die auftretenden konzeptionellen Unvereinbarkeiten auflösbar wären oder möglicherweise überhaupt nicht mehr in Erscheinung treten:

> *"General relativity and quantum theory are among the greatest intellectual achievements of the 20th century. [...] And yet, they offer us* strikingly *different pictures of physical reality. [...] Everything in our past experience in physics tells us that the two pictures we currently use must be approximations, special cases that arise as appropriate limits of a single, universal theory. That theory must therefore represent a synthesis of general relativity and quantum mechanics. [...] this is the theory we invoke when faced with phenomena, such as the big bang and the final state of black holes, where the worlds of general relativity and quantum mechanics must unavoidably meet."* (Ashtekar (2005) 2)

Unabhängig von metaphysisch anmutenden Motivationen, die vielleicht eine nomologische Einheit in der Beschreibung der Wechselwirkungen erstrebenswert erscheinen lassen, gibt es zudem handfeste Gründe für eine zumindest konzeptionelle Vereinheitlichung der Beschreibung der in der Natur wirksamen Kräfte: Für viele mikroskopische ebenso wie für viele

---

[5] Zudem ist im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie infolge der Nichtlinearität der Einsteinschen Feldgleichungen ein linearer nomologischer Zusammenhang wie etwa die Schrödinger-Gleichung der Quantenmechanik grundsätzlich nicht kovariant darstellbar. Beide Ansätze sind schon aus diesem Grunde inkompatibel.

[6] Claus Kiefer (Kiefer (2004) Kap. 1.2.) zeigt etwa auf, welche gewichtigen Argumente es gegen ein hybrides Theoriekonstrukt aus einer klassischen und einer Quantenkomponente gibt.

makroskopische Systeme lässt sich zwar vielleicht über die prinzipielle Unvereinbarkeit unserer fundamentalen physikalischen Theorien hinwegsehen. Für Elektronen und ihr dynamisches Verhalten etwa spielt die Gravitation im allgemeinen nur eine sehr untergeordnete Rolle. Für Planeten kann man andererseits wahrscheinlich getrost Quanteneffekte ignorieren. Jedoch spätestens für Schwarze Löcher oder für den hochverdichteten Materiezustand, den wir für den Anfang unseres expandierenden Universums vermuten, wird das Problem virulent. Hier überlappen die Gegenstandsbereiche der beiden miteinander unverträglichen theoretischen Konstrukte, die das zur Zeit fundamentalste Instrumentarium der Physik darstellen. Gleichermassen gravitative wie Quanteneffekte spielen hier eine Rolle. Weder die Allgemeine Relativitätstheorie, noch die Quantenfeldtheorien sind einzeln betrachtet hinreichend für die Beschreibung der physikalischen Probleme in diesem Überlappungsbereich ihrer Zuständigkeit.[7] Und ihre konzeptionelle Unverträglichkeit ist spätestens hier kaum hinnehmbar. Ohne eine Theorie der Quantengravitation, welche die Beschreibung der gravitativen Wechselwirkung mit der Quantenmechanik zumindest konzeptionell vereinbar und widerspruchsfrei macht, kommt man hier kaum weiter. - Wie aber könnte eine solche Theorie der Quantengravitation von der konzeptionellen Seite her aussehen? Auf welchem Wege und auf welcher modelltheoretischen Grundlage liesse sie sich entwickeln?

Will man die konzeptionellen Konflikte der quantenfeldtheoretischen Beschreibung der elektromagnetischen, der schwachen und der starken Wechselwirkung mit der allgemein-relativistischen, geometrisierenden Be-

---

[7] So ist beispielsweise die Entstehung Schwarzer Löcher im Kontext der Allgemeinen Relativitätstheorie verstehbar, aber die resultierenden Eigenschaften der Endprodukte des Gravitationskollaps sind in diesem Kontext nicht mehr vollständig beschreibbar, da für raumzeitliche Singularitäten das Äquivalenzprinzip seine Gültigkeit verliert - und damit die Allgemeine Relativitätstheorie ihre Zuständigkeit. Für den Urknall als postulierte Anfangssingularität gilt (in zeitlicher Umkehrung) letztendlich das gleiche. Die Quantenmechanik und die Quantenfeldtheorie stossen für diese Fälle ebenfalls an ihre Grenzen; sie haben Schwierigkeiten mit der Beschreibung von Prozessen bei hohen raumzeitlichen Krümmungen. Ab einem gewissen Krümmungsparameter - das Szenario betrifft die Planck-Ebene (hierzu später mehr) - wird die Gravitation genauso stark wie die übrigen Wechselwirkungen, so dass man in einer quantenfeldtheoretischen Beschreibung der anderen Wechselwirkungen über die Gravitation nicht mehr einfach hinwegsehen kann. Es fehlt also eine Theorie, die Phänomene wie den Gravitationskollaps oder den Urknall beschreiben könnte, oder eben erklären könnte, wieso es nicht zu ihnen kommt, obwohl es von seiten der Allgemeinen Relativitätstheorie danach aussieht. Details folgen in Kap. 4.2.

schreibung der Gravitation überwinden, so bieten sich erst einmal zwei konzeptionelle Angleichungsstrategien an, die jeweils in die eine oder die andere Richtung zwischen den Konfliktpartnern gehen:

Man kann einerseits versuchen, die Gravitation in den Apparat der Quantenfeldtheorien einzubeziehen - in der Hoffnung, dass sich deren Inkompatibilität doch noch überwinden lässt. Das angestrebte Ergebnis wäre eine Quantisierung der Gravitation analog zu den quantenfeldtheoretischen Beschreibungen aller anderen Wechselwirkungen, also eine Quantenfeldtheorie der Gravitation.

Andererseits könnte man versuchen, die elektromagnetische, die starke und die schwache Wechselwirkung mit ihren entsprechenden Quanteneigenschaften in ein umfassendes Geometrisierungsprogramm einzubinden, analog zur Geometrisierung der Gravitation innerhalb der Allgemeinen Relativitätstheorie. Das angestrebte Ergebnis bestände in einer Geometrisierung aller Wechselwirkungen unter Einschluss ihrer Quanteneigenschaften.

Die erstere Strategie liesse sich als Quantentheorie der Gravitation bzw. als "Quantengravitation", die letztere als Geometrodynamik mit Quanteneigenschaften bzw. als "Quantengeometrodynamik" bezeichnen.

Quantengeometrodynamik

Historisch betrachtet weist die Quantengeometrodynamik von beiden Strategien die älteren Wurzeln auf. Schon bald nach der Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie, also der klassischen Geometrodynamik der Gravitation, versuchte Einstein im Rahmen einer "Einheitlichen Feldtheorie" die elektromagnetische Wechselwirkung - die zu dieser Zeit neben der Gravitation einzig bekannte fundamentale Kraft - in das Geometrisierungsprogramm der Allgemeinen Relativitätstheorie einzubinden. Auch das Wirken des Elektromagnetismus sollte als Ergebnis einer - mithin komplexeren - raumzeitlichen Dynamik erfasst werden. Ebenso wie schon die Gravitation in der Allgemeinen Relativitätstheorie, sollte nun auch die elektromagnetische Wechselwirkung als Eigenschaft der Raumzeit kodiert

und verstanden werden. Übrig bleiben sollte am Ende nur noch ein metrisches Feld und seine dynamischen Eigenschaften. Einstein blieb mit diesem Programm, trotz etwa drei Jahrzehnten intensiver Bemühungen, bis zu seinem Tod erfolglos.

Einen alternativen Versuch zur Einbeziehung der elektromagnetischen Wechselwirkung in das Geometrisierungsprogramm der Allgemeinen Relativitätstheorie unternahmen zudem in den zwanziger Jahren Theodor Kaluza und Oskar Klein.[8] Grundlage dieser "Kaluza-Klein-Theorie" ist eine Ad-hoc-Erweiterung der Dimensionalität der Raumzeit. Zur Geometrisierung des klassischen Elektromagnetismus wurde eine zusätzliche fünfte Dimension postuliert, welche die Symmetrieeigenschaften der elektromagnetischen Wechselwirkung repräsentieren sollte.[9] [10] Warum ist diese fünfte Dimension aber nicht beobachtbar? Wie Oskar Klein 1926 zeigen konnte, wäre die zusätzliche Raumdimension, im Gegensatz zu den übrigen räumlichen Dimensionen, nicht als makroskopisch ausgedehnt zu verstehen, sondern als auf mikroskopischer Ebene eingerollt[11] - "kompaktifiziert", wie dies heute heisst.[12] Daher würde sie nicht makroskopisch in Erscheinung treten. Die Kaluza-Klein-Theorie wurde dann jedoch auftrund ihrer Inkompatibilität mit den Teilcheneigenschaften des Elektrons erst einmal vergessen.

---

8 Siehe Kaluza (1921) und Klein (1926).

9 Die fünfzehn fünfdimensionalen Feldgleichungen der Kaluza-Klein-Theorie zerfallen, wenn die metrischen Komponenten von den fünften Dimension unabhängig sind, in einen Satz von zehn Gleichungen, die ein Gravitationstensorfeld beschreiben und in einen Satz von vier Gleichungen, die ein elektromagnetische Vektorfeld beschreiben und den Maxwell-Gleichungen für das Vakuum entsprechen, wenn das Skalarfeld, das von der übrigbleibenden Wellengleichung beschrieben wird, konstant bleibt. Unter dieser Bedingung entsprechen die Gleichungen für das Gravitationstensorfeld zudem gerade den Einsteinschen Feldgleichungen.

10 Gunnar Nordstrom hatte schon 1914, also noch ohne die Allgemeine Relativitätstheorie, versucht, die Gravitation und den Elektromagnetismus gemeinsam auf einer fünfdimensionalen Raumzeit zu beschreiben. Nach der Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie wurde klar, dass dieser Ansatz die Gravitation nicht adäquat erfasst, sondern bestenfalls approximativ gültig sein kann.

11 Die Bedingung für eine eingerollte fünfte Dimension entspricht gerade der in der Kaluza-Klein-Theorie gewählten Voraussetzung, dass die metrischen Komponenten von den fünften Dimension unabhängig sind.

12 Siehe Kap. 2.2.

Nach der Entdeckung der starken und der schwachen Wechselwirkung war es dann schliesslich nicht mehr nur die elektromagnetische Wechselwirkung, die im Rahmen eines umfassend gedachten Geometrisierungsprogramms zu erfassen war. Und unter Berücksichtigung der inzwischen deutlich gewordenen irreduziblen Quanteneigenschaften von Materie und Wechselwirkungen konnte die im Rahmen des Geometrisierungsprogramms intendierte umfassende Theorie auch keine klassische Theorie im Sinne der Allgemeinen Relativitätstheorie mehr sein. Unter diesen Randbedingungen wurde aus dem klassischen Geometrisierungsprogramm von Einstein und Kaluza/Klein in den fünfziger und sechziger Jahren die vor allem von John Wheeler propagierte "Quantengeometrodynamik".[13] Ziel war es hierbei, immer noch auf der Grundlage der Riemannschen Differentialgeometrie respektive der quantenmechanischen Superposition Riemannscher Räume, alle Eigenschaften von Materie und Wechselwirkungen - d.h. unter Berücksichtigung ihrer inzwischen erschlossenen Quanteneigenschaften: von Materieteilchen und Wechselwirkungsquanten - als geometrische und topologische Eigenschaften einer dynamischen Raumzeit zu erfassen. Am Ende sollte - in völliger Umkehrung der Newtonschen Behälterauffassung des Raumes - nur noch die monistische Ontologie einer dynamischen Raumzeit übrig bleiben: leere Geometrie. Die einzige Substanz in der Welt wäre die Raumzeit. Alles andere liesse sich auf diese reduzieren. Unsere Welt wäre in dieser Darstellung eine quantenmechanische Überlagerung vierdimensionaler Riemannscher Mannigfaltigkeiten mit komplexen topologischen und metrischen Eigenschaften - nichts mehr. Alles andere, Materie und Kräfte, wären nur die diversen Ausdrucksformen des Verhaltens dieser dynamischen Raumzeit, des letztgültigen und umfassenden ontischen Substrats der Wirklichkeit. Materie(teilchen) und Wechselwirkung(squant)en entsprächen (mikroskopischen) geometrischen und topologischen Konstellationen bzw. den Komposita und Superpositionen dieser Konstellationen.[14] So sollten beispielsweise elektromagnetische Ladungen als Einstein-Rosen-Brücken (Wurmlöcher) zwischen dem normalen Raumzeitkontinuum und einem Spiegelraum verstanden werden, also als mehrfach zusammenhängende Topologie der Raumzeit.[15] Abhay

---

13 Siehe etwa Misner / Wheeler (1957) sowie Wheeler (1957) und (1962).

14 Ein neuerer Ansatz zur Verwirklichung dieser Grundidee findet sich in Bilson-Thompson / Markopoulou / Smolin (2006).

15 Hierbei lassen sich Singularitäten, die in ihrer Erfassung das modelltheoretische Instrumentarium der Differentialgeometrie überschreiten, vermeiden. Mehrfach zusammenhängende Topologien stellen für dieses Instrumentarium kein Problem dar.

Ashtekar sollte Wheelers Quantengeometrodynamik später als "Chemie der Geometrie" bezeichnen, auch wenn "Alchemie der Geometrie" sicherlich angemessener wäre:

> *"Wheeler also launched an ambitious program in which the internal quantum numbers of elementary particles were to arise from non-trivial, microscopic topological configurations and particle physics was to be recast as 'chemistry of geometry'."* (Ashtekar (2005) 4)

Die Quantengeometrodynamik als Geometrisierung aller Wechselwirkungen ist dann aber letztlich aufgrund der Einsicht in die zu erwartenden Quantenfluktuationen der Raumzeit und ihrer Topologie gescheitert. Wenn beispielsweise Ladungen als topologische Zusammenhangsformen des Raumes verstanden werden, so legt spätestens unser Verständnis des quantenfeldtheoretischen Vakuums für eine intendierte umfassende quantengeometrodynamische Beschreibung die Notwendigkeit des Einschlusses topologischer Fluktuationen für die Raumzeit nahe. Differentialgeometrische Modellierungen sind jedoch mit Topologiewechseln unvereinbar. Zudem erwiesen sich Spinfreiheitsgrade und insbesondere masselose Fermionenfelder im Rahmen der Quantengeometrodynamik und ihrer modelltheoretischen Voraussetzungen als nicht darstellbar. Dies alles machte das Programm der Quantengeometrodynamik zu einer konzeptionellen Sackgasse. [16] [17]

Nach den Scheitern der Wheelerschen Quantengeometrodynamik blieb erst einmal nur die zweite Strategie übrig: die einer Quantengravitation im Sinne einer quantenfeldtheoretischen Behandlung der Gravitation.[18] Um die Probleme, auf die diese Quantenfeldtheorie der Gravitation schliesslich gestossen ist, zu verstehen, ist es erforderlich, erst einmal einen Blick auf die physikalische und modelltheoretische Konzeption zu werfen, die den

---

[16] Fortgeschrittenere Varianten, die sich vielleicht der Quantengeometrodynamik subsummieren liessen, werden in den Kapiteln 3. und 6. anzusprechen sein.

[17] Wheeler hat dann schliesslich versucht, auf eine prägeometrische Beschreibungsebene auszuweichen. Diese sollte chaotische Quanteneigenschaften haben. Das raumzeitliche Geschehen sollte sich daraus als makroskopische statistische Mittelung ergeben. Er nannte dieses Konzept "Law-without-Law"-Physik (Wheeler 1979 und 1983). Von prägeometrischen Ansätzen soll in Kap. 6. die Rede sein.

[18] Zur historischen Entwicklung der verschiedenen Ansätze zu einer Theorie der Quantengravitation, siehe Rovelli (2000).

Quantenfeldtheorien und der Art und Weise, wie sie die übrigen Wechselwirkungen behandeln, zugrundeliegt:

Der quantenfeldtheoretische Ansatz

Die Quantenfeldtheorien[19] sind, was das ihnen zugrundeliegende Prinzip betrifft, Eichtheorien. Die konzeptionelle Grundlage von Eichtheorien besteht in der Forderung nach lokaler Eichinvarianz, also der Möglichkeit lokaler Eichtransformationen:

> *"One of the major developments of twentieth-century physics has been the gradual recognition that a common feature of the known fundamental interactions is their gauge structure."* (O'Raifeartaigh / Straumann (2000) 1)

Eichtransformationen sind Phasentransformationen einer freien Materiefeldgleichung; die Voraussetzung dafür ist die Formulierbarkeit eines Eichpotentials, auf das die Eichtransformationen angewandt werden. Das Eichpotential gehört zu dem jeweiligen Wechselwirkungsfeld. Das Eichprinzip in den Quantenfeldtheorien, das im wesentlichen in der Ausnutzung einer Redundanz in den möglichen Formulierungsweisen der Theorie besteht, liefert damit die Grundlage zur Beschreibung der Kopplung eines Materiefeldes und eines Wechselwirkungsfeldes. Formal lässt sich die lokale Eichfreiheit hinsichtlich des Eichpotentials - also die lokale Phaseninvarianz einer freien Materiefeldgleichung - durch Ersetzung der gewöhnlichen durch die kovariante Ableitung erreichen.[20] Die Kovarianz unter einer lokalen Symmetrie ist formal identisch mit der Forderung nach lokaler Eichinvarianz. Mittels der kovarianten Ableitung lässt sich das Wechselwirkungsfeld einführen:

---

[19] Gute Einführungen in die konzeptionellen Grundlagen und die philosophischen Probleme der Quantenfeldtheorien sind etwa Auyang (1995), Redhead (1983), Teller (1995), Cao (1999) und (1999a), Lyre (2004) sowie Kuhlmann / Lyre / Wayne (2002). Siehe zum aktuellen Stand der Quantenfeldtheorien auch Fredenhagen / Rehren / Seiler (2006).

[20] Vgl. etwa Lyre (2004).

> *"In order to obtain a gauge-invariant current we introduce the following device. Replace d/dx by a new sort of derivative d/dx - i A(x) where A transforms according to A -> A + d/dx a(x). Then the modified current [...] is gauge-invariant. But this has been achieved by introducing a new field A(x) as a necessary concomitant of the original field ϕ(x). [...] The requirement of local gauge-invariance can be seen as requiring the introduction of a magnetic interaction for the ϕ field."* (Redhead (2002) 290)

Für die jeweiligen Modalitäten, unter denen das Eichprinzip im Sinne lokaler Eichinvarianzen bzw. lokaler Eichkovarianzen in den Quantenfeldtheorien die mathematische Basis für die Beschreibung der Kopplung eines Materiefeldes und eines Wechselwirkungsfeldes liefert, sind, je nach Typus der Wechselwirkung, entsprechende Symmetrien bzw. Symmetriegruppen bestimmend:

> *"Symmetry is now taken as the primary guide into the structure of the elementary particle world, and the laws of change are derived from the requirement that particular symmetries, often of a highly abstract character, be preserved. Such theories are called 'gauge theories'. [...] These theories require the existence of the forces they govern in order to preserve the invariances upon which they are based. They are also able to dictate the character of the elementary particles of matter that they govern."* (Barrow (1995) 41)

So besteht das heutige "Standardmodell" der Elementarteilchenphysik aus der Glashow-Salam-Weinberg-Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung mit einer U(1) x SU(2)-Symmetrie und aus der Quantenchromodynamik der starken Wechselwirkung mit einer SU(3)-Symmetrie (Quarkmodell).[21] Die Quantenchromodynamik ist durch den Nachweis der Quarks als Streuzentren in Hochenergieexperimenten empirisch gut untermauert, wenn auch noch nicht alle ihre Implikationen vollends verstanden sind. Das Glashow-Salam-Weinberg-Modell der elektroschwachen Wechselwirkung ist eines der besten Beispiele für den Erfolg des Konzeptes der nomologischen Vereinheitlichung. Alle Versuche einer Beschreibung der schwachen Wechselwirkung, die nicht zuletzt für den radioaktiven Betazerfall verantwortlich ist, sind gescheitert, bis man schliesslich den Ver-

---

[21] Einen guten Überblick über diese beiden Theorien vermittelt etwa Becher / Böhm / Joos (1981).

such unternahm, die schwache gemeinsam mit der elektromagnetischen Wechselwirkung im Rahmen eines einheitlichen quantenfeldtheoretischen Ansatzes zusammenzufassen. Mit dem Nachweis der W-Bosonen der schwachen Wechselwirkung (CERN, 1983) und der ebenso vorhergesagten "neutralen schwachen Ströme" (CERN, 1973) konnte dieses Konzept einer immerhin partiellen nomologischen Vereinigung dann auch empirisch bestätigt werden. Und mittels des Konzepts der spontanen Symmetriebrechung lässt sich schliesslich erklären, wieso die niederenergetische Phänomenologie der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung unterschiedlich ausfallen:

> *"In elementary particle physics the standard model [...] is based on two key insights. The first is about unification of the fundamental forces. The second is about why that unification does not prevent the different particles and forces from have different properties. The unifying principle is that all forces are described in terms of gauge fields, based on making symmetries local. The second principle is about how the symmetries between particles and among forces can be broken naturally when those gauge fields are coupled to matter fields."* (Smolin (2004) 7)

Eine weitere nomologische Vereinigung der elektroschwachen Glashow-Salam-Weinberg-Theorie mit der Quantenchromodynamik der starken Wechselwirkung im Rahmen einer "Grand Unified Theory" (GUT) hatte allerdings bisher keinen Erfolg. Alle GUT-Ansätze postulieren Quark-Lepton-Übergänge; das gängigste Modell mit einer SU(5)-Symmetrie sagt diese mit Wahrscheinlichkeiten voraus, die zu einem Protonenzerfall mit einer Halbwertszeit unterhalb der experimentell nachweislichen Stabilität des Protons liegt. Alle weiteren GUT-Modelle zeigten sich bisher als ebenso erfolglos. Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik besteht also zur Zeit immer noch aus den Quantenfeldtheorien der elektroschwachen und der starken Wechselwirkung: keine vollständige nomologische Vereinheitlichung also, aber konzeptionelle Einheitlichkeit, was diese Wechselwirkungen betrifft.

Eines der fundamentalen konzeptionellen Probleme der Quantenfeldtheorien der elektroschwachen und der starken Wechselwirkung besteht nun allerdings darin, dass die meisten physikalisch relevanten Fragestellungen, insbesondere alle, die mit Wechselwirkungen zu tun haben, im Rahmen der

quantenfeldtheoretischen Ansätze nicht analytisch lösbar sind, obwohl diese, soweit es die freien Quantenfelder ohne Wechselwirkung betrifft, exakt und analytisch vorliegen:

> *"So far we have only considered non-interacting fields, but clearly, in reality there is no such thing as a 'free field' (how could we ever observe it?). One therefore has to incorporate interacting fields, but then the field equations become non linear [...]. In order to solve the resulting equations one has to consult perturbation theory, where solutions are approximated in terms of infinite power series in the coupling constant. However, the higher order expansion will inevitably include divergent terms that are due to the integration over internal loops [...]. [...] In order to cope with the infinities an ingenious procedure, called renormalization, has been developed."* (Kuhlmann / Lyre / Wayne (2002a) 15f)

Sobald Wechselwirkungen ins Spiel kommen, kommt innerhalb der Quantenfeldtheorien ein störungstheoretischer Ansatz zur Anwendung, der die einzelnen Beiträge der für eine Wechselwirkung relevanten Einzelprozesse aufaddiert. Sie tragen mit unterschiedlichem Gewicht bzw. unterschiedlicher quantenmechanischer Wahrscheinlichkeit zur Gesamtamplitude des Wechselwirkungsprozesses bei. Die einzelnen Prozesse, welche die Gesamtwechselwirkung im Sinne einer quantenmechanischen Superposition konstituieren, lassen sich symbolisch durch Feynman-Diagramme repräsentieren. Die Zahl der inneren Wechselwirkungsschleifen im jeweiligen Feynman-Diagramm entscheidet über das Gewicht des entsprechenden Beitrags, und damit darüber, in welcher Ordnung innerhalb der perturbativen Entwicklung (nach der Kopplungskonstante der entsprechenden Wechselwirkung) der jeweilige Einzelprozess einbezogen wird. Die störungstheoretische Vorgehensweise funktioniert dann sehr gut, wenn die niedrigeren Ordnungen der Reihenentwicklung schon die wesentlichen Beiträge zur Gesamtamplitude liefern, und die höheren nur zu immer kleineren Korrekturen führen, d.h. wenn die Reihenentwicklung konvergiert.

Wendet man die perturbative Prozedur innerhalb der Quantenfeldtheorien der elektroschwachen und der starken Wechselwirkung an, so ergeben sich aber unglücklicherweise divergente Reihenentwicklungen: also unendliche Werte für die zu berechnenden Gesamtamplituden. Man könnte nun meinen, dass dies das Aus für die propagierten quantenfeldtheoretischen Mo-

delle der elektroschwachen und der starken Wechselwirkung bedeutet. Mitnichten: Um die Divergenz des perturbativen Verfahrens zu beheben, wurde die Methode der Renormierung entwickelt. Renormierungsverfahren entsprechen formal der mathematisch konsistenten Transposition der perturbativen Divergenzen in die physikalischen Parameter der Theorie, die dann im Anschluss jedoch nicht mehr theoretisch vorhergesagt, sondern nur noch experimentell ermittelt werden können. Physikalisch entsprechen sie einem Übergang von den unendlichen Grössen der quantenfeldtheoretischen Selbstwechselwirkung von punktförmigen Entitäten auf eine ausschliessliche Behandlung effektiver Wechselwirkungsgrössen.

Die Quantenfeldtheorien der elektroschwachen und der starken Wechselwirkung haben sich allesamt als renormierbar erwiesen, allerdings um den Preis, dass das quantenfeldtheoretische Standardmodell zirka 20 freie Parameter enthält, deren numerische Werte nicht von der Theorie vorhergesagt werden, sondern allesamt empirisch zu bestimmen sind.[22] Die betroffenen Theorien können damit bestenfalls den Status effektiver Theorien für sich beanspruchen.

Ob sich diese freien Parameter und ihre Werte im Rahmen einer fundamentaleren Theorie erklären lassen, zu der die Quantenfeldtheorien des Standardmodells nur Näherungen mit Gültigkeit für spezifische Parameterbereiche liefern, oder ob die freien Parameter des Standardmodells ein Zeichen für eine grundlegende, irreduzible Kontingenz sind, ist zur Zeit noch unklar. Ziel sollte es jedoch erst einmal sein, zu versuchen diese Parameter abzuleiten. Erst wenn dies nicht gelingt und deutlich wird, wieso es nicht gelingt, kommt die These irreduzibler Kontingenz ins Spiel. Die Existenz einer derart grossen Zahl freier Parameter ist jedenfalls zweifelsohne eine der besten Motivationen für die Suche nach einer fundamentaleren Theorie.[23] Wünschenswert wäre es natürlich, wenn eine solche funda-

---

[22] Zu diesen Parametern des Standardmodells gehören etwa die Massen der fermionischen Materieteilchen (Quarks und Leptonen), der bosonischen Wechselwirkungsteilchen (Photon, W-Bosonen, Gluonen) und der Skalarfeldquanten (Higgs-Teilchen), die jeweiligen Kopplungsparameter für die einzelnen Wechselwirkungen sowie die Mischungswinkel zwischen den verschiedenen Wechselwirkungen. Siehe auch Tegmark / Aguirre / Rees / Wilczek (2006).

[23] Hierbei kann man sich angesichts der störungstheoretischen Prozeduren, der Divergenzen und der Notwendigkeit der Renormierung natürlich fragen, ob man mit den Quantenfeldtheorien eine geeignete modelltheoretische Grundlage gewählt hat, um die entsprechenden physikalischen Prozesse zu beschreiben. Vielleicht stellen die

mentalere Theorie erst gar keine perturbativen Divergenzen hervorbringen würde, die eine Renormierung mit allen ihren Folgen notwendig werden liesse. Ebenso wünschenswert wäre es, wenn eine solche Theorie mit einer geringeren Zahl an Parametern auskäme als das Standardmodell. Wenn man Kontingenz gänzlich ausschliessen wollte, müsste man auf eine Theorie mit bestenfalls einem freien Parameter setzen, der einer Kalibrierung auf unser Einheitensystem entspräche und konsequenterweise empirisch zu bestimmen wäre.

Neben dem Problem der freien Parameter gibt es eine ganze Reihe weiterer offener physikalischer Probleme des Standardmodells, für die man sich eine Antwort im Rahmen einer fundamentaleren Theorie erhofft. Zu diesen zählen etwa die Frage nach der Festlegung der Eichinvarianzen des Standardmodells und nach den physikalischen Ursachen für die jeweiligen Symmetriebrechungen. Ebenso wäre eine Erklärung für die Existenz und Zahl der Teilchengenerationen, für die Chiralität von Materieteilchen sowie für den Ursprung von Masse wünschenswert.[24]

Probleme das Resultat einer unangemessen Verwendung von Kontinuumsmodellen dar, die hier an ihre endgültige Grenze stossen. Vielleicht kommt man mit diskreten mathematischen Ansätzen weiter. Hierfür sprechen auch Argumente, die sich aufgrund der Konsequenzen der Bekenstein-Hawking-Entropie Schwarzer Löcher ergeben. Sie legen ein diskret strukturiertes Substrat und eine diskrete Raumzeit nahe; vgl. Kap. 6.2.. Gerard 't Hooft (1993) etwa argumentiert für Zelluläre Automaten als Modellgrundlage für den Bereich der Quantengravitation; Seth Lloyd schlägt dafür die Quantenversion zellulärer Automaten vor:

> *"But which computation corresponds to the universe we see around us? What is the 'mother' computation? We do not yet know. Candidate computations must be investigated to determine the ones that are compatible with observation. [...] A quantum cellular automaton is a natural choice for the computational substrate [...]."* (Lloyd (2005) 16)

Lloyd streicht allerdings heraus, dass die Frage der konkreten Modellierung eines diskreten Substrats letztendlich nicht entscheidend ist, wenn dazu eine Universelle Quanten-Turing-Maschine verwendet wird:

> *"In the end, the actual layout of the computation may not be so important. A key ability of a universal quantum computer is to simulate any other universal quantum computer. It may be that almost any universal computation will do for the computational universe."* (Lloyd (2005) 17)

Siehe hierzu auch Wolfram (2002) sowie Hedrich (2002c).

[24] In Bezug auf letzteres bietet der Higgs-Mechanismus des Standardmodell keine wirkliche Lösung, sondern nur eine Problemverlagerung. Er erklärt zwar das Zustandekommen von Teilchenmassen im quantenfeldtheoretischen Rahmen in dynamischer Weise, trägt aber nichts dazu bei zu erklären, was Masse letztendlich ist und wie es

Eine fundamentalere Theorie, innerhalb derer sich vielleicht die Erklärungsdesiderate des quantenfeldtheoretischen Standardmodells aufarbeiten liessen, wird sich aber vermutlich erst finden lassen, wenn das Problem der konzeptionellen Unverträglichkeit des quantenfeldtheoretischen Ansatzes mit der allgemein-relativistischen Gravitationstheorie gelöst ist. Die gesuchte Theorie der Quantengravitation könnte also ein wichtiger Schritt auf dem Weg hin zu einer fundamentaleren Theorie sein, wenn es sich nicht sogar herausstellen sollte, dass das Ergebnis der Suche nach einer Quantengravitationstheorie schon die Lösung des allgemeineren Problems darstellt.

Eine Quantenfeldtheorie der Gravitation ?

Wenn - wie das Scheitern der Wheelerschen Quantengeometrodynamik zeigt - die umfassende Geometrisierung aller Wechselwirkungen nicht ohne weiteres erreicht werden kann, so bietet sich für die Entwicklung der gesuchten Theorie einer Quantengravitation erst einmal vor allem die Strategie an, zu versuchen die Gravitation in den Kontext der Quantenfeldtheorien einzubinden. Das Ziel wäre eine konzeptionelle, modelltheoretische Vereinheitlichung einer solchermassen zu entwickelnden Quantengravitationstheorie mit den schon bestehenden Quantenfeldtheorien der elektroschwachen und der starken Wechselwirkung. Gravitation würde dabei, im Sinne aller anderen Wechselwirkungen, als Folge des Austauschs von Wechselwirkungsquanten zwischen Materieteilchen verstanden. Auf der Grundlage der phänomenologisch erschlossenen, dynamischen Struktur der gravitativen Wechselwirkung (langreichweitig, ausschliesslich anziehend) ergibt sich, dass das Wechselwirkungsquant ein masseloses Spin-2-Teilchen sein müsste: das sogenannte "Graviton".

Die seit den sechziger Jahren unternommenen Versuche, eine Einbindung der Gravitation mittels der sogenannten "Kovarianten Quantisierung" und mithin auf der Grundlage der Methoden der perturbativen Quantenfeld-

---

etwa zur Äquivalenz von schwerer und träger Masse kommt - eine Tatsache, die auch von der Allgemeinen Relativitätstheorie nicht erklärt wird, sondern gerade als phänomenologisches Faktum vorausgesetzt wird.

theorien zu erreichen, haben bisher nur den Schluss zugelassen, dass eine abschliessende Einbeziehung der Gravitation in den Kontext der Quantenfeldtheorien im Sinne einer entsprechenden Quantisierung des Gravitationsfeldes aus konzeptionellen Gründen nur schwerlich realisierbar zu sein scheint.[25] Die Gravitation ist offensichtlich mit dem Instrumentarium der Quantenmechanik und der Quantenfeldtheorien auf diese Weise nicht in Einklang zu bringen. Ein Symptom dieser Schwierigkeit besteht etwa in der Nicht-Renormierbarkeit der perturbativen quantenfeldtheoretischen Erfassung der Gravitation. Ursache hierfür ist wohl nicht zuletzt die Nichtlinearität der Gravitation, die schon in der Allgemeinen Relativitätstheorie zum Ausdruck kommt, respektive die Selbstwechselwirkung der Gravitonen. Die Gravitation koppelt an die Masse und, infolge der Masse-Energie-Äquivalenz, an die Energie an.[26] So ergeben sich für kleiner werdende Abstände und steigende Energien immer höhere Selbstwechselwirkungsbeiträge zur Gravitation, da infolge der unter diesen Bedingungen zunehmenden Energie der virtuellen Vakuumteilchen die höheren Glieder der perturbativen Entwicklung eine immer wichtigere Rolle spielen. Dies führt im perturbativen Ansatz für steigende Energien zu immer weiter steigenden, divergenten Beiträgen in der Reihenentwicklung. Die Divergenz ist, im Gegensatz zu den für die anderen Wechselwirkungen und ihre perturbative Behandlung auftretenden Divergenzen, infolge der Kopplung der Gravitation an die Energie nicht mehr kontrollierbar.[27] Gerade dies hat die Nicht-Renormierbarkeit der Gravitation in einem perturbativen quantenfeldtheoretischen Ansatz zur Folge:

> "*[...] such non-renormalizable theories become pathological at short distances [...] - perhaps not too surprising a result for a theory which attempts in some sense to 'quantize distance'."* (Callender / Huggett (2001 a) 5)

Letztlich ist die in der Nicht-Renormierbarkeit des perturbativen quantenfeldtheoretischen Ansatzes zur Quantengravitation zum Ausdruck kommende konzeptionelle Unvereinbarkeit der Allgemeinen Relativitätstheorie

---

[25] Siehe Kap. 3. Einen Überblick über die Versuche, mit dieser Problematik umzugehen, geben auch Callender / Huggett (2001a), Rovelli (1998) und (2001) sowie Kiefer (1994).

[26] Alle anderen Wechselwirkungen koppeln nur an ihre entsprechenden "Ladungen" an.

[27] Siehe etwa Giddings (2005).

mit den Quantenfeldtheorien bzw. der Quantenmechanik nicht sehr verwunderlich: Auf der Grundlage der Identität der Gravitation mit den metrischen Eigenschaften der Raumzeit innerhalb der Allgemeinen Relativitätstheorie lässt sich für eine quantenmechanische Behandlung der Gravitation, also eine Theorie der Quantengravitation, die Notwendigkeit einer Beschreibung ohne festen Hintergrundraum vermuten.[28] Wenn Gravitation mit den metrischen Eigenschaften der dynamischen Raumzeit identisch ist, so kann man nicht die Gravitation wiederum als Wechselwirkungsgeschehen auf einer statischen Raumzeit beschreiben wollen. Genau dies tun aber die Quantenfeldtheorien, die auf der Grundlage ihrer modelltheoretischen Konzeption notwendigerweise mit einer klassischen, statischen, quasiabsoluten, nicht ins dynamische Geschehen einbezogenen Raumzeit arbeiten. Schliesslich entspricht dies dem Versuch, die dynamische Raumzeit der Gravitation auf einer statischen Raumzeit zu quantisieren. Dass dies nicht funktioniert, sollte niemanden verwundern. Wahrscheinlich müsste eine Beschreibung der Gravitation als Folge des Austauschs von Wechselwirkungsquanten zwischen Materieteilchen gänzlich ohne die Voraussetzung einer Raumzeit auskommen. Eine Quantisierung der Gravitation entspricht nämlich, wenn die fundamentalen Einsichten der Allgemeinen Relativitätstheorie hinsichtlich des Verhältnisses von Gravitation und Raumzeit zutreffen, letztlich gerade einer Quantisierung der metrischen Eigenschaften der Raumzeit, also einer "Quantengeometrie". Für den Bereich, für den die Gravitation etwa die gleiche Stärke wie die anderen Wechselwirkungen annimmt - die Planck-Ebene[29] -, sind metrische und vielleicht

---

[28] Siehe Kap. 6.

[29] Die Planck-Grössen, welche die raumzeitliche Grössenordnung und den Energiebereich kennzeichnen, für den die Gravitation etwa die gleiche Stärke wie die übrigen Wechselwirkungen aufweisen sollte, und für den erwartungsgemäss nicht mehr über die Quanteneffekte der Gravitation und der Raumzeit hinweggesehen werden kann, ergeben sich als Kombination grundlegender Naturkonstanten, indem man die Compton-Wellenlänge eines materiellen Objektes mit seinem allgemein-relativistischen Schwarzschildradius gleichsetzt:

Planck-Länge: $l_P = ({}^{+}h\, G / c^3)^{1/2} = 1{,}62\ 10^{-35}$ m

Planck-Zeit: $t_P = ({}^{+}h\, G / c^5)^{1/2} = 5{,}40\ 10^{-44}$ sec

Planck-Masse bzw. -Energie: $m_P = ({}^{+}h\, c / G)^{1/2} = 2{,}17\ 10^{-5}$ g

$= 1{,}22\ 10^{19}$ GeV/c^2

(${}^{+}h$: Plancksches Wirkungsquantum, G: Gravitationskonstante,
c: Lichtgeschwindigkeit)

sogar topologische Fluktuationen und Unschärfen zu erwarten, die für die Beschreibung der Raumzeit und ihrer Eigenschaften eine "Theorie der Quantengeometrie" unabdinglich machen. Diese Theorie der Quantengeometrie kann aber ganz sicher nicht in einem perturbativen quantenfeldtheoretischen Ansatz erreicht werden. Vielleicht gibt es jedoch, wie zumindest einige Physiker vermuten, im Rahmen eines nicht-perturbativen Ansatzes zur Quantengravitation die Möglichkeit, das Problem des Hintergrundraumes zu überwinden.

> "*[...] perturbative quantum [general relativity] leads to even worse divergences, due to its non-renormalizability, but a full non-perturbative framework without any divergences may exist."* (Kiefer (2004) 3)

Einiges spricht dafür, dass der auf dem noch zu erörternden nicht-perturbativen Programm einer "Kanonischen Quantengravitation" aufbauende Ansatz der "Loop Quantum Gravity" hierzu in der Lage sein könnte.[30]

Quantengravitation durch nomologische Vereinigung aller Wechselwirkungen ?

Eine andere Strategie basiert auf der Vermutung, dass sich die Gravitation vielleicht nur gemeinsam mit den anderen Wechselwirkungen adäquat innerhalb eines quantenfeldtheoretischen Ansatzes beschreiben lässt und sich die Probleme, auf die eine Quantisierung der Gravitation erst einmal stösst, dabei auf wundersame Weise beseitigen oder vermeiden lassen. Anlass für eine solche Hoffnung liefern die Erfahrungen mit der schwachen Wechselwirkung. Alle Versuche, diese in ihrem dynamischen Ver-

---

> *"Max Planck, discoverer of the quantum, first noticed that certain basic physical constants can be combined to produce a quantity with the dimension of length. He did not know what this length might represent, but he argued that it is a 'natural' length, more significant than any length based on the sizes of objects in our everyday world [...]. The constants that Planck combined were the gravitational constant G from gravitational theory, the speed of light c from electromagnetic theory, and his quantum constant h."* (Wheeler / Ford (1998) 247)

Zur Problematik der Planck-Ebene in der Quantengravitation siehe auch Meschini (2006).

[30] Siehe Kap. 3.

halten zu beschreiben, endeten erst einmal in nicht-renormierbaren Theorien. Den Erfolg bracht dann schliesslich die Glashow-Salam-Weinberg-Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung, in der die schwache mit der elektromagnetischen Wechselwirkung nomologisch vereinigt wird:

> *"The success of the electroweak theory suggested a second line of attack. [...] The successful unification of electromagnetic and weak interactions suggested the possibility that a consistent theory would result only when gravity is coupled with suitably chosen matter."* (Ashtekar (2005) 6)

Vielleicht - so die Hoffnung - treten im Rahmen eines nomologisch vereinheitlichen Ansatzes, der gemeinsam mit allen anderen Wechselwirkungen auch die Gravitation einschliesst, die nicht-renormierbaren Divergenzen perturbativer Ansätze zur Quantisierung der Gravitation gar nicht mehr auf. Vielleicht heben sich die Divergenzen der gravitativen Wechselwirkung und die der anderen Wechselwirkungen gerade gegenseitig auf. Vielleicht macht die Einbeziehung der Gravitation also sogar die bisherigen, für die Quantenfeldtheorien der elektroschwachen und der starken Wechselwirkung erforderlichen, problematischen Renormierungsverfahren obsolet, so dass die Parameter der resultierenden Theorie nicht mehr experimentell bestimmt werden müssen, sondern vorhergesagt werden können.

Die für das Erreichen dieses Zieles einer umfassenden nomologischen Vereinigung naheliegende Strategie beruht, wenn man weiterhin auf Eichtheorien setzt, auf der Erfahrung, dass eine ausreichend grosse und angemessen ausgewählte Eichsymmetriegruppe der beste Weg ist, die Divergenzen zu beseitigen. Wählt man aber eine zu grosse Symmetriegruppe, so sind Bosonen mit Spin 3 oder mehr die Folge. Dies führt zu physikalischen Effekten, die mit der bekannten empirischen Phänomenologie unverträglich sind. Möglicherweise gibt es also nur wenige Theorien, welche die Symmetrien des Standardmodells als Untergruppen enthalten und gleichzeitig in der Lage sind, sowohl störungstheoretische Divergenzen als auch Bosonen mit höherem Spin als 2 zu vermeiden.

Diese Strategie hat aber im Rahmen der Quantenfeldtheorien nie zum Erfolg geführt. Es liess sich keine Quantenfeldtheorie mit den erforderlichen Symmetrieeigenschaften finden. Die nomologische Vereinigung aller Wechselwirkungen scheint sich auf diesem Wege nicht realisieren zu las-

sen.[31] Stattdessen kann der Stringansatz, als Erweiterung der Quantenfeldtheorien, jedoch gerade als Versuch gesehen werden, diese Strategie zu Ende zu bringen:

> "*Superstrings possess by far the largest set of gauge symmetries ever found in physics, perhaps even large enough to eliminate all divergences of quantum gravity. Not only does the superstring's symmetry include that of Einstein's theory of general relativity and the Yang-Mills theory, it also includes supergravity and the Grand Unified Theories (GUTs) as subsets."* (Kaku (1999) 4)

[31] Eine differenziertere Behandlung dieser Problematik findet sich in Kap. 3.

2. Der Stringansatz

2.1. Perturbative Stringtheorien: Gravitation, Supersymmetrie und höhere Dimensionalität

Der Stringansatz[32], so unvollständig er in mancher Hinsicht bisher auch sein sollte, ist zur Zeit der am weitesten ausgearbeitete Versuch einer das Vereinheitlichungsprogramm der Physik abschliessenden gemeinsamen Beschreibung aller Wechselwirkungen einschliesslich der Gravitation. Er erweitert die perturbativen Prozeduren der Quantenfeldtheorien von punktförmigen Entitäten ("Punktteilchen" als den Feldquanten der entsprechenden Materie- und Wechselwirkungsfelder) zu eindimensional ausgedehnten Objekten - den Strings - und ihren quantenmechanischen (Schwingungs- und Bewegungs-) Zuständen.[33]

Worin besteht aber der Vorteil dieses Übergangs? Wieso vollzieht man für eine Vereinigung aller Wechselwirkungen einschliesslich der Gravitation gerade einen Übergang zur Quantenmechanik eindimensional ausgedehnter Objekten? Dass eine Vereinigung aller Wechselwirkungen sich im Rahmen einer Quantenfeldtheorie, die von Punktobjekten als den Anregungszustän-

---

[32] Systematische Einführungen in den Stringansatz bieten etwa Lüst / Theisen (1989), Hatfield (1992), Kaku (1999), Polchinski (1994) (1999) (2000) (2000a) sowie Zwiebach (2004). Einen Überblick über die Literatur zum Stringansatz gibt Marolf (2003).

[33] Im klassischen Bild entspricht dies einem Übergang von der eindimensionalen Weltlinie (bzw. Trajektorie) eines Punktteilchens zum zweidimensionalen Weltblatt eines String. Die klassische Stringdynamik wird dann unter Berücksichtigung der Lorentz-Invarianz der Speziellen Relativitätstheorie quantisiert. So erhält man eine relativistische Quantentheorie der Dynamik eindimensional-ausgedehnter Objekte, um die es im folgenden erst einmal gehen wird. Im Rahmen einer zweiten Quantisierung sollte diese sich dann schliesslich zu einer Quantenfeldtheorie der Strings ("String Field Theory") erweitern lassen. Dass es hiermit letztendlich Probleme gibt und der formale Übergang von der Darstellung der Stringdynamik in der ersten Quantisierung zu der in der zweiten Quantisierung nicht ohne weiteres zu den gewünschten Ergebnissen führt, wird in Kap. 4.1. zu erörtern sein.

den der entsprechenden Felder handelt, offensichtlich nicht erreichten lässt, zumindest wenn man störungstheoretische Prozeduren zum Einsatz bringt, haben die bisherigen Versuche in diese Richtung und die bei diesen auftretenden nicht-renormierbaren Divergenzen überzeugend gezeigt. Wieso geht man aber von eindimensionalen und nicht gleich von zwei-, drei- oder höherdimensionalen Grundentitäten und ihrer Dynamik aus? - Scheinbar aus gutem Grund: Höherdimensionale Grundelemente führen, zumindest im perturbativen Ansatz,[34] wiederum zu unkontrollierbaren Divergenzen, die auf die inneren Freiheitsgrade dieser Grundelemente zurückgehen:

> *"One natural question is, why one-dimensional objects and not two-dimensional or higher? For this at least there is a simple answer. Extended objects have an infinite number of internal degrees of freedom (the Fourier modes describing their shape). Spreading out point particles into extended objects softens the spacetime divergences but introduces potential new divergences from the internal degrees of freedom. The latter grow worse as the dimension of the object increases, and the one-dimensional case is the only one for which both the spacetime and internal behavior is under control."* (Polchinski (1996) 6f)

Eindimensional ausgedehnte Grundelemente scheinen gerade den Vorteil zu haben, sowohl die raumzeitlichen Divergenzen von Theorien, die von punktförmigen Entitäten ausgehen, als auch die in den internen Freiheitsgraden begründeten Divergenzen von Theorien mit höherdimensionalen Grundelementen zu vermeiden. Sie scheinen diesbezüglich den idealen Kompromiss darzustellen.

Im Stringansatz gibt es im Gegensatz zu den Quantenfeldtheorien keine Wechselwirkungspunkte. Da die Strings sich (im klassischen Bild) nicht auf eindimensionalen Weltlinien, sondern auf zweidimensionalen Weltblättern bewegen, treten gerade nicht die Wechselwirkungsvertices auf, die zu den Divergenzen innerhalb der Quantenfeldtheorien führen und den Singularitäten in den Feynman-Diagrammen entsprechen. Die Weltblätter der Stringdynamik verbinden sich vielmehr in der Darstellung der Feyn-

---

[34] Die im Verlauf der Entwicklung des Stringansatzes zutagetretende Einsicht, dass auch höherdimensionale Entitäten eine Rolle spielen, ergibt sich dann auch konsequenterweise erst im nicht-störungstheoretisch erfassbaren Bereich der Stringdynamik. Vgl. Kap. 2.3. und 2.4.