

Ansätze zur Quantengravitation - fundamentale Physik am Rande des Begriffs der Naturwissenschaft

Autor: *Dr. Johannes Thürigen* / Projekt: *Ansätze zur Quantengravitation –
fundamentale Physik am Rande des Begriffs der Naturwissenschaft* / Art des
Projektes: *Dissertation*

*Approaches towards quantum gravity –
fundamental physics at the edge of 'science'*

KEYWORDS

*Quantum field theory, quantum gravity, loop quantum gravity, group field theory, quantum-
gravity phenomenology*

Eine der größten Herausforderungen in der Physik besteht darin, die beiden etablierten fundamentalen Theorien der makroskopischen und mikroskopischen Welt, also Allgemeine Relativitätstheorie und Quantentheorie, zu einer Quantentheorie der Gravitation zu verbinden. Da eine solche Theorie empirisch extrem schwer zugänglich ist, kommt philosophischen Argumenten sowohl bei der Rechtfertigung eines solchen Forschungsunternehmens als auch bei der Bewertung seiner Ergebnisse eine besondere Bedeutung zu. In dieser Arbeit setze ich eine Reihe moderner Ansätze zur Quantengravitation sowohl mit physikalischen als auch wissenschaftstheoretischen Methoden zueinander in Beziehung. Physikalisch vergleiche ich die Theorien durch geeignete Größen wie die effektiven Dimension der beschriebenen Raumzeitgeometrien. Philosophisch expliziere ich Struktur und Beziehungen der verschiedenen Theorien durch eine logische Analyse. Im Ergebnis deutet sich ein Kristallisationsprozess der Theorien hin zu einer einheitlichen Theorie der Quantengravitation an. Da Einheitlichkeit einen signifikanten erkenntnistheoretischen Mehrwert für eine naturwissenschaftliche Theorie beiträgt, könnte dies als nicht-empirische Bestätigung gewertet werden. Zur Stärkung dieses Arguments sollte neben der logischen Analyse weitere wichtige Dimensionen der Theorienentwicklung wie die historische oder soziologische ausgearbeitet werden.

One of the greatest challenges in physics is to merge the established fundamental theories describing the macroscopic and microscopic world, that is General Relativity and Quantum theory, into a quantum theory of gravity. As such a theory is extremely hard to access empirically, philosophical arguments become especially relevant for the justification of such a research endeavour as well as for the assessment of its particular results. In this work I relate several modern approaches towards quantum gravity using both methods from physics and philosophy of science. Physically, I compare the theories in terms of appropriate quantities such as the effective dimension of spacetime geometry. Philosophically I explicate the structure and relations of the different theories using a logical analysis. As a result there are indications for a crystallization process of theories towards a unified theory of quantum gravity. Since unification adds a significant epistemological value for a scientific theory, this might provide non-empirical corroboration. Besides a logical analysis, further elaboration of other relevant aspects of theory evolution such as the historical or sociological dimension should strengthen this argument.

Einleitung

Fragen nach Entstehung und Entwicklung des Universums beschäftigen die Menschen von jeher. Kosmologie wurde dabei seit den Vorsokratikern als ein Thema der Naturphilosophie verstanden. Diese Auffassung änderte sich mit der Entdeckung der Expansion des Universums durch rotverschobene Galaxienspektren schlagartig; spätestens seit immer präziseren Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung hat sich nicht nur ein theoretisches, sondern auch ein experimentelles physikalisches Fachgebiet der Kosmologie herausgebildet.

Dennoch ist schwer abzusehen, ob die physikalische Kosmologie jemals in der Lage sein wird, tatsächlich die selbst gestellten Fragen im vollen Umfang anzugehen. Das Fehlen einer fundamentalen physikalischen Theorie für diesen Bereich stellt nämlich ein zentrales Problem dar: Möchte man das sehr frühe Universum mit gleichermaßen großer Masse und kleiner Ausdehnung untersuchen, bedarf es einer Theorie, die die Erkenntnisse der Allgemeinen Relativitätstheorie mit denen der Quantentheorie kohärent zusammenbringt. Zwar gibt es mit Stringtheorien, Schleifenquantengravitation, Spin-Schaum-Modellen, Gruppenfeldtheorien und einigen anderen Ansätzen vielversprechende Kandidaten für eine solche Theorie der Quantengravitation; aber keine dieser Theorien ist bislang so weit entwickelt, dass überhaupt nur genügend klar wäre, wie sie mit den vorhandenen empirischen Ergebnissen der Physik in Verbindung zu setzen wäre. Dennoch gibt es in allen diesen Ansätzen schon Versuche, kosmologische Konsequenzen abzuleiten. Auf diese Weise entstehen Behauptungen von Multiversen, periodischen Universen und Ähnlichem, die sich auch über die Wissenschaft hinaus verbreiten, wenngleich sie so hypothetisch wie die zugrunde liegenden Theorien sind. Nicht nur dem populärwissenschaftlichen Publikum fällt die angemessene Bewertung solcher „physikalischer Resultate“ dabei mitunter schwer.

Aus diesem Grunde stellt die Kosmologie des frühen Universums sowie die fundamentalen Theorien, auf denen sie aufbaut, eine wichtige Schnittstelle zur Philosophie als Metawissenschaft dar. Die Physik ist nicht nur ein Gegenstand der Philosophie in dem Sinne, dass die Bedeutung der von ihr postulierten Entitäten und Zusammenhänge darüber hinaus hinterfragt werden können; physikalische Theorien werden auch als paradigmatische Beispiele für wissenschaftliche Theorien allgemein gesehen, an denen sich Struktur und Methode wissenschaftlicher Erkenntnis untersuchen lässt. Eine solche Wissenschaftsphilosophie ist zwar zunächst rein deskriptiv, kann dann aber normative Konsequenzen haben: Die Forschung an neuen Theorien sollte sich an Maßstäben der bekannten, erfolgreichen Theorien orientieren.

In diesem Sinne ist eine Interdisziplinarität zwischen Physik und Philosophie höchst Erfolg versprechend: Wissenschaftsphilosophische Erkenntnisse über die Strukturen der besten Theorien können eine entscheidende Hilfe bei der Entwicklung neuer Theorien sein. Gerade im Gebiet der Quantengravitation, für deren Entwicklung es nur sehr unzureichende Leitlinien im Rahmen der Physik selbst gibt, sollte eine derartige Wechselwirkung zwischen den Disziplinen fruchtbar sein. Wenngleich Physiker zumindest unterbewusst derartige philosophische Kriterien in der Forschung an neuen Theorien berücksichtigen, so ist diese Art der Interdisziplinarität doch nur viel zu selten anzutreffen.

Ein Ziel meiner Dissertation besteht darin, zu einer solchen wechselseitigen Befruchtung der Disziplinen einen Beitrag zu leisten, indem ich hier eine Reihe moderner Quantengravitationstheorien wissenschaftsphilosophisch auf ihre Struktur und ihre Beziehungen zueinander untersuche. Die resultierenden philosophischen Erkenntnisse sind dann wiederum Leitlinie für ein physikalisches Forschungsprojekt, nämlich der Untersuchung der effektiven Geometrie von Quantenzuständen des Raumes und der Raumzeit, wie sie sich durch verschiedene Beobachtungsgrößen ihrer Dimension beschreiben lässt. Insbesondere gibt es Resultate, dass die sogenannte "spektrale Dimension" solcher Quantengeometrien auf kleinsten Längenskalen einen geringeren Wert als makroskopisch beobachtet besitzt. Dies hätte tatsächlich bedeutende Konsequenzen für die Evolution des sehr frühen Universums [s. Fußnote 1, 2].

Im Folgenden diskutiere ich zunächst, warum es von Interesse ist, Struktur und Beziehungen von Quantengravitationstheorien zu untersuchen. Dann beschreibe ich die Methode einer solchen logischen Analyse. Schließlich skizziere ich die Ergebnisse und ihre Bedeutung. In all diesen Schritten beleuchte ich im Besonderen das Wechselspiel von philosophischen und physikalischen Fragestellungen und diskutiere die spezifischen Herausforderungen eines solchen Unterfangens. Zum Schluss fasse ich diese Reflexionen noch einmal unter dem Gesichtspunkt der Frage zusammen, wo sich die Grenzen, welche in einem solchen interdisziplinären Projekt zu überschreiten sind, eigentlich verorten lassen.

Theorienvergleich und Konvergenzbeziehungen

Der physikalische Ausgangspunkt meiner Arbeit ist die Frage nach einer effektiven fraktalen Struktur von Quantengeometrien. In Einsteins Allgemeiner Theorie der Relativität stellt sich Gravitation als Konsequenz einer Krümmung der Raumzeit heraus. Die Theorie beschreibt weiterhin, wie sich diese Geometrie als dynamische Größe entwickelt. Gemäß Superpositionsprinzip müssen in einer Quantentheorie der Gravitation Zustände des Raums nun Überlagerungen von Geometrien sein. Weiterhin sind diese Geometrien meist nicht mehr kontinuierlich, sondern weisen eine diskrete Struktur auf. Diese Eigenschaften einer Quantengeometrie führen dazu, dass man geeignete Beobachtungsgrößen finden muss, um überhaupt ein Verständnis ihrer Beschaffenheit zu entwickeln und sie im Grenzfall großer Längenskalen mit den bekannten kontinuierlichen Geometrien der Allgemeinen Relativität vergleichen zu können. Ein Beispiel solcher Größen sind spezielle Dimensionsbegriffe wie die Hausdorff-Dimension oder die spektrale Dimension. Darüber hinaus charakterisieren diese Größen in bestimmten Fällen auch selbstähnliche Strukturen wie Fraktale.

Tatsächlich ist eines meiner Resultate, dass eine sehr allgemeine Klasse von Quantengeometrien zwar auf großen Längenskalen diesbezüglich mit kontinuierlichen Geometrien übereinstimmt; auf sehr kleinen Längenskalen verringert sich der Wert der spektralen Dimension jedoch und die Bedingungen für eine fraktale Geometrie sind im speziellen Fall erfüllt [3].

Ein wichtiger Grund, Größen wie die effektive Dimension von Quantengeometrien einer Quantengravitationstheorie zu untersuchen, ist neben dem Resultat für sich auch die Möglichkeit

zum Vergleich mit anderen Ansätzen. Von experimenteller Seite gibt es bislang keine Ergebnisse, die klare Richtlinien oder Einschränkungen für die Entwicklung einer Quantentheorie der Gravitation implizieren würden. Dieser Freiraum hat zur Folge, dass es mittlerweile eine ganze Reihe verschiedenster Vorschläge für eine solche Theorie gibt. Wenn auch direkte experimentelle Überprüfbarkeit nicht in Reichweite ist, so ist es doch wichtig die Resultate der Theorien zu vergleichen. Allerdings ist selbst der Vergleich von Beobachtungsgrößen momentan eine große Herausforderung. Verschiedene Ansätze haben unterschiedliche Stärken und Schwächen, so dass sie konkrete Ergebnisse oft nur für unterschiedliche Fragestellungen vorliegen. Genau aus diesem Grund findet eine so einfache Größe wie die effektive Dimension von Raum und Raumzeit zur Zeit derart große Beachtung.

In dieser besonderen Situation bekommt die Frage nach der Beziehung zwischen konkurrierenden Quantengravitations-Kandidaten dazu noch eine verstärkte erkenntnistheoretische Relevanz. Die epistemische Stärke einer empirischen Theorie bemisst sich daran, wie gut sie die Phänomene beschreibt, vorhersagt und erklärt. Dies lässt sich zunächst durch das Spannungsfeld der Kriterien Allgemeinheit und Informativität beschreiben: Einerseits ist eine Theorie umso besser, je mehr Phänomene sie umfasst, andererseits muss sie diese auch möglichst präzise beschreiben. In der Geschichte wurde die Notwendigkeit neuer Theorien üblicher Weise offensichtlich, wenn entweder neue, mit der alten Theorien nicht zu erfassende Phänomene entdeckt wurden, oder wenn eine verbesserte Messgenauigkeit experimentelle Abweichungen von den Berechnungen der alten Theorie offenbarte. Im Fall der Quantengravitation trifft beides nicht zu. Hier wird ein oft übersehenes drittes Kriterium entscheidend, nämlich die Einheitlichkeit einer Theorie: Eine Erkenntnis bringende Theorie sollte die Phänomene systematisieren, also nicht nur ihre Vielzahl zusammenhangslos nebeneinander stellen, sondern ein zusammengesetztes Ganzes bilden. Dies kann formal durch Unzerlegbarkeit in Teiltheorien expliziert werden [4]. Meiner Meinung nach ist dieses dritte Kriterium der Hauptgrund, warum die Suche nach einer Quantentheorie der Gravitation wissenschaftlich gerechtfertigt ist, da Quantentheorie und Allgemeine Relativität bislang unverbunden nebeneinander stehen. Aber auch für die Suche nach der Quantengravitationstheorie kann dieses Kriterium von Bedeutung sein.

Bei einer Reihe von Ansätzen zur Quantengravitation lassen sich Konvergenzprozesse, oder genauer, ein Kristallisationsprozess feststellen. Wenn dieser Prozess tatsächlich zu einer Quantengravitationstheorie aus verschiedenen Ansätzen führt, kann dies den Erkenntniswert der Theorie tatsächlich schon verbessern, wenngleich er nichts daran ändert, dass die Informativität der Theorie, also die Übereinstimmung mit Experiment oder Beobachtung, bislang nicht zu prüfen ist. Denn auch in einem solchen Fall wird die Einheitlichkeit der Theorie verbessert, einfach nur indem verschiedene Theorien in einer Theorie aufgehen.

Die genaue Ausarbeitung eines solchen philosophischen Arguments stellt eine philosophische Herausforderung dar, die im Rahmen dieses interdisziplinären Projekts nur im Ansatz erfolgen konnte. In der Präsentation und Diskussion dieses Projekts mit Philosophen musste ich mich immer wieder der Frage stellen, inwiefern man in diesem Fall der Konvergenz von Quantengravitations-

ansätzen tatsächlich schon von erkenntnistheoretischen Mehrwert sprechen kann. Abhängig von den zugrunde liegenden erkenntnistheoretischen Überzeugungen, müsste man hier ganz verschiedene Argumente vertiefen. Als Beispiel sei die Bayessche Erkenntnistheorie genannt [5]; hier lässt sich wahrscheinlichkeitstheoretisch argumentieren, dass der Grad der Überzeugung von einer Theorie als Produkt eines Konvergenzprozesses tatsächlich steigt, wenn die vorherigen Theorien unabhängig voneinander sind. Eine solche Unabhängigkeit hat jedoch auch eine historische und soziologische Dimension. Eine historische Untersuchung der Theorien wäre dafür also nötig. In meiner Dissertation habe ich jedoch den Fokus auf die logische Analyse der Struktur der Theorien und ihrer Beziehungen gesetzt.

Die logische Struktur empirischer Theorien

Einen geeigneten formalen Rahmen zur Untersuchung der Beziehungen verschiedener Theorien bietet der wissenschaftstheoretische Strukturalismus [6]. Dabei versteht man Theorien nicht als Klassen von Aussagen, sondern als durch ein mengentheoretisches Prädikat definierte Modellmengen. Das bedeutet, eine Theorie ist direkt definiert als die Gesamtheit der physikalischen Systeme, die sie beschreibt, als Menge von Objekten mit einer spezifischen Struktur. Damit lässt sich nicht nur die innere Struktur von kleineren und größeren Theorieeinheiten sehr viel detaillierter rekonstruieren; es werden auch eine Vielzahl der Probleme der Aussagenkonzeption von Theorien beseitigt und Kohärenz mit den Ansätzen wie Thomas Kuhns Paradigmenwechseln oder den Forschungsprogrammen von Imre Lakatos gewährleistet. Außerdem werden keine unnötigen ontologischen Voraussetzungen benötigt – der Strukturalismus ist beispielsweise zunächst neutral gegenüber der Frage nach wissenschaftstheoretischem Realismus.

Gemäß der strukturalistischen Rekonstruktion lässt sich die komplexe Struktur empirischer Theorien durch Unterscheidung einer Reihe von Komponenten auflösen. Zunächst sind die Definitionen, welche den begrifflichen Rahmen der Theorie bilden, von den Definitionen zu unterscheiden, welche die Axiome und Gesetze der Theorie zum Ausdruck bringen. Erstere definieren die sogenannten „potentiellen Modelle“, also physikalische Systeme, die sich prinzipiell mit der Theorie beschreiben lassen. Die tatsächlichen Modelle der Theorie bilden eine durch die Gesetze definierte Untermenge dieser. Auf diese Art und Weise lässt sich ein ganzes Netz von Untertheorien bilden: Während die Menge der Modelle der Kerntheorie nur durch die allgemeinsten Gesetze bestimmt sind (zum Beispiel Newtons Kraftgesetz in der Mechanik), schränken weitere Gesetze die Modellmenge im Sinne spezieller Untertheorien weiter ein (zum Beispiel Newtons Gravitationsgesetz).

An dieser Stelle begegnet man einer typischen Herausforderung der Interdisziplinarität, nämlich der Mehrfachbelegung zentraler Begriffe. Während der Physiker von „Modellen“ spricht, wenn er Theorien mit beschränktem Anwendungsbereich und geringem Realitätsanspruch meint, bezieht sich „Modell“ beim Strukturalismus auf einen Fachbegriff der Logik, genauer, der Modelltheorie. Dies ist besonders verwirrend, weil auch in der Quantengravitation manche Theorien als Modelle bezeichnet werden. In meiner Arbeit habe ich daher entschlossen, in der strukturalistischen Theoriendefinition von „(physikalischen) Systemen“ statt von „Modellen“ zu sprechen. Es ist

jedoch nicht zu unterschätzen, wieviel Verwirrung durch solch eine Umbenennung zentraler Begriffe entstehen kann.

Die begriffliche Verwirrung kann als Symptom für die weitaus größere Herausforderung der strukturalistischen Analyse selbst gesehen werden. Tatsächlich stellt sich nämlich heraus, dass selbst mathematische Physiker den strukturalistischen Formalismus als sehr technisch empfinden. In dem Vorhaben, Quantengravitationstheorien strukturalistisch zu rekonstruieren treffen also mathematisch anspruchsvolle Theorien auf einen logisch sehr anspruchsvollen philosophischen Formalismus. Will man für Physiker verständlich bleiben, ist es also nötig, in der Darstellung der strukturalistischen Theorienkonstruktion nicht nur die Begrifflichkeiten, sondern auch die Stufe der logischen Formalität so weit wie möglich anzupassen.

Ansätze zur Quantengravitation im strukturellen Vergleich

Aus Sicht der Philosophen wiederum ist das Verstehen der Quantengravitationsansätze für sich schon interessant. In der Philosophie der Physik lässt sich die begrüßenswerte Tendenz feststellen, nicht nur die etablierten, vor langer Zeit entwickelten Theorien zu untersuchen, sondern sich auch mit moderner physikalischer Forschung auseinanderzusetzen. Auch die Quantengravitation ist mittlerweile zum Thema geworden. Dennoch sind manche der hier untersuchten Ansätze in der philosophischen Literatur noch nicht diskutiert worden. Entsprechend wichtig ist die verständliche Darstellung der Theorien. Dabei stellt sich wiederum die grundsätzliche Herausforderung, sehr komplexe physikalische Theorien auf ihre zentralen Elemente zu reduzieren und ihre Bedeutung allgemeinverständlich zu erklären. Als kleinen Geschmack für die Dimension dieser Herausforderung skizziere ich im Folgenden noch weiter vereinfacht und verkürzt die logische Analyse von simplizialer Quantengravitation, Schleifenquantengravitation, Spin-Schaum-Modellen und Gruppenfeldtheorie und ihren wechselseitigen Beziehungen.

Unter dem Begriff der simplizialen Quantengravitation lassen sich solche Ansätze zusammenfassen, die auf einer Triangulierung der Raumzeit, also einer Diskretisierung in Dreiecke, Tetraeder und Pentachora, sowie einer Beschreibung der Dynamik nach Regge [7] beruhen. Die Raumzeitgeometrie wird also die Kantenlängen einer Triangulierung beschrieben. Die Quantentheorie wird dann mithilfe des Pfadintegral-Formalismus durch eine gewichtete Summe über alle möglichen derartigen diskreten Raumzeitgeometrien definiert. Dabei lassen sich zwei Ansätze unterscheiden, die Quantisierung des Regge-Formalismus („quantum Regge calculus“, QRC) [8] und kausale dynamische Triangulierungen (CDT) [9]. Der Unterschied ist, dass in QRC alle Geometrien auf einer gegebenen, genügend feinen Triangulierung betrachtet werden, während in CDT über alle Triangulierungen mit einer festen Kantenlänge summiert wird. In QRC lassen sich verschiedene Versionen definieren abhängig von der genauen Form des Integrationsmaßes im Pfadintegral. In CDT besteht dieser Freiraum nicht, jedoch zeigt sich, dass eine weitere Einschränkung der Klasse von Triangulierungen durch Kausalitätskriterien für eine sinnvolle Theorie notwendig ist.

Bei der Schleifenquantengravitation (LQG) [10] handelt es sich um eine kanonische Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie in einer Formulierung als Eichtheorie. Sie beruht auf einer

Zerlegung (Blätterung) der Raumzeit in räumliche (3D-) Geometrien zu jedem Zeitpunkt, sowie auf einer Transformation der geometrischen Variablen in eine Form ähnlich den Quantenfeldtheorien des Standardmodells der Teilchenphysik. In Quantenzuständen sind diese Variablen dann auf Kurven („Schleifen“) im Raum konzentriert, oder allgemeiner auf die Kanten und Knoten von Graphen, den sogenannten „Spin-Netzwerken“. Durch Beobachtungsgrößen kann diesen Knoten ein Volumen zugesprochen werden und einer verbindenden Kante ein Flächenmaß zwischen solchen Volumen. Auf diese Weise können auch Spin-Netzwerke als diskrete Geometrien verstanden werden. Nach welchen dynamischen Gesetzen sich diese Zustände entwickeln, ist in LQG allerdings eine noch nicht abschließend geklärte Frage.

Die Theorie der Spin-Schaum-Modelle (SF-Modelle)[11] beruht logisch auf einer Formulierung der Allgemeinen Relativitätstheorie als Variante einer topologischen Quantenfeldtheorie. Für die topologische Quantenfeldtheorie kann das die Quantentheorie definierende Pfadintegral problemlos auf einer Diskretisierung (daher der Name „Schaum“) der Raumzeit berechnet werden. Spin-Schaum-Modelle lassen sich dann durch Hinzunahme der für die Relativitätstheorie spezifischen Gesetze definieren. Da diese Herleitung nicht eindeutig ist, werden gegenwärtig verschiedene Modelle diskutiert. Die Variablen lassen sich mit den Variablen der LQG zusammenbringen, so dass die Spin-Schäume als Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Spin-Netzwerke aufgefasst werden können. Aus diesem Grund wird bisweilen von Spin-Schaum-Modellen als kovarianter LQG gesprochen.

Aus logischer Perspektive gesehen verallgemeinert Gruppenfeldtheorie (GFT) [12] die Theorie der Matrixmodelle. Das Pfadintegral der Quantengravitation als gewichtete Summe über alle Geometrien kann für zwei Raumzeitdimensionen durch Matrizen, also Rang-zwei-Tensoren, als Variable definiert werden. Für die beobachteten vier Dimensionen macht es daher Sinn Tensoren vom Rang vier zu betrachten. Ein Gruppenfeld ist ein solcher Tensor mit kontinuierlichen Tensorindices gegeben durch Elemente einer (Lie-)Gruppe. Das Pfadintegral kann dann als Summe über diskrete Raumzeitgeometrien entwickelt werden. Insbesondere lässt sich zeigen, dass man für ein jedes Spin-Schaum-Modell eine Gruppenfeldtheorie findet, welche auf diese Art und Weise eine Summe über Spin-Schäume generiert.

Wenngleich diese Theorien grundsätzlich voneinander unterschieden sind, offenbart die ausführliche formale Analyse eine Vielzahl von Beziehungen, sowohl konzeptuell als auch physikalisch. Zunächst habe ich schon durch die Beschreibung der Theorien klargemacht, dass sie von ihrem Ursprung und Wesen zunächst gänzlich unterschiedliche Ansätze sind: QCR und CDT beruhen auf dem Regge-Formalismus, LQG auf einer kanonischen Quantisierung, SF-Modelle auf topologischen Quantenfeldtheorien, und GFT auf der Erzeugung von Zufallsgeometrien durch Tensormodelle. Dennoch gibt es eine Vielzahl von Überlappungen in der begrifflichen Struktur der Theorien (den „potentiellen Modellen“ im Sinne des Strukturalismus). An dieser Stelle führe ich nur als Beispiel die Tatsache auf, dass in alle Theorien die Raumzeit in der einen oder anderen Weise diskret ist. Auch wenn diese diskreten Strukturen sich im Detail und teilweise auch in der Interpretation unterscheiden, erlaubt dies doch durch weitere Spezifizierung Teiltheorien zu definieren, die dann tatsächlich begrifflich übereinstimmen.

Am wichtigsten sind jedoch eine Reihe von Beziehungen bezüglich der Gesetze, und damit der eigentlichen Physik dieser Theorien. Auch in diesem Sinne offenbart die logische Analyse, dass alle fünf Theorien gemäß in der Literatur bekannter Resultate miteinander verknüpft sind. Als Beispiele nenne ich die folgenden: Das Pfadintegral von SF-Modellen kann im Grenzfall der Quantentheorie zur klassischen Theorie als ein QCR-Pfadintegral umgeschrieben werden; auf diese Weise lässt sich ein Integrationsmaß von QCR aus SF-Modellen ableiten und man kann SF-Modelle als Antwort auf die Frage nach der richtigen Quantisierung des Regge-Formalismus sehen. Wie schon angedeutet, kann unter bestimmten Bedingungen auch die Dynamik der LQG durch ein SF-Modell beschrieben werden. Eine Summe über Spin-Schäume lässt sich darüber hinaus durch eine GFT definieren. Und schließlich sind die Geometrien von bestimmten Tensormodellen, also einer GFT im Spezialfall einer diskreten Gruppe, gerade die Triangulierungen mit fester Kantenlänge der CDT.

Insgesamt lässt sich die Vielzahl dieser Konvergenzbeziehungen am besten durch den kürzlich entwickelten Begriff einer Kristallisation von Theorien beschreiben. Jede der Konvergenzbeziehungen setzt Kompatibilität der Theorien durch passende Spezifizierung ihres begrifflichen Rahmens voraus. Konvergenz besteht daher immer nur für Teiltheorien in größeren Theoriennetzen. Der Begriff des Kristallisationsprozesses erfasst genau diesen Fall [13]; er ist bestimmt durch folgende Eigenschaften:

- (a) verschiedene, konkurrierende Theorien zu einer gegebenen Zeit,
- (b) wesentlich verschiedenen (Kern)Theorien, die aber einige Komponenten gemeinsam haben,
- (c) Übereinstimmung einiger spezieller Teiltheorien, insbesondere auch bezüglich ihres Anwendungsbereichs, und
- (d) Abschluss des Kristallisationsprozesses durch Etablierung einer Theorie.

Im Fall der Quantengravitationstheorien ist das erste Kriterium mehr oder weniger offensichtlich. Die logische Analyse der Theorien hat wie beschrieben gerade zum Ergebnis, dass auch das zweite und dritte Kriterium erfüllt sind. Ob das vierte Kriterium erfüllt wird, muss die Zukunft zeigen. Aus diesem Grund, charakterisiere ich die Forschung an diesen Theorien als einen Kristallisationsprozess im Werden.

Bei einem Kristallisationsprozess im Werden stellt sich natürlich interessante philosophische, und für die Physiker höchst relevante Frage, inwiefern damit auch ein erkenntnistheoretischer Mehrwert der Theorie(n) einhergeht. Es ist offensichtlich, dass eine Theorie, die schlußendlich aus einem Kristallisationsprozess erfolgreich hervorgeht, das Wissen über ihren Gegenstand vermehrt und verbessert. Als Beispiel kann der bereits ausgearbeitete Fall der Thermodynamik [14] gelten. Für einen Kristallisationsprozess im Werden ist eine solche Argumentation schwieriger, insbesondere wenn das Kriterium der Informativität der Theorien nicht direkt überprüft werden kann wie in der Quantengravitation. Dennoch erwarte ich, dass man mit dem Kriterium der Einheitlichkeit selbst in diesem Fall für eine erkenntnistheoretische Verbesserung argumentieren kann. Ein solches Unterfangen stellt ein interessantes Folgeprojekt zu diesem dar.

Eine Grenze zwischen Philosophie und Physik?

Eine überraschende Erkenntnis aus dieser interdisziplinären Arbeit und der Diskussion mit Philosophen und Physikern ist, dass die Grenze zwischen den Fächern verblüffend unscharf ist. Es gibt eine erstaunlichen Anzahl von Physikern, die sehr philosophisch interessiert sind und denken und umgekehrt, und man begegnet Ihnen mittlerweile auf einer beträchtlichen Anzahl von Konferenzen [15]. Dies Phänomen ist typisch für eine Zeit, in der sich physikalische Fragen nicht mehr im Rahmen etablierter Theorien umstandslos beantworten lassen, sondern der theoretische Rahmen selbst zum Forschungsthema wird. Das Gebiet der Quantengravitation ist gerade so ein Fall. In diesem Sinn lässt sich ein Kontinuum zwischen offenen Fragen der theoretischen Physik und der Philosophie der Physik feststellen. Die Arbeit des theoretischen Physikers steht im Spannungsfeld vom Berechnen und Lösen mathematischer Probleme, die sich aus physikalischen Fragen ergeben, und der konzeptuellen Arbeit sowohl in der Formulierung der Fragen als auch in der Interpretation der Resultate. Während die konzeptuellen Fragen in etablierten Bereichen der Physik meist schon in kanonischer Weise als beantwortet gelten und sich die Arbeit auf das technische Lösen von Problemen konzentriert, werden diese Fragen bei der Erforschung neuer fundamentaler Theorien wie der Quantengravitation ebenso wichtig und schwierig wie die mathematischen Probleme. An dieser Stelle gibt es eine große Überlappung mit der Philosophie der Physik, in der nicht nur aus physikalischen Erkenntnissen resultierende philosophische Fragen für sich, sondern gerade auch die begriffliche Basis dieser physikalischen Theorien untersucht werden.

Die Grenzen verlaufen stattdessen eher intradisziplinär entlang jener physikalischen und philosophischen Überzeugungen, die ein jeder bewusst oder weniger bewusst für sich voraussetzt. In diesem Sinne haben sowohl Philosophen als auch Physiker meist sowohl philosophische als auch physikalische zentrale Überzeugungen. Im Fall der Quantengravitation sind dies zum Beispiel: Glaubt man, dass die Theorie eine Quantenfeldtheorie für das Graviton ähnlich den anderen drei fundamentalen Wechselwirkungen sein sollte; oder erwartet man, dass notwendigerweise von vornherein alle geometrischen Freiheitsgrade der Gravitation quantisiert werden müssen. Ist man überzeugt, dass die Frage der Quantengravitation nur durch Vereinheitlichung aller fundamentalen Kräfte beantwortet werden kann; oder glaubt man, dass man mit einer Quantentheorie der reinen Gravitation starten kann und diese dann nur um die Felder der Elementarteilchen erweitern muss. Dies sind die zentralen Überzeugungen, welche nach wie vor den Graben zwischen Stringtheoretikern und Vertretern der hier untersuchten Theorien so tief erscheinen lassen. Im Fall der Philosophie hängt es oft am ontologischen oder erkenntnistheoretischen Ausgangspunkt. Glaubt man beispielsweise, dass die Ontologie fundamentaler physikalischer Theorien notwendiger Weise auf in Raum und Zeit verortbaren Entitäten aufbauen muss, beäugt man schon die in der Physik vollständig etablierte Quantentheorie kritisch und interessiert sich für alternative Formulierungen wie die Bohmsche Mechanik.

Solche Meinungsgegensätze sind also gerade bedingt durch eine immer komplexer werdende Wissenslandschaft, in der das individuelle Wissen stark von der eigene Geschichte der

Wissensaneignung abhängt. Mit meiner logischen Analyse von Quantengravitationstheorien und ihren Beziehungen sowie deren erkenntnistheoretischer Relevanz hoffe ich hier eine durch ihre Ungewöhnlichkeit hilfreiche neue Schneise geschlagen zu haben.

Fußnoten

- [1] G. Calcagni, Multi-scale gravity and cosmology, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 12 (2013) 041, [arXiv:1307.6382].
- [2] G. Amelino-Camelia, M. Arzano, G. Gubitosi, and J. Magueijo, Dimensional reduction in the sky, *Phys. Rev. D* 87 (2013) 123532, [arXiv:1305.3153].
- [3] G. Calcagni, D. Oriti, and J. Thürigen, Dimensional flow in discrete quantum geometries, *Phys. Rev. D* 91 (2015) 084047, [arXiv:1412.8390].
- [4] T. Bartelborth, *Begründungsstrategien: ein Weg durch die analytische Erkenntnistheorie*. Akademie Verlag, Berlin, 1996.
- [5] L. Bovens and S. Hartmann, *Bayesian Epistemology*. Oxford University Press, Oxford, 2004.
- [6] W. Balzer, C. U. Moulines, and J. Sneed, "An Architectonic for Science." D Reidel Pub Co, 1987.
- [7] T. E. Regge, General relativity without coordinates, *Nuovo Cimento* 19 (1961) 558–571.
- [8] R. M. Williams, Discrete quantum gravity: The Regge calculus approach, *Int. J. Mod. Phys. B* 6 (1992) 2097–2108.
- [9] J. Ambjorn, A. Görlich, J. Jurkiewicz, and R. Loll, Nonperturbative quantum gravity, *Phys. Rept.* 519 (2012) 127–210, [arXiv:1203.3591].
- [10] T. Thiemann, *Modern canonical quantum general relativity*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007.
- [11] A. Pérez, The Spin-Foam Approach to Quantum Gravity, *Living Rev. Relativity* 16 (2013) 3, [arXiv:1205.2019].
- [12] D. Oriti, The microscopic dynamics of quantum space as a group field theory, in *Foundations of Space and Time*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2012. arXiv:1110.5606.
- [13] C. U. Moulines, Crystallizations as a Form of Scientific Semantic Change: The Case of Thermodynamics, in *Evolution of Semantic Systems*, pp. 209–230. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [14] C. U. Moulines, The crystallization of Clausius's phenomenological thermodynamics, in *Time, Chance, and Reduction* (G. Ernst and A. Hüttemann, eds.), pp. 139–158. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2010.
- [15] Als Beispiel für interdisziplinäre Konferenzen mit Physikern und Philosophen in letzter Zeit: Reflections on Space, Time and their Quantum Nature, Potsdam 2012, www.workshops.aei.mpg.de/philqg/, Foundations of Physics, München 2013, www.foundationsofphysics2013.philosophie.uni-muenchen.de, Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Gravity, London 2014, dl.dropboxusercontent.com/u/81988497/WGMeeting2014/Welcome.html, Frontiers of Fundamental Physics 14, Marseille 2014, ffp14.cpt.univ-mrs.fr Emergent Time and Emergent Space in Quantum Gravity, Potsdam 2014, workshops.aei.mpg.de/emergentqg/, Why trust a theory, München 2015, www.whytrustatheory2015.philosophie.uni-muenchen.de

Curriculum Vitae

1983	geboren am 24.11.1983 in Potsdam
2003	Abitur, Canisius Kolleg, Berlin
2003–2004	Zivildienst (anderer Dienst im Ausland), Ai no Izumi (diakonisches Werk), Kazo (bei Tokyo), Japan
2004–2011	Studium der Fächer Physik und Philosophie, sowie Mathematik, Logik und Wissenschaftstheorie, in München und Hannover
02/2010	Diplom Physik, Ludwig-Maximilians-Universität, München. Betreuer (extern): Olaf Lechtenfeld, Leibniz Universität Hannover
07/2011	Magister artium, Ludwig-Maximilians-Universität, München. Betreuer: Carlos Ulises Moulines
2011–2015	Doktorand, am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut), Potsdam
07/2015	Promotion in theoretischer Physik, Humboldt Universität zu Berlin. Betreuer: Daniele Oriti, Gianluca Calcagni, Hermann Nicolai
2015–2016	Postdoktorand, am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut), Potsdam
2016–2017	Einjähriger Forschungsaufenthalt am Laboratoire de Physique Théorique, Université Paris Sud (XI)
Seit 2017	Institut für Physik, Humboldt-Universität zu Berlin

Publikationen

- C. Calcagni, D. Oriti, J. Thürigen, Dimensional flow in discrete quantum geometries, *Phys. Rev. D* 91 (2015) 084047 (11pp), [arXiv:1412.8390].
- D. Oriti, J. Ryan, J. Thürigen, Group Field Theory for all Loop Quantum Gravity, *New J. Phys.* 17 (2015) 023042 (46pp), [arXiv:1409.3150].
- G. Calcagni, D. Oriti, J. Thürigen, The spectral dimension of states of quantum geometry, *Class. Quant. Grav* 31 (2014) 135014 (33pp), [arXiv:1311.3340].
- G. Calcagni, D. Oriti, J. Thürigen, Laplacians on discrete and quantum geometries, *Class. Quant. Grav* 30 (2013) 125006 (36pp), [arXiv:1208.0354].
- O. Lechtenfeld, K. Schwerdtfeger, J. Thürigen, $N = 4$ Multi-Particle Mechanics, WDVV Equations and Roots, *SIGMA* 7 (2011) 023 (21pp), [arXiv:1011.2207].



Dr. Johannes Thürigen