


Die Möbiusschleife besitzt nur eine Kante und eine Fläche – ein Sinnbild für ein zuvor kontrahierendes Universum, das kontinuierlich in die heutige Expansionsphase überging.

# Ein Kosmos ohne Anfang?

Mit neuen Modellen wagen Theoretiker Aussagen über die Zeit vor dem Urknall. Der Ursprung der Welt wird zum Prüfstein für bestimmte Theorien der Quantengravitation.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CLAUDIUS SCHÄFER

Von Thomas Thiemann  
und Markus Pössel

Eine Frage, so alt wie die menschliche Kultur: Gab es die Welt schon immer oder hatte sie einen Anfang? Mit den vielfältigen mythischen Antworten (siehe Kasten auf S. 40) können sich Naturwissenschaftler nicht zufriedengeben. Sie haben in den letzten neunzig Jahren eine Vorstellung von der Entstehung der Welt entwickelt, die auf dem festen Boden der Relativitätstheorie steht und durch zahlreiche Beobachtungen gestützt wird: das Modell eines Universums, das vor knapp 14 Milliarden Jahren aus einem heißen, dichten Zustand entstand und seither stetig expandierte und abkühlte. In den einfachsten Modellvarianten kann man den Anfang der Welt in der heißen Frühzeit bis zu einer »Urknall-Singularität« zurückverfolgen, doch exakt dort stößt die Beschreibung an ihre Grenzen. An der Singularität wäre die Materiedichte unendlich hoch und der Raum unendlich eng zusammengezogen, und damit verliert das Modell seine Grundlage. Die Raum-Zeit-Geometrie, das Fundament von Einsteins Theorie, ist unter solchen Bedingungen nicht mehr definiert.

Eine Alternative bietet seit wenigen Jahren die so genannte Schleifen-Quantenkosmologie (*Loop Quantum Gravity*): Das Modell eines Kosmos, der schon immer existierte, aber bis vor rund 14 Milliarden Jahren so weit kontrahierte, dass seine Temperatur und Dichte alle jemals gemessenen Werte weit überstiegen – als

wäre die Masse der gesamten Erde auf weniger als ein Billionstel eines Billionstels des Volumens eines Atomkerns zusammengedrückt. Während das Volumen jeder beliebigen Raumregion auf null sank, wuchs die Dichte der darin enthaltenen Materie nicht über alle Grenzen an, sondern fiel – aller Anschaulichkeit zuwider – ebenfalls auf null ab. Unmittelbar darauf kehrte sich der Prozess um: Eine Expansionsphase begann, in der die Dichte zunächst wieder anstieg, bald aber wie gewohnt begann, mit zunehmender Ausdehnung abzufallen. Dann erst setzte die Entwicklung ein, die das Standardmodell der Kosmologie beschreibt: Ein stetig ausdünnendes, ab-

Physiker Martin Bojowald, damals an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule in Aachen, seit dem Jahr 2000 veröffentlichte – die erste kosmologische Anwendung der Theorie der Schleifen-Quantengravitation, die vielen Physikern als aussichtsreicher Wegbereiter einer umfassenden Beschreibung von Gravitation und Quantenwelt gilt. Allerdings musste Bojowald, der heute an der Pennsylvania State University in University Park arbeitet, die Zulässigkeit wesentlicher mathematischer Vereinfachungen, auf denen das Modell beruht, ohne Beweis voraussetzen. Zumindest einige dieser Vereinfachungen konnten seine Kollegen Abhay Ashtekar, Parampreet

## Für den Augenblick des Urknalls brechen Modelle der klassischen Kosmologie zusammen: Raum und Zeit sind nicht definiert

kühlendes Universum, in dem sich 400 000 Jahre später Atomkerne und Elektronen zu elektrisch neutralen Atomen verbinden und die kosmische Hintergrundstrahlung freisetzen; stetig verklumpende Materie, die schließlich jenes komplexe Netz von Galaxienhaufen bildet, das wir heute beobachten (siehe SdW 4/2007, S. 32).

Kollaps und anschließende Expansion des Kosmos – dieses Szenario stellt die weit verbreitete Vorstellung vom Urknall als Anfang der Welt in Frage. Es beruht auf Arbeiten, die der junge theoretische

Singh und Tomasz Pawłowski Anfang 2006 begründen und so das Modell auf solidere Füße stellen.

Diese Arbeiten markieren den aktuellen Stand einer Entwicklung, die 1917, im Geburtsjahr der modernen Kosmologie, ihren Anfang nahm. Damals erschien in den »Verhandlungen der preussischen Akademie der Wissenschaften« ein Beitrag, in dem der 37-jährige Albert Einstein erstmals zeigte, wie die Allgemeine Relativitätstheorie – seine zwei Jahre zuvor vollendete Beschreibung von Raum, Zeit und Gravitation – auf das Universum als Ganzes anzuwenden ist.

In einer Hinsicht ließ sich Einstein von den Denkgewohnheiten seiner Zeit leiten. Kaum jemand bezweifelte damals, der Kosmos sei statisch, also im Ganzen zeitlich unveränderlich. Um solch ein Universum beschreiben zu können, modifizierte Einstein die ursprünglichen Gleichungen, indem er eine »kosmologische Konstante« einführte. Sie liefert eine dem Raum innewohnende, universelle Abstoßung, die der gegenseitigen Anziehung der im All vorhandenen Massen exakt die Waage hält.

Mit der Festlegung auf ein statisches Weltall entging Einstein eine einzigartige Vorhersage. Im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie ist ein expandierender oder kollabierender Kosmos viel

## In Kürze

- ▶ Zahlreiche Beobachtungen stützen das Urknallmodell, dem zufolge die Welt aus einem **heißen, dichten Anfangszustand** hervorging und durch die Expansion des Raums abkühlte. Für den Ursprungsmoment führt es allerdings zu einer Singularität – einem Zustand unendlicher Temperatur, Dichte und Raumkrümmung. Das ist physikalisch unmöglich.
- ▶ Bisherige Versuche, diesen Zustand zu umgehen, machen Annahmen, die kaum überprüfbar sind. So schlägt die Stringtheorie unter anderem vor, unser Universum könne aus der **Kollision zweier Paralleluniversen** entstanden sein.
- ▶ Die Modelle der Schleifen-Quantenkosmologie beschreiben konsistent, wie ein existierendes Universum **kollabiert und anschließend expandiert**, ohne dass es zwischendurch zu einer Singularität kommt. Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung könnten schon bald Hinweise für diese Entwicklung liefern.

naheliegender. Hätte Einstein ein solches veränderliches Universum postuliert, wäre er zwölf Jahre später auf dramatische Weise bestätigt worden. Bereits 1929 erkannte Edwin Hubble vom Mount-Wilson-Observatorium bei Los Angeles auf Grund eigener Beobachtungen und solcher seines Kollegen Vesto Slipher vom Lick-Observatorium bei San Francisco, dass sich unser Kosmos tatsächlich ausdehnt.

In den folgenden Jahrzehnten diskutierten Kosmologen über zwei Weltmodelle, welche auf die Frage nach dem Anfang der Welt gegensätzliche Antworten lieferten. Der Urknalltheorie zufolge, die auf Arbeiten des russischen Mathematikers und Physikers Alexander Friedmann und des belgischen Physikers und Priesters George Lemaitre aus den 1920er Jahren zurückgeht, entstand die Welt aus einem stark verdichteten, energiereichen »Uratom«, das abrupt zu expandieren begann. Als Alternative schlugen Hermann Bondi, Thomas Gold und Fred Hoyle 1948 die Steady-State-Theorie vor, die ein Universum postuliert, das trotz stetiger Expansion im Durchschnitt unveränderlich ist und weder Anfang noch Ende hat. Das Absinken der Massendichte auf Grund der Expansion wird ausgeglichen, indem im intergalaktischen Raum fortwährend neue Materie entsteht.

### Beweise für die heiße Frühzeit

Nicht einmal zwei Jahrzehnte später gelang es, mit Hilfe astronomischer Beobachtungen zwischen den beiden Modellen zu entscheiden: Die Verteilung von Radiogalaxien, die gemessene Häufigkeit leichter chemischer Elemente sowie die 1965 entdeckte kosmische Hintergrundstrahlung stimmen mit den Vorhersagen des Urknallmodells überein, nicht aber mit denen der Steady-State-Theorie. Seither haben zahlreiche weitere Messungen das Bild eines heißen, dichten Anfangszustands mit anschließender Expansion, Abkühlung und Stukturbildung immer weiter untermauert.

Auch wenn das Urknallmodell im Einklang mit den Beobachtungen steht: Stößt man weit genug in die Vergangenheit vor, kommen immer größere Unsicherheiten ins Spiel. Immerhin: Bereits eine millionstel Sekunde nach dem Urknall war der kosmische Materie-Inhalt so weit verdünnt und abgekühlt, dass die

vorherrschenden Energien im Gültigkeitsbereich experimentell gut überprüfbarer Theorien der Teilchen- und Kernphysik liegen. Bis in eine Zeit vor der ersten milliardstel Sekunde können die Physiker die bekannten Naturgesetze extrapolieren; darauf fußt insbesondere die Vorhersage der so genannten Inflationsphase, einer äußerst kurzen Phase dramatisch beschleunigter Expansion, die sich als Teil des kosmologischen Standardmodells etabliert hat und für die jüngst Präzisionsmessungen der kosmischen Hintergrundstrahlung erste Belege liefern konnten (siehe SdW 5/2004, S. 46).

Dann jedoch ist die Singularität erreicht – üblicherweise als Anfang des Universums gedeutet, in einigen früheren Modellen aber auch als Zwischenstadium eines zyklischen Universums, das sich immer wieder ausdehnt, dann auf Grund seiner hohen Massendichte wieder kollabiert, um anschließend in eine neue Expansionsphase einzutreten. Doch wie immer man sie einordnet: An der Singularität stößt das Modell an seine Grenzen – die Geometrie der Raumzeit lässt sich dort nicht vernünftig definieren.

Das Problem ist recht offensichtlich: Einsteins Beschreibung lässt Effekte der Quantentheorie außer Acht, der zweiten Säule der modernen Physik. Von Festkörpern, Molekülen, Atomen und Elementarteilchen wissen wir aber, dass Quanteneffekte auftreten, wenn es um mikroskopische Größenskalen und extrem hohe Energien geht. Wenn uns das Urknallmodell schon keine gesicherten Erkenntnisse zum eigentlichen Weltanfang bietet, so sagt es uns zumindest, wie wir danach suchen sollten: mit Hilfe einer Theorie der Quantengravitation, die sowohl die Gravitation als auch die Gesetze der Quantenwelt berücksichtigt und uns deswegen eine gültige Beschreibung des frühen, extrem dichten Universums liefern könnte.

Allerdings gelang es den Forschern in den letzten sechzig Jahren trotz intensiver Bemühungen nicht, Quantenphysik und Allgemeine Relativitätstheorie zusammenzubringen – Erstere mit ihrer ungewohnten Welt der Wahrscheinlichkeiten, Letztere mit ihrem Verzicht auf eine »starre Bühne« von Raum und Zeit – und sie zu einer tragfähigen und vollständigen Theorie der Quantengravitation zu verbinden. Doch immerhin gibt es bei diesem Vorhaben ▷



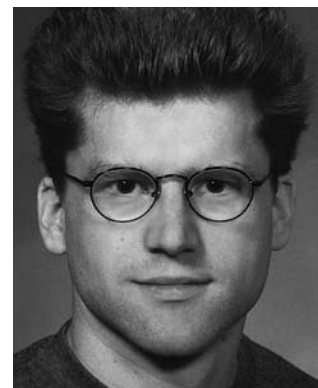
James Hartle



Stephen Hawking



Lee Smolin



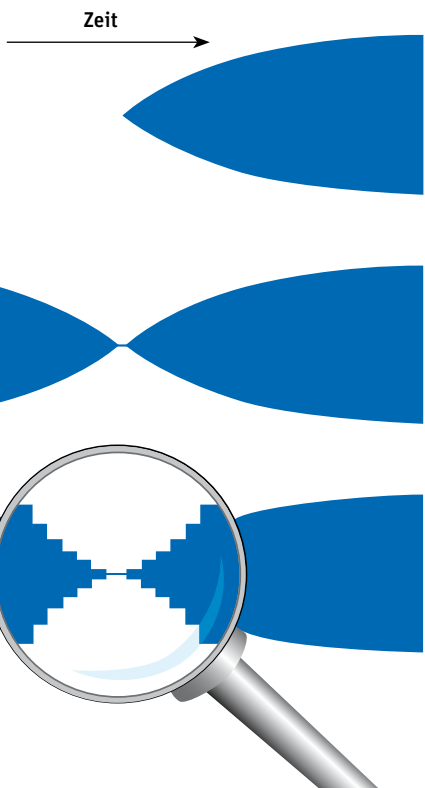
Martin Bojowald



▷ beachtliche Fortschritte – wenn auch nicht in einer einheitlichen Richtung, sondern im Rahmen verschiedener, konkurrierender Ansätze.

Auch mit kosmologischen Anwendungen haben sich die Forscher auf ihrer Suche nach der Quantengravitation immer wieder beschäftigt. Bereits 1983 formulierten James Hartle von der Universität von Kalifornien in Santa Barbara und Stephen Hawking von der Universität Cambridge eine Quantenkosmologie, die auf der so genannten Feynman-Formulierung der Quantentheorie beruht. Darin ergibt sich der heutige Zustand des Universums aus einer Summe aller »Geschichten« – das sind alle möglichen Entwicklungen, die zu diesem Zustand hätten führen können. Bemerkenswert

▼ **Im herkömmlichen Urknallmodell beginnt die Geschichte des Universums mit einer Singularität. Es folgt eine Expansion, die bis heute andauert (oben). In Modellen der Schleifen-Quantengravitation stellt der Urknall nur ein Zwischenstadium dar. Ein bereits existierendes Universum zieht sich zusammen, erreicht einen Wendepunkt und dehnt sich anschließend wieder aus (Mitte). In der Nähe des Wendepunkts lässt sich die Zeitentwicklung nicht mehr mit den klassischen Begriffen von Raum und Zeit beschreiben – stattdessen verändern sich dort Zeitschritt für Zeitschritt die Eigenschaften eines Quantenraums, hier durch die Stufenform angedeutet (unten).**



ist, dass die Zeit in dieser Beschreibung für das früheste Universum die Eigenschaft einer Raumdimension annimmt. Auch wenn man die Modelluniversen nicht unendlich weit in die Vergangenheit zurückverfolgen kann, lässt sich kein Rand oder Anfang identifizieren – so wie es auch auf einer Kugelfläche keinen Punkt gibt, von dem die Fläche ihren Anfang nimmt. Dieser Ansatz bringt eigene Probleme mit sich. So ist umstritten, inwieweit man die in der Elementarteilchenphysik üblichen Methoden für die Berechnung solcher Summen auf Einsteins gekrümmte Raumzeit übertragen kann.

Einer der gegenwärtig beliebtesten Ansätze für eine Theorie der Quantengravitation, die Stringtheorie, liefert gleich mehrere Szenarien für den Beginn des Universums. Sie setzt voraus, dass Teilchen, welche die herkömmliche Elementarteilchenphysik als ausdehnungslos betrachtet, tatsächlich winzige schwingende Saiten sind (siehe SdW 8/2004, S. 30). Zwischen den verschiedenen Varianten der Stringtheorie gibt es überraschende mathematische Wechselbeziehungen, so genannte Dualitäten. So kann etwa eine bestimmte Sorte von weit ausgedehntem Universum komplett äquivalent sein zu einem, das auf submikroskopisch kleine Abstände zusammengezogen ist. Mit Hilfe solcher Entsprechungen lässt sich ein Szenario beschreiben, in dem ein unendlich ausgedehntes, unendlich altes Universum kollabiert und – sobald eine gewisse Grenzdicke erreicht ist – aus einer heißen, dichten Anfangsphase heraus zu expandieren beginnt.

Andere kosmologische Modelle der Stringtheorie beschreiben einen dreidimensionalen Kosmos als eine Untermenge eines Universums mit mehr als drei Dimensionen, ähnlich wie eine zweidimensionale Fläche – man denke an ein Blatt Papier – in den dreidimensionalen Raum eingebettet sein kann. Kollidiert unser eigenes Universum mit einem weiteren oder kollidieren zwei Nachbaruniversen in der Nähe unseres eigenen, kann dies ebenfalls die dichte, heiße Anfangsphase unseres Alls oder eine Inflationsphase einleiten (siehe SdW 8/2001, S. 12). Andere Modelluniversen der Stringtheorie ähneln dem eingangs angesprochenen Bojowald-Szenario und kontrahieren, bis bestimmte Eigenschaften des Weltalls für einen

Rückprall sorgen und eine Ausdehnungsphase einleiten. Allerdings gehen in diese Modelle bislang noch eine Reihe von Zusatzannahmen ein. Weiterer Grund zur Skepsis sind für viele Kosmologen unbewiesene Grundannahmen der Stringtheorie selbst, etwa über die Existenz von zusätzlichen Raumdimensionen, für die es derzeit keinerlei experimentelle Hinweise gibt.

### Schleifen der Raumzeit

Könnte es auch mit weniger Hypothesen gelingen, Aussagen über den Anfang des Universums zu treffen? Dies verspricht die Schleifen-Quantengravitation, auf der auch Bojowalds Arbeit beruht. Dieser Ansatz soll die in der Allgemeinen Relativitätstheorie formulierte Geometrie der Raumzeit mit den grundlegenden Konzepten der Quantenphysik in Einklang bringen und geht dabei allein von empirisch gesicherten Annahmen aus – in der Hoffnung, daraus möglichst allgemein gültige Eigenschaften ableiten zu können, die jede Theorie der Quantengravitation aufweisen sollte.

Ihren Namen verdankt die Schleifen-Quantengravitation einer Formulierung der Allgemeinen Relativitätstheorie, die der indisch-amerikanische Physiker Abhay Ashtekar 1986 vorschlug und die in vieler Hinsicht Maxwells Theorie des Elektromagnetismus ähnelt. Von dieser übernimmt sie das Konzept der Feldlinien, die man etwa als Magnetfeldlinien kennt, die den Nord- und Südpol eines Stabmagneten verbinden.

Sowohl in der Maxwell-Theorie als auch in verwandten Theorien wie der Quantentheorie der starken Kernkraft, der so genannten Quantenchromodynamik, sind unter anderem geschlossene Feldlinien wichtig. Die Bedeutung solcher geschlossenen Feldlinien für die Ashtekar-Formulierung der Gravitation erkannten zuerst die Physiker Theodore Jacobson von der Universität Maryland, Carlo Rovelli, der heute an der Universität von Marseille arbeitet, sowie Lee Smolin, heute am Perimeter-Institut in Waterloo (Kanada). Die Schleifen erweisen sich als mikroskopische Grundbausteine des Raums, die so genannte Spin-Netzwerke bilden – Ensembles unvorstellbar vieler Schleifen, die sich an zahlreichen Orten schneiden (siehe SdW 3/2004, S. 54). Ein derartiges Netzwerk aus Punkten ▷

**ABHAY ASHTEKAR**, Direktor des Instituts für Gravitationsphysik und Geometrie der Pennsylvania State University in University Park, ist ein Mitbegründer der Theorie der Schleifen-Quantengravitation, die neben der Stringtheorie gegenwärtig der aussichtsreichste Ansatz für eine Theorie der Quantengravitation ist. Gemeinsam mit seinen Kollegen Parampreet Singh und Tomasz Pawłowski gelang es ihm Anfang 2006, ein Modell für die Zeit vor dem Urknall zu verbessern, das Martin Bojowald in den letzten Jahren entwarf.



Abhay Ashtekar

**Können Sie Ihren Ansatz in einfachen Worten beschreiben?**

In der Schleifen-Quantengravitation sind sowohl die Materie als auch die Geometrie der Raumzeit der Quantenmechanik unterworfen. Das Raum-Zeit-Kontinuum ist nur eine Näherung. Sie können es sich wie einen Stoff vorstellen, der aus eindimensionalen Quantenfäden gewoben ist. Dieses Gewebe ist so fein, dass es uns wie ein Kontinuum erscheint. Unter extremen Bedingungen, wie sie kurz nach dem Urknall herrschten, zerreißt es. Wir können es dann nicht mehr als Kontinuum beschreiben, sondern müssen das Schicksal einzelner Quantenfäden berechnen. Deren Verhalten wird durch die Einstein-Quantengleichungen bestimmt, die aus der Schleifen-Quantenkosmologie abgeleitet wurden, einer Theorie, die entsteht, wenn man die Schleifen-Quantengravitation auf symmetrische kosmologische Probleme anwendet.

**Welche Aussage trifft Ihre Theorie über den Urknall?**

Beginnen wir mit Verhältnissen, die unserem heutigen Universum entsprechen, und rechnen in die Vergangenheit zurück, verraten uns die Gleichungen, dass eine völlig neue abstoßende Kraft aufkommt. Diese wird extrem stark, sobald die Dichte der Materie einen Wert von etwa  $10^{94}$  Gramm pro Kubikzentimeter übersteigt, die so genannte Planckdichte. Diese Kraft übertrifft die Gravitation und bringt das Universum dazu zu expandieren. Anstelle eines Urknalls gäbe es demzufolge ein »Quantenfedern«. Wenn wir in der

Zeit noch weiter zurückgehen, dann finden wir ein Prä-Urknall-Universum, das kontrahiert.

**Sind in der Physik ähnliche Phänomene bekannt?**

Es gibt eine Analogie zum Lebensende massereicher Sterne. Haben diese ihren nuklearen Brennstoffvorrat verbrannt, kollabieren sie auf Grund der Gravitationskraft. Der klassischen Physik zufolge würde sich der Kollaps fortsetzen, bis der gesamte Stern auf ein winziges Volumen zusammengepresst ist. Dazu kommt es jedoch nicht, weil Quanteneigenschaften der Materie bedeutsam werden. Das geschieht nach dem so genannten Pauli-Prinzip, das den gleichen Effekt wie eine abstoßende Kraft hat, die den Kollaps stoppt, sobald die Materie die Dichte von Atomkernen aufweist.

**Auch in der Stringtheorie gibt es ein Prä-Urknall-Szenario. Worin unterscheidet es sich von Ihrem Modell?**

Im Gegensatz zu unserem Modell gibt es in der Stringtheorie keine Rechnung, welche die Zeit vor dem Urknall mit der danach konsistent verbindet. Das liegt daran, dass ihre Gleichungen eine kontinuierliche Raumzeit voraussetzen, doch diese bricht beim Urknall zusammen.

**Könnte es Spuren früherer Universen geben, die noch heute erkennbar sind?**

Das ist eine spannende Frage und ich denke, die Antwort ist ja. Ein Prä-Urknall-Universum würde zum Beispiel das Horizontproblem lösen. Das ist das Rät-

sel, warum die kosmische Hintergrundstrahlung so homogen erscheint, obwohl es kurz nach dem Urknall keine kausalen Beziehungen zwischen Raumgebieten gab, die wir in anderen Richtungen am Himmel sehen – selbst die Lichtgeschwindigkeit wäre dafür zu langsam gewesen.

Womöglich kann die Quantengravitation erklären, warum die Hintergrundstrahlung deutlich weniger Leistung auf großen Winkelskalen enthält, als das gegenwärtige Standardmodell der Kosmologie vorhersagt. Mit genaueren Messdaten könnte man die Theorie überprüfen. Das wird aber noch eine Weile dauern. Bis dahin sind die interessantesten Fragen theoretischer Natur.

**Welche Fragen sind das?**

Wird die Schleifen-Quantenkosmologie in der Lage sein, detailliert und widerspruchsfrei Szenarien der Inflation zu beschreiben, als das Universum kurz nach dem Urknall dramatisch expandierte? Produzieren ihre Gleichungen ein Bild, das unser Universum von damals bis heute zutreffend beschreibt? Auf solche Fragen konzentrieren wir uns gegenwärtig. Eine stimmige Theorie zu finden, die nicht beim Urknall zusammenbricht und die großen Strukturen des heutigen Universums erklärt, wäre schon ein Triumph.

Die Fragen stellte **Emanuela Buyer**. Sie ist Referendarin für Physik und Mathematik an einem Gymnasium in Singen sowie freie Wissenschaftsjournalistin.

▷ (Vertizes), die durch Kanten verbunden sind, bezeichnen Mathematiker als Graphen. Um den Zustand des Gravitationsfelds zu beschreiben, wird jeder Kante eine Zahl zugeordnet, ein ganzzahliges Vielfaches von  $1/2$ . Diese kodiert eine Eigenschaft, die man bei den Elementarteilchen der herkömmlichen Quantentheorien als »Spin« bezeichnet – eine Quantenversion des Drehimpulses.

Der zum Spin-Netzwerk gehörige Raum wird konstruiert, indem man zu jeder Kante eine Fläche wählt, die nur diese und keine andere Kante des Netzwerks schneidet. Untereinander schneiden sich diese Flächen nicht; ihre Ränder sind allerdings so verklebt, dass eine dreidimensionale Wabenstruktur entsteht. Das Bild auf der gegenüberliegenden Seite stellt einen Raum dar, der auf diese Weise aus Elementarflächen zusammen-

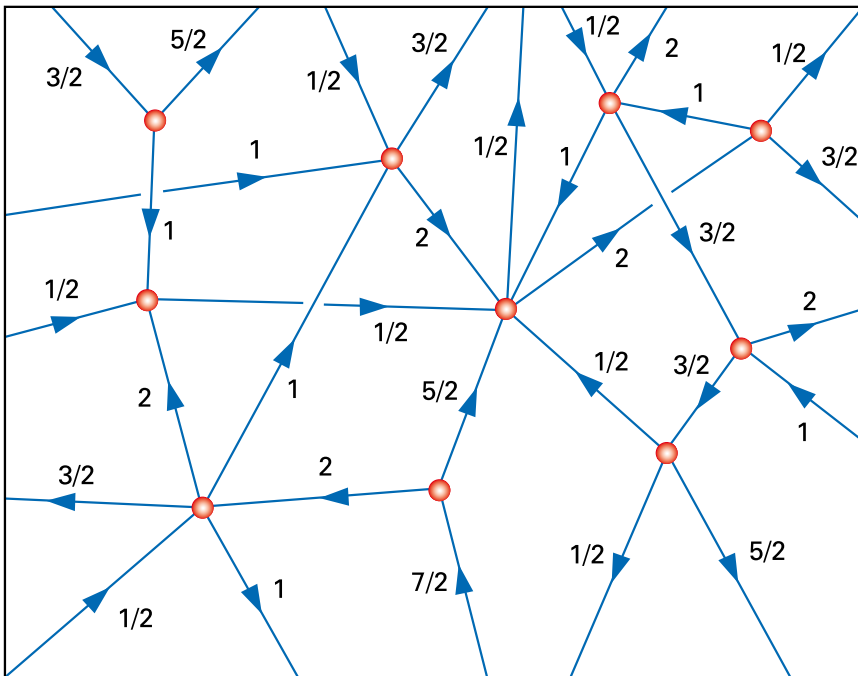
gesetzt ist. Der Flächeninhalt jeder der Teilflächen ist das Produkt der Spin-Zahl, die der entsprechenden Kante zugeordnet ist, mit einer winzigen Elementarfläche, die sich als Kombination der grundlegenden Naturkonstanten von Relativitätstheorie und Quantentheorie ergibt, der so genannten Planckfläche von  $10^{-66}$  Quadratcentimetern. Wenn wir der Einfachheit halber annehmen, dass die Kanten sämtlich die Spin-Zahl 1 tragen, dann würde man etwa  $10^{68}$  Schleifen benötigen, um die Geometrie eines Blatts Schreibmaschinenpapier zu konstruieren!

Das Raum und Zeit nicht beliebig teilbar sind, sondern sozusagen aus »Atomen«, also unteilbaren Einheiten, bestehen, vermuten manche Physiker schon seit Längerem (siehe SdW 4/2006, S. 40). Aus der Schleifen-Quantengravitation ergibt sich diese Quantelung auf natürliche Weise: Eine Fläche wie die des erwähnten Blatts Papier lässt sich nicht unendlich fein zerteilen, sondern allenfalls in Stücke, die jeweils die Größe der Planckfläche aufweisen.

Wer ein expandierendes, kollabierendes oder sonstwie zeitlich veränderliches Universum beschreiben will, muss wissen, wie sich die Raumgeometrie mit der Zeit ändert. Die Zeitentwicklung der Spin-Netzwerke wird durch eine Quantenversion von Einsteins Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie bestimmt; dieser erstmals von Thomas Thiemann abgeleiteten Dynamik zufolge vergeht die Zeit diskret, wobei jeder Schritt der Dauer der so genannten Planckzeit von  $10^{-43}$  Sekunden entspricht. Schritt für Schritt ändern sich die Spin-Zahlen auf den Netzwerkkanten nach bestimmten Regeln – sie bleiben entweder gleich, werden um  $1/2$  größer oder um diesen Betrag kleiner.

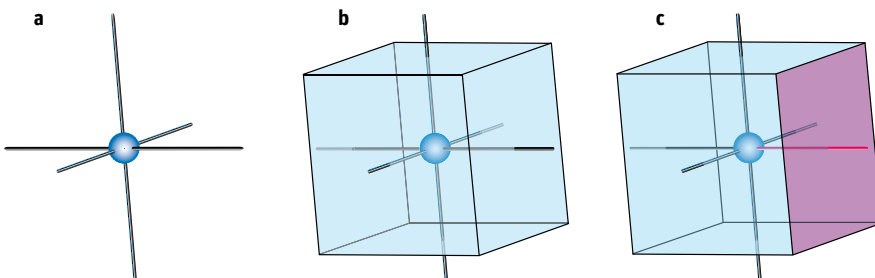
Nimmt eine Spin-Zahl den Wert null an, verschwindet die entsprechende Kante. Umgekehrt können Kanten aus dem Nichts entstehen, wobei »Nichts« hier keineswegs für den materiefreien Raum des Vakuums steht. Vielmehr ergibt sich in diesem Fall eine neue Raumregion, wo vorher nur Raum geringeren Volumens existierte. Das Spin-Netzwerk liegt demzufolge nicht »im Raum«, sondern es ist der Raum selbst. Jegliche Materie kann nur auf seinen Kanten oder Vertizes existieren. Indem die Schleifen-Quantengravitation eine Quantenversion des Raumes definieren und zudem angeben kann, wie

▼ **Ausschnitt aus einem Spin-Netzwerk:** Es besteht aus Knotenpunkten (rot) sowie Linien, die in bestimmter Richtung von einem Knotenpunkt zu einem zweiten führen (blau). Jeder Linie ist ein Spin-Wert zugeordnet – ein ganzzahliges Vielfaches von  $1/2$ . Jedem Knotenpunkt ist ebenfalls ein Zahlenwert zugeordnet (hier nicht gezeigt).



ABBILDUNGEN DIESER SEITE: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSSE-GRAPHIK

▼ **Spin-Netzwerke definieren einen aus elementaren Bausteinen konstruierten Raum.** Hier ist der anschaulichste Fall dargestellt, ein Knoten mit sechs angrenzenden Linien (a). Dieser Ausschnitt definiert eine würfelförmige Raumregion (b). Jeder der Linien entspricht diejenige Würfelfläche, die von der Linie durchstoßen wird; ein Beispiel ist in (c) zu sehen (rote Linie durchstößt rote Fläche). Der Flächeninhalt einzelner Würfelflächen lässt sich nicht aus der Abbildung erschließen, sondern ergibt sich aus dem Spin-Zahlenwert, welcher der betreffenden Linie des Spin-Netzwerks zugeordnet ist. Das Volumen des Würfelbausteins ergibt sich aus dem Zahlenwert, der zum betreffenden Knotenpunkt gehört.





sich dieser Raum mit der Zeit verändert, scheinen gute Voraussetzungen gegeben zu sein, um ein entsprechendes kosmologisches Modell zu formulieren. Doch leider sind die Quanten-Einsteingleichungen der Schleifen-Quantengravitation höchst kompliziert. Wer daraus zu physikalischen Erkenntnissen kommen will, muss – zum Teil drastisch – vereinfachen.

Die wesentliche Vereinfachung, die Martin Bojowald vornahm, beruht auf Symmetrieanahmen, wie sie auch den klassischen kosmologischen Modellen zu Grunde liegen – dem Bild einer Welt, die homogen und isotrop ist, mit anderen Worten: für jeden Beobachter dieselben Eigenschaften aufweist, egal wo sich dieser befindet und in welche Richtung er schaut. Diese Annahme schränkt die Dynamik eines Modelluniversums stark ein. Während die zeitliche Entwicklung der Materiedichte in einem inhomogenen Kosmos für jeden Punkt im Raum einzeln verfolgt werden muss, reicht es im homogenen Fall aus, die Evolution eines einzigen Werts zu beschreiben, die der mittleren Dichte. Dank solcher Vereinfachungen konnte Bojowald die Entwicklung seines Modelluniversums tatsächlich Zeitschritt für Zeitschritt berechnen. Sein Ergebnis ist das eingangs beschriebene Szenario, mit dem er die Schleifen-Quantenkosmologie (*Loop Quantum Cosmology*) begründete.

### Ungewisse Vereinfachungen

In der kritischen frühesten Phase, die in den klassischen Modellen mit der Urknallsingularität beginnt, tritt im Schleifen-Modell die durch Spin-Netzwerke beschriebene Quantengeometrie in den Vordergrund. Die Entwicklung lässt sich mit dem herkömmlichen Raumbegriff nicht beschreiben. Zwar schrumpft das Volumen des Universums in dieser Phase auf null, doch ohne dass seine Dichte ins Grenzenlose steigt. Eine Singularität tritt nirgends auf. Damit erfüllt das Modell eine lang gehegte Hoffnung der Theoretiker.

Abhängig von seinem Gehalt an Materie und Energie setzt ein solches Modelluniversum seine Expansion immer weiter fort – was für unser Universum zu gelten scheint – oder es kollabiert nach langer Zeit erneut. Demnach gäbe es keinen Anfang der Welt. Das Universum hätte schon immer existiert.



▲ Diese Visualisierung des gequantelten Raums ordnet jeder Elementarfläche eine Farbe zu. Diese ist gemäß des Spin-Werts der entsprechenden Spin-Netzwerk-Kante kodiert und orientiert sich an der Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Große Flächen (mit großem Spin-Wert) sind violett, kleine rot dargestellt. Das eigentliche Spin-Netzwerk ist nicht gezeigt. Was hier wie leerer Raum zwischen den Teilflächen aussieht, hat tatsächlich weder Volumen noch Flächeninhalt; dort ist kein physikalischer Raum definiert.

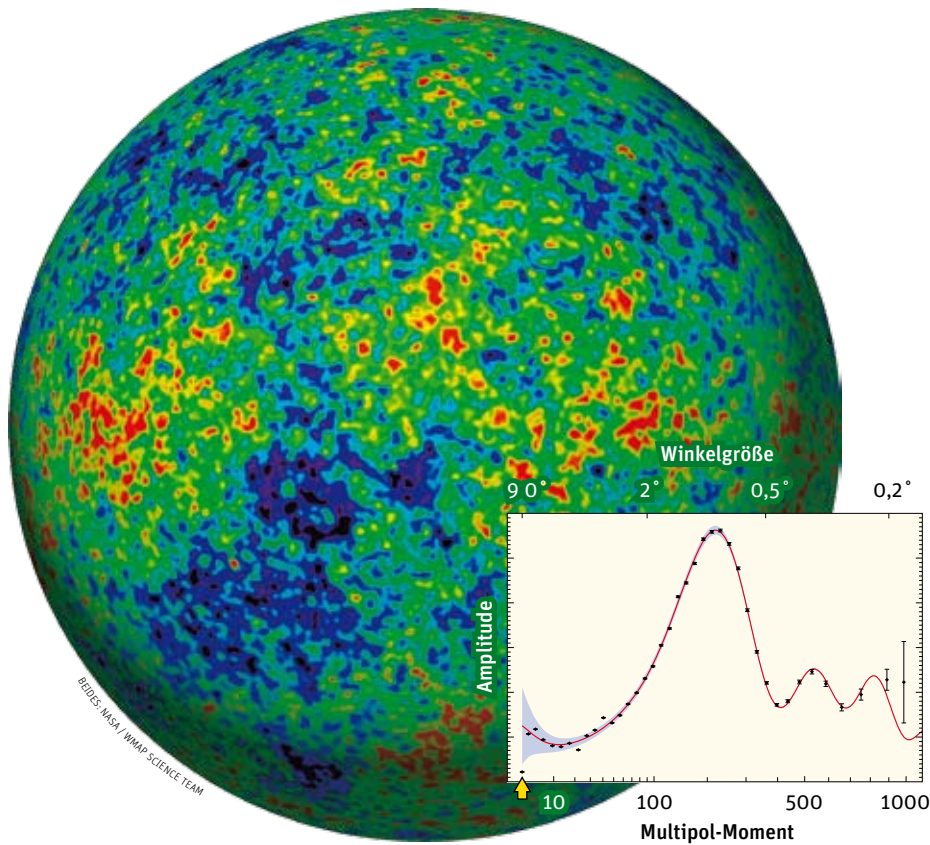
Allerdings hatte Bojowald mit seinen Arbeiten noch nicht gezeigt, inwieweit die grundlegenden Vereinfachungen des Modells tatsächlich zulässig sind. Dass ein Universum nicht auf Dauer vollkommen homogen sein kann, folgt aus dem so genannten Unschärfeprinzip der Quantentheorie. Diesem zufolge ist es beispielsweise unmöglich, den Ort eines Teilchens exakt zu bestimmen und gleichzeitig die Änderungsrate dieses Orts, also die Teilchengeschwindigkeit, exakt auf null zu halten. Entsprechend können in einem gegebenen Universum nicht sowohl die Abweichungen von der Homogenität als auch die Änderungsraten dieser Abweichungen – aus denen sich die Abweichungen zu einem etwas späteren Zeitpunkt ergeben – exakt null sein. Ob ein annähernd homogenes Quantenuniversum trotzdem näherungsweise homogen bleibt, ist ungewiss.

Dass Vorsicht geboten ist, wiesen Thomas Thiemann und sein damaliger Doktorand Johannes Brunnemann in einer vor zwei Jahren veröffentlichten Arbeit nach. Ihr Modell beruht zwar ebenfalls auf einer vereinfachten Version der Quantenzustände eines Schleifen-Uni-

versums, lässt jedoch nicht nur homogen-isotrope Universen zu, sondern auch solche mit realistischen Dichteschwankungen. Die Vorhersagen unterscheiden sich in einiger Hinsicht deutlich von Bojowalds Modell, denn unter den inhomogenen Universen gibt es auch solche, in denen die Dichte beim Urknall unendlich groß wird. Diese bleiben jedoch in gewisser Weise »unter sich« und entwickeln sich nicht zu ausgedehnten Universen wie dem unseren. Zumindest für ausgedehnte Universen scheint die Schleifen-Quantengravitation das Problem der Singularitäten tatsächlich zu beheben.

Neben den grundlegenden Symmetrieanahmen ist Bojowalds Modell noch in anderer, weniger anschaulicher Sicht vereinfacht – grob gesprochen verwendet es einen vereinfachten Dialekt der mathematischen Sprache, in der Quantentheorien formuliert sind. Im Hinblick darauf gelang es Abhay Ashtekar, Parampreet Singh und Tomasz Pawłowski (alle drei sind Bojowalds Kollegen an der Pennsylvania State University) Anfang 2006, die Schleifen-Quantenkosmologie auf eine mathematisch solidere Grundlage zu stellen. Sie wiesen nach, ▷





◀ Projektion der mit dem Satelliten WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) gemessenen Temperaturfluktuationen auf eine Kugel. In den roten und blauen Bereichen liegt die Temperatur über beziehungsweise unter dem Mittelwert von 2,73 Kelvin. Das mit WMAP gemessene Leistungsspektrum der Temperaturfluktuationen zeigt an, wie stark Fluktuationen mit einer bestimmten Winkelgröße zum Gesamtbild des Fluktuationenspektrums beitragen. Die Punkte stellen die Messwerte dar, die rote Kurve ist die Anpassung des kosmologischen Standardmodells, die am besten den Messdaten entspricht. Der graue Bereich beschreibt die Variation, die großräumige kosmische Strukturen hervorrufen. Der Pfeil zeigt an, auf welcher Winkelskala die im Text erwähnten Variationen des thermischen Spektrums liegen sollten, die Stefan Hofmann und Oliver Winkler auf Grund der Theorie der Schleifen-Quantengravitation erwarten.

## DIE WELT VOR DER WELT

**E L'UNIVERSO FA BUM – BUM – BUM** («Und das Universum macht bumm – bumm – bumm»). Ob der italienische Liedermacher Paolo Conte beim Schreiben seines Lieds »Architettura lontana« (Ferne Architekturen) an das Bild eines zyklischen Kosmos dachte, der aus seinen eigenen Trümmern neu entsteht, ist ungewiss. Fest steht jedoch, dass Menschen in zahlreichen Kulturen darüber rätselten, ob es vor unserer Welt eine andere gab.

Es überrascht nicht, diese Vorstellung bei agnostischen Philosophen zu finden, denn deren Kosmologie muss auf einen Schöpfergott verzichten. In »Der Wille zur Macht«, nach seinem Tod erstmals 1901 veröffentlicht, schreibt Friedrich Nietzsche, es habe die Welt schon immer gegeben und sie werde für immer existieren. Das Universum sei eine in zahlreichen Zentren konzentrierte Energie und füge sich in einer unendlichen Folge von Zyklen neu zusammen. Für einen Gott gebe es darin keinen Platz.

Der Schriftsteller Edgar Allan Poe war anderer Meinung. In der Society Library, einer kleinen New Yorker Bibliothek, sprach

er 1848 darüber, wie der Kosmos im Gleichklang mit dem Herzen Gottes periodisch zusammenschrumpfe und dann erneut expandiere. Nur wenige Zeitgenossen wollten das akzeptieren, doch Poe konnte einen alltäglichen »Beweis« für seine Kosmologie angeben: die Dunkelheit der Nacht. In einer (gegenwärtigen) Welt von endlichem Alter könne das Licht der Sterne mit seiner endlichen Geschwindigkeit nicht das Weltall füllen, und deswegen sei dieses finster. Damit kam er der modernen Erklärung näher als berühmte Gelehrte wie Johannes Kepler und Edmond Halley.

Im Hinduismus wurde ein zyklischer Kosmos mit dem Lebensrhythmus des Schöpfergottes Brahma in Bezug gesetzt. In der Kosmologie der Puranas, einer Sammlung von Mythen über das Wirken der Götter, durchläuft die Welt in 4,32 Millionen Jahren vier Zeitalter, in denen die Moral der Menschen kontinuierlich verfällt. Erst mit dem Beginn des jeweils nächsten Zyklus stellt eine Inkarnation des Gottes Vishnu die moralische Ordnung wieder her. Eintausend dieser Zyklen bilden im Leben Brahmas einen Tag, an des-

sen Ende das Universum durch Fluten oder Feuer zerstört wird. Darauf folgt eine ebenso lange Nacht, an die sich der nächste Tag im Leben dieses Gottes anschließt. Ein endloser Prozess, der auf dem unergründlichen Wirken Brahmas beruht.

Das ist nur eines von vielen Beispielen einer zyklischen, sich fortwährend wiederholenden Zeit. Als die englischen Kolonialherren im 18. Jahrhundert auf dem indischen Subkontinent diese Vorstellung kennen lernten, schlossen sie daraus, die Inder seien im mythisch-religiösen Denken sowie in archaischen Herrschaftsstrukturen gefangen. Sie bedürften der kolonialen »Fürsorge« durch Europäer, deren lineares Zeitmodell – erkennbar an der stetig fortschreitenden Jahreszählung – für ihre kulturelle, wirtschaftliche und soziale Überlegenheit spräche. Dagegen weist die Historikerin Romila Thapar überzeugend nach, dass bereits im indischen Altertum lineare und zyklische Zeitvorstellungen nebeneinander existierten.

Obwohl der Gott Schiwa in der »Dreieinigkeits der Hindus« neben dem Welterschöpfer Brahma und dem Bewahrer

▷ dass man die abstrakte Zeitkoordinate des vereinfachten Modells durch eine »physikalische Zeit« ersetzen kann, die nicht abstrakt-mathematisch, sondern mit Bezug auf konkrete »physikalische Uhren« definiert ist – ein wichtiger Schritt hin zu einem Modell, dessen Konzepte allesamt prinzipiell der Beobachtung zugänglich sind. Zusätzlich konnten sie zeigen, dass kollabierende Universen, deren Geometrie sich zu nächst näherungsweise im Rahmen der klassischen Allgemeinen Relativitätstheorie beschreiben lässt, nach einer nur in der Sprache der Quantengeometrie beschreibbaren Phase in expandierende Universen mit wiederum klassischer Geometrie übergehen.

Bei allen theoretischen Fortschritten ist unbestreitbar, dass in der Wissenschaft Beobachtungen und Messungen das letzte Wort haben müssen. Das freilich führt bezüglich der Theorien und Modelle der Quantengravitation zu großen Problemen, denn im Allgemeinen

ist zu erwarten, dass deren charakteristische Effekte erst bei experimentell unerreichbar hohen Energien und kurzen Entfernungen wichtig werden. Selbst wenn man einen herkömmlichen Teilchenbeschleuniger mit der Größe des Sonnensystems bauen könnte, gelänge es nicht, die erforderlichen Energien zu erzeugen. Der einzige Ausweg ist, das Universum selbst als Labor zu betrachten und Vorhersagen der Schleifen-Quantengravitation mit kosmologischen Beobachtungen zu konfrontieren.

Die Hoffnung, dass dies bereits in den nächsten Jahren gelingt, weckt eine neue Arbeit von Stefan Hofmann vom Perimeter-Institut in Waterloo (Kanada) und Oliver Winkler von der Universität von New Brunswick in Fredericton (Kanada). Ihren Berechnungen zufolge könnten Quantengravitations-Effekte der kosmischen Hintergrundstrahlung Eigenschaften aufprägen, die von den Vorhersagen der klassischen Kosmologie merklich abweichen.

Die Hintergrundstrahlung ist eine thermische Strahlung, sodass deren spektrale Eigenschaften nur von einem einzigen Parameter abhängen, der Strahlungstemperatur. Allerdings variiert der Wert der Strahlungstemperatur bei der Hintergrundstrahlung um einige tausendstel Prozent, je nachdem, auf welchen Ort am Nachthimmel man sein Teleskop ausrichtet. Für Orte, die am Himmel 90 Grad auseinanderliegen, könnten Quantengravitations-Effekte bewirken, dass die spektrale Energieverteilung um bis zu 10 Prozent von den Vorhersagen der herkömmlichen Modelle abweicht.

Die bisher existierenden Daten sind zu ungenau, um solche Abweichungen nachzuweisen (siehe Bild links), doch bereits weitere Messungen des Nasa-Satelliten WMAP, der seit 2001 die Strahlung vermisst, sowie des europäischen Satelliten Planck, der im kommenden Jahr gestartet werden soll, könnten das schon bald ändern. ◁

AKG-BERLIN



▲ **Shiva Nataraja, der tanzende Schiwa, in einem Pfeilerrelief aus dem 10. Jahrhundert im Nataraja-Tempel von Chidambaram (Tamil Nadu, Südindien). Der Tanz Schiwas steht für die grenzenlose Energie dieses Gottes, die Welt zu erschaffen, zu erhalten und zu zerstören. Die Reliefs in Chidambaram gehören zu den ältesten Darstellungen des Motivs.**

Vishnu als Zerstörer des Kosmos gilt, sprechen ihm seine Anhänger diese drei Eigenschaften allein zu. Kaum ein anderer Hindu-Gott scheint so ambivalent und paradox zu sein wie Schiwa, der auf dem Haupt Apasmaras, eines die Menschen bedrohenden Dämons, den Tanz der Glückseligkeit tanzt. Auch das Würfelspiel Schiwas mit seiner Gattin Parvati (das er gewöhnlich verliert) thematisiert die zugleich schöpferische und zerstörerische Kraft dieses Gottes.

Sich als Hindu die Frage nach dem Sinn des Wirkens Brahmas oder Schiwas zu stellen, ist genauso vergeblich, wie sich als Christ zu fragen, was Gott tat, bevor er die Welt erschuf. In seinen Bekenntnissen zitiert der Kirchenvater Augustinus den Scherz, Gott habe zuvor die Hölle geschaffen, um diejenigen, die das wissen wollten, darin unterzubringen. Augustinus selbst war dagegen ratlos und antwortete: »Was ich nicht weiß, das weiß ich nicht.«

**Götz Hoeppe**

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



**Thomas Thiemann** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Potsdam, Mitglied des Perimeter-Instituts für theoretische Physik in Waterloo (Kanada) und Gastprofessor an der Beijing Normal University. Zur Schleifen-Quantengravitation leistete er wesentliche Beiträge. Am selben Institut arbeitet auch



**Markus Pössel**, dessen Forschungsinteresse nach einer Doktorarbeit im Bereich der Quantengravitation vor allem den Grundlagen und der Vermittlung der relativistischen Physik gilt.

Quantum nature of the big bang: an analytical and numerical investigation. Part I. Von A. Ashtekar, T. Pawłowski und P. Singh in: *Physical Review*, D73, 124038, 2006

Loop quantum cosmology. Von Martin Bojowald in: *Living Reviews in Relativity*, Bd. 8, Nr. 11, 2005

Lecture notes on loop quantum gravity. Von Thomas Thiemann in: *Lecture Notes in Physics*, Bd. 631, S. 41, 2003

Three roads to quantum gravity. Von Lee Smolin. Perseus Book Group, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/872680](http://www.spektrum.de/artikel/872680).