

# **Motivationen, konzeptionelle Randbedingungen und Alternativen für eine Theorie der Quantengravitation<sup>1</sup>**

**Reiner Hedrich<sup>2</sup>**

Institut für Philosophie  
Fakultät Humanwissenschaften und Theologie  
Technische Universität Dortmund  
Emil-Figge-Strasse 50  
44227 Dortmund

Zentrum für Philosophie und Grundlagen der Wissenschaft  
Justus-Liebig-Universität Giessen  
Otto-Behaghel-Strasse 10 C II  
35394 Giessen

---

<sup>1</sup> Die zugrundeliegende Untersuchung wurde von der Fritz-Thyssen-Stiftung im Rahmen des Projektes "Raumzeitkonzeptionen in der Quantengravitation" gefördert.

<sup>2</sup> Email: [Reiner.Hedrich@phil.uni-giessen.de](mailto:Reiner.Hedrich@phil.uni-giessen.de) & [hedrich@fb14.uni-dortmund.de](mailto:hedrich@fb14.uni-dortmund.de)

## **Gliederung:**

1. Motivationen für die Quantengravitation
  - 1.1. Die konzeptionelle Inkompatibilität von Allgemeiner Relativitätstheorie und Quantenmechanik bzw. Quantenfeldtheorien
  - 1.2. Ungelöste physikalische Problemstellungen
2. Konzeptionelle Voraussetzungen der Quantengravitation
3. Alternativen für die Theorienbildung im Bereich der Quantengravitation
  - 3.1. Quantengravitation durch Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie
  - 3.2. Quantengravitation ohne direkte Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie
  - 3.3. Prägeometrische Theorien
  - 3.4. Fundamentaltheoretische Neukonzeption
  - 3.5. Anomologisches Substrat
  - 3.6. Flickwerk-Physik
4. Literaturverzeichnis

# 1. Motivationen für die Quantengravitation

## 1.1. Die konzeptionelle Inkompatibilität von Allgemeiner Relativitätstheorie und Quantenmechanik bzw. Quantenfeldtheorien

Eine entscheidende Motivation für die Entwicklung einer Theorie der Quantengravitation besteht in der wechselseitigen konzeptionellen Inkompatibilität der Allgemeinen Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik bzw. den Quantenfeldtheorien. Die folgenden drei Beispiele verdeutlichen diese konzeptionelle Unverträglichkeit:

(1) Das Gravitationsfeld wird von der Allgemeinen Relativitätstheorie als klassisches dynamisches Feld behandelt, repräsentiert durch die (pseudo-)riemannsche Metrik der Raumzeit. Dynamische Felder besitzen jedoch gemäss der Quantenmechanik Quanteneigenschaften, was eine (direkte oder indirekte)<sup>3</sup> Quantisierung des Gravitationsfeldes nahelegt.<sup>4</sup>

(2) In der Allgemeinen Relativitätstheorie wird das Gravitationsfeld durch die Metrik der Raumzeit repräsentiert, so dass eine Quantisierung des Gravitationsfeldes einer Quantisierung der Metrik entspräche. Die Quantenfeldtheorien, die das Verhalten dynamischer Quantenfelder beschreiben, arbeiten jedoch mit einem festen, nicht-dynamischen Hintergrundraum, kommen also in ihrer bisherigen Form nicht für die Erfassung einer 'Quantengeometrie' in Frage. Die quantisierte Erfassung der metrischen Eigenschaften einer dynamischen Raumzeit lässt sich wohl kaum wiederum auf einem statischen Hintergrundraum mit schon festgelegter Metrik beschreiben. Ohnehin ist die substantiell interpretierte Diffeomorphismusinvarianz<sup>5</sup> der Allgemeinen Relativitätstheorie mit keinem festen Hintergrundraum vereinbar.<sup>6</sup>

(3) In der Allgemeinen Relativitätstheorie ist die Zeit eine Komponente der dynamischen Raumzeit. Sie ist dynamisch in die Wirkung der Materie und Energie auf die Metrik und die Wirkung der Metrik auf die Bewegung der Materie eingebunden. Sie lässt sich nur lokal und intern definieren; es gibt keine globale Zeit, keinen physikalisch wirksamen globalen Zeitparameter.<sup>7</sup> In der Quantenmechanik wird die Zeit hingegen als globaler Hintergrundparameter behandelt, nicht einmal als physikalische Observable, der ein quantenmechanischer Operator zugeordnet werden könnte.

---

<sup>3</sup> Siehe Abschnitt 2. und 3.

<sup>4</sup> Gegen sogenannte semi-klassische Theorien, welche die Gravitation klassisch und alles andere quantenmechanisch behandeln, sprechen gewichtige konzeptionelle Argumente. Siehe etwa Kiefer (1994, 2004, 2005), Peres / Terno (2001), Terno (2006), Callender / Huggett (2001a, 2001b).

<sup>5</sup> Siehe Earman (2006, 2006a).

<sup>6</sup> Siehe Earman (1986, 1989, 2002, 2006, 2006a), Earman / Norton (1987), Norton (1988, 1993, 2004).

<sup>7</sup> Die aktive Diffeomorphismusinvarianz der Allgemeinen Relativitätstheorie führt zum *Problem der Zeit*. Siehe Belot / Earman (1999), Earman (2002), Pons / Salisbury (2005), Rickles (2005), Rovelli (2001, 2006), Unruh / Wald (1989).

## 1.2. Ungelöste physikalische Problemstellungen

Die wechselseitige Unverträglichkeit von Allgemeiner Relativitätstheorie und Quantenmechanik wird vor allem dort zum Problem, wo aus physikalischen Gründen die widerstreitenden Partner gleichermaßen Berücksichtigung finden müssten: etwa bei Schwarzen Löchern (*Hawking-Strahlung*<sup>8</sup>, *Bekenstein-Hawking-Entropie*<sup>9</sup>) oder dem hochverdichteten Zustand, der für den Beginn unseres Universums angenommen wird ('Urknall'; Physik des frühen Universums; Quantenkosmologie). In beiden Fällen sagt die Allgemeine Relativitätstheorie Singularitäten voraus, für die das Äquivalenzprinzip nicht mehr gilt, so dass die Theorie ihre Gültigkeit verliert. Dass es in der Allgemeinen Relativitätstheorie überhaupt Singularitäten geben kann - Bereiche also, für die sie ihre Gültigkeit verliert -, zeigt, dass sie keine umfassende Theorie der Raumzeit liefert.

Die hier fehlende Theorie sollte nach heutiger Ansicht in der Lage sein, die möglichen Quanteneigenschaften der Gravitation (bzw. der dynamischen Raumzeit) zu erfassen (bzw. zu erklären, wie die Gravitation als vielleicht nur emergentes klassisches Phänomen ohne eigene Quanteneigenschaften mit den Quanteneigenschaften der übrigen Wechselwirkungen und der Materie vereinbar ist<sup>10</sup>). Zudem sollte sie etwa auch erklären können, welche Mikrozustände zur *Bekenstein-Hawking-Entropie* führen, ob und wie es zur *Hawking-Strahlung* Schwarzer Löcher kommt, ob diese in Durchbrechung der Unitarität der Quantenmechanik zu einem Informationsparadoxon<sup>11</sup> führt, und, was bei einer eventuellen vollständigen Zerstrahlung Schwarzer Löcher passiert.

## 2. Konzeptionelle Voraussetzungen der Quantengravitation

Bisher können sich alle Ansätze zur Quantengravitation ausschliesslich auf Indizien aus den etablierten, empirisch gestützten Vorläufertheorien stützen. Relevante empirische Daten, die über diese Vorläufertheorien hinausweisen, liegen nicht vor. Zu den grundlegenden Anforderungen an die Theoriebildung im Bereich der Quantengravitation zählt also vor allem das Kriterium der konzeptionellen Kohärenz und Widerspruchsfreiheit sowie die Erfordernis, zumindest die empirisch überprüften Implikationen der etablierten Theorien - ihre Phänomenologie - als Näherungen oder Niederenergieimplikationen zu reproduzieren. Bestimmend bei der Theoriebildung sind darüberhinausgehend zum Teil (nicht immer unproblematische) metaphysische Hintergrundüberzeugungen, z.T. etwa ein nomologischer oder ontologischer Vereinheitlichungsgedanke.

Welche grundlegenden konzeptionellen Elemente der etablierten Vorgängertheorien vor diesem Hintergrund in die Theorieentwicklung Eingang finden, hängt vor allem von der Einschätzung dieser Elemente hinsichtlich ihrer Relevanz für den Bereich der Quantengravitation ab:

<sup>8</sup> Siehe Hawking (1974, 1975), Bardeen / Carter / Hawking (1973).

<sup>9</sup> Siehe etwa Bekenstein (1973, 1974, 1981, 2000, 2001, 2003), Wald (2001), Bousso (2002).

<sup>10</sup> Vgl. etwa Abschnitt 3.3.

<sup>11</sup> Siehe Hawking (1976, 1982, 2005), Belot / Earman / Ruetsche (1999).

Im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie - als grundlegender klassischer Gravitationstheorie und als Theorie der Raumzeit - wird das Gravitationsfeld durch die Raumzeitmetrik repräsentiert. Dies bedeutet, dass das Gravitationsfeld kein Feld auf der Raumzeit ist, sondern vielmehr eine Manifestation der Raumzeit(metrik); es lässt sich konsequenterweise nicht auf einer vorgegebenen Hintergrundraumzeit beschreiben. Eine Theorie der Quantengravitation müsste, solange dem keine guten Gründe entgegenstehen, das Zustandekommen der Gravitation auf eine hintergrundunabhängige Weise beschreiben, bei der diese Raumzeit nicht schon vorausgesetzt wird. Alles spricht - unter Fortschreibung diese Eigenschaft von der Allgemeinen Relativitätstheorie auf die Quantengravitation - erst einmal für eine nicht nur dynamische, sondern vielleicht sogar relationale Raumzeitkonzeption.<sup>12</sup>

Die Quantenmechanik als fundamentale Theorie des dynamischen Verhaltens von Materie und Feldern legt nahe, dem Gravitationsfeld - wie allen anderen dynamischen Feldern - Quanteneigenschaften zuzusprechen.<sup>13</sup> Da in der Allgemeinen Relativitätstheorie die Gravitation mit Eigenschaften einer dynamischen Geometrie identifiziert wird, käme die 'Quantisierung' der Gravitation in gewisser Weise einer 'Quantisierung' der Raumzeit bzw. 'Quantengeometrie' gleich. Dies kann jedoch als mögliche Zielvorgabe für eine Theorie der Quantengravitation vieles bedeuten:

Einerseits kann mit der 'Quantisierung' der Gravitation bzw. der Raumzeit eine direkte Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie gemeint sein; damit einher ginge vielleicht die Auffassung, dass sich die Metrik der Quantengeometrie als Erwartungswert einer Quantenvariablen darstellen würde, dass man mit Quantenfluktuationen der Metrik, der Geometrie, vielleicht gar der Topologie zu rechnen hätte, dass es so etwas wie Unschärfen der Raumzeit gibt etc.

Andererseits könnte eine 'Quantisierung' der Gravitation metaphorisch als Suche nach einer Quantentheorie gelesen werden, die das Zustandekommen der Gravitation und der Raumzeit inclusive ihrer möglichen Quanteneigenschaften verstehbar macht. Eine solche Theorie der Quantengravitation müsste nicht notwendigerweise durch eine direkte Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie (oder einer anderen klassischen Theorie) erreicht werden.

Hält man sich alle Optionen offen, so könnte eine Theorie der Quantengravitation entweder eine Quantentheorie (im weitesten Sinne) sein, welche - und dies ist eben eine der grundlegendsten Anforderungen an eine solche Theorie - die Allgemeine Relativitätstheorie als niederenergetischen, klassischen Grenzfall enthält bzw. ihren phänomenalen Gehalt reproduziert, oder eine Theorie (vielleicht nicht einmal unbedingt eine Quantentheorie im herkömmlichen Sinne), die den jeweiligen bereichsspezifischen Erfolg der Allgemeinen Relativitätstheorie sowie der Quantenmechanik

---

<sup>12</sup> In der Allgemeinen Relativitätstheorie kann die raumzeitliche Mannigfaltigkeit aufgrund einer substantiell interpretierbaren Diffeomorphismusinvarianz nicht (oder nur um den hohen Preis unmotivierter metaphysischer Annahmen) als substantielle Entität angesehen werden. Siehe Earman (1986, 1989, 2002, 2006, 2006a), Earman / Norton (1987), Norton (1988, 1993, 2004).

<sup>13</sup> Dies gilt zumindest, solange dem keine guten Gründe entgegenstehen: etwa in Form einer glaubwürdigen Konzeption, welche die Gravitation mit den Quanteneigenschaften der anderen Wechselwirkungen und der Materie - als vielleicht emergentes, aus diesen Quanteneigenschaften *anderen* Ursprungs ableitbares, originär klassisches Phänomen - vereinbar macht. Vgl. Kap. 3.3.

und der Quantenfeldtheorien zu erklären und die entsprechenden Vorhersagen dieser etablierten Theorien (zumindest als Näherungen) zu reproduzieren in der Lage ist. Darüberhinausgehend müsste eine solche Theorie spezifische eigene Vorhersagen liefern, die einer empirischen Überprüfung unterworfen werden können.

Diese minimale Definition einer Theorie der Quantengravitation lässt ein ganzes Spektrum an Möglichkeiten zu.<sup>14</sup> Die verschiedenen Theorieansätze unterscheiden sich dabei vor allem hinsichtlich der jeweiligen spezifischen Komponenten aus den etablierten Vorgängertheorien, welche für den Bereich der Quantengravitation als weiterhin relevant angesehen werden und schliesslich in die Theoriebildung einfließen.

Bei der letztlich vermutlich unumgänglichen Einbeziehung von Komponenten aus den Vorgängertheorien ist jedoch Vorsicht geboten: In den etablierten Theorien und ihren Implikationen könnten konzeptionelle Sackgassen angelegt sein, die in die falsche Richtung weisen könnten, wenn sie unhinterfragt als Ausgangspunkt für eine Überwindung ihrer gegenseitigen Unverträglichkeiten im Kontext einer entstehenden Theorie der Quantengravitation Verwendung finden. Es ist also vermutlich nicht sonderlich ratsam, sich *allein* der Strategie einer Fortschreibung der etablierten Theorien unter Ausmerzungen ihrer gegenseitigen Unverträglichkeiten zu verschreiben, wie dies etwa in dem Versuch einer direkten Quantisierung<sup>15</sup> der Allgemeinen Relativitätstheorie geschieht. Vielmehr sollten auch Alternativen erwogen werden, die nicht auf den ersten Blick von den Vorgängertheorien nahegelegt werden, diese aber dennoch als Näherungen oder Niederenergieimplikationen enthalten könnten.

Hierbei könnte die Berücksichtigung von 'Elementen des Übergangs', die schon nicht mehr in vollem Masse den etablierten Vorgängertheorien angehören, sondern konzeptionell schon über diese hinausweisen, von entscheidender heuristischer Bedeutung sein. Ein paradigmatisches Beispiel betrifft die *Bekenstein-Hawking-Entropie* Schwarzer Löcher, die sich aus einer gemeinsamen Berücksichtigung von Implikationen der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantenmechanik sowie Überlegungen aus dem Bereich der Thermodynamik und der Informationstheorie ergibt. Es ist nicht zuletzt die *Bekenstein-Hawking-Entropie*, die auf eine diskrete Substratstruktur auf der *Planck-Ebene*<sup>16</sup> (und mithin, wenn die Raumzeit eine fundamentale Grösse sein sollte: eine diskrete Raumzeit) hinweist. Hierfür sprechen vielleicht auch die in der Allgemeinen Relativitätstheorie auftretenden (und deren theoretischen Apparat transzendierenden) Singularitäten sowie die Divergenzen, die für kleine Abstände bzw. hohe Energien in den Quantenfeldtheorien auftreten; beide liessen sich als

---

<sup>14</sup> Siehe Abschnitt 3.

<sup>15</sup> Siehe Abschnitt 3.1.

<sup>16</sup> 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, ergeben sich als Kombination grundlegender Naturkonstanten:

$$\begin{aligned}
 \text{Planck-Länge:} & \quad l_{\text{P}} = (\hbar^{-1} G / c^3)^{1/2} = 1,62 \cdot 10^{-35} \text{ m} \\
 \text{Planck-Zeit:} & \quad t_{\text{P}} = (\hbar^{-1} G / c^5)^{1/2} = 5,40 \cdot 10^{-44} \text{ sec} \\
 \text{Planck-Masse bzw. -Energie:} & \quad m_{\text{P}} = (\hbar^{-1} c / G)^{1/2} = 2,17 \cdot 10^{-5} \text{ g} = 1,22 \cdot 10^{19} \text{ GeV}/c^2 \\
 (\hbar: & \text{ Plancksches Wirkungsquantum, G: Gravitationskonstante, c: Lichtgeschwindigkeit})
 \end{aligned}$$

mögliches Artefakt der Kontinuumsannahme deuten.<sup>17</sup> Obwohl die Allgemeine Relativitätstheorie und die Quantenfeldtheorien von einem raumzeitlichen Kontinuum ausgehen und obwohl konzeptionelle Elemente aus diesen Kontexten in die Theorienentwicklung im Bereich der Quantengravitation in vielfältiger Weise Eingang finden, deutet sich bisher in nahezu allen Ansätzen zur Quantengravitation eine diskrete Substratstruktur (und bei den Ansätzen, die von einer fundamentalen Raumzeit ausgehen, eine diskrete Raumzeitstruktur) an.

### **3. Alternativen für die Theorienbildung im Bereich der Quantengravitation<sup>18</sup>**

#### **3.1. Quantengravitation durch Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie**

Beschreitet man zur Ausräumung der wechselseitigen konzeptionellen Inkompatibilität der Allgemeinen Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik bzw. den Quantenfeldtheorien und zur Entwicklung einer Theorie der Quantengravitation den Weg einer direkten Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie, so ist dabei zu bedenken, dass dies noch nicht notwendigerweise zum gewünschten Resultat führen muss. Eine der essentiellsten Anforderungen an eine Theorie der Quantengravitation besteht in der Ableitbarkeit der Allgemeinen Relativitätstheorie als Implikation oder Grenzfall oder zumindest in der Reproduktion ihres empirischen bzw. phänomenalen Gehalts. Eine Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie erfüllt noch nicht notwendigerweise diese Anforderung - und eine Theorie, welche diese Anforderung erfüllt, muss nicht notwendigerweise aus der Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie resultieren.

Versucht man dennoch die Allgemeine Relativitätstheorie direkt zu quantisieren, so ist erst einmal zu fragen, welche Quantisierungsmethode verwendet wird. Es gibt diverse methodische Möglichkeiten für eine solche Quantisierung. Auch wenn die klassische Ausgangstheorie bekannt und klar definiert ist, ist ihre Quantisierung eine in keiner Weise eindeutig festgelegte Prozedur. Nicht zuletzt stellt sich die Frage, welche physikalischen Grössen quantisiert werden: etwa die Metrik oder Grössen, die auf der Ebene der Metrik anzusiedeln sind, oder die Topologie, die kausale Struktur etc. Zudem ist zu klären, inwiefern die Hintergrundunabhängigkeit der Allgemeinen Relativitätstheorie bei ihrer Quantisierung berücksichtigt wird. - Alle bestehenden Ansätze verwenden eine Quantisierung der Metrik oder von Grössen, die auf der Ebene der Metrik anzusiedeln sind (Konnektionen, Holonomien). Entscheidende Unterschiede bestehen im Hinblick auf die Hintergrundunabhängigkeit:

---

<sup>17</sup> Als weiteres mögliches Artefakt der Kontinuumsannahme liesse sich die Nichtrenormierbarkeit der kovarianten Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie nennen. Siehe Abschnitt 3.1.

<sup>18</sup> Caveat: Das dargestellte Spektrum ist nicht notwendigerweise umfassend und die Einordnung ist nicht in allen Fällen eindeutig (Hybridkonstrukte).

(1) *Kovariante Quantisierung*<sup>19</sup>:

Ziel der kovarianten Quantisierung ist die Formulierung einer Quantenfeldtheorie der Gravitation. Der quantenfeldtheoretische Formalismus benötigt jedoch grundsätzlich einen Hintergrundraum mit fester Metrik, auf dem die Operatorfelder definiert werden. Quantisiert werden im kovarianten Ansatz konsequenterweise nur Fluktuationen der Metrik auf einem festen Hintergrundraum, gemeinhin einem Minkowski-Raum. Ein solcher störungstheoretischer Ansatz, der die Dynamik von Feldquanten der Gravitation (*Gravitonen*) auf einer festen Raumzeit beschreibt, ist notwendigerweise hintergrundabhängig. Dies entspricht einer Verletzung der aktiven Diffeomorphismusinvarianz, also der substantiellen Form der Allgemeinen Kovarianz, wie sie für die Allgemeine Relativitätstheorie vorliegt. Die kovariante Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie startet also von vornherein mit einem konzeptionellen Widerspruch: Sie entspricht einer hintergrundabhängigen Quantisierung einer hintergrundunabhängigen Theorie. Zudem erweist sich der Ansatz als nicht-renormierbar. Letztlich hängen diese beiden Probleme eng zusammen: Die kovariante Quantisierung führt gerade aufgrund der Selbstwechselwirkung der *Gravitonen* zur Nicht-Renormierbarkeit. Diese Selbstwechselwirkung der *Gravitonen* ist aber letztlich Ausdruck und Implikation der Hintergrundunabhängigkeit der Allgemeinen Relativitätstheorie.

(2) *Kanonische Quantisierung*:

Die kanonische Quantisierung umgeht diese Probleme von vornherein. Ihr Ziel ist die direkte, vollständige, nicht-perturbative, hintergrundunabhängige Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die sich in ihrem Rahmen ergebende *Wheeler-DeWitt-Gleichung*, die quantisierte Form der Hamiltonschen Nebenbedingung, mit der im klassischen Fall, in der Hamiltonschen Formulierung der Allgemeinen Relativitätstheorie, der zeitliche Aspekt der Diffeomorphismusinvarianz Berücksichtigung findet, bringt in ihrer ursprünglichen (*geometrodynamischen*<sup>20</sup>) Form gravierende (und mutmasslich unlösbare) mathematische und konzeptionelle Probleme mit sich.

Besser sieht es diesbezüglich in einer neueren Variante des kanonischen Quantisierungsansatzes aus: der *Loop Quantum Gravity*<sup>21</sup>. Hier erfolgt die kanonische Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie zwar weiterhin ausgehend von der Hamiltonschen Formulierung, jedoch nicht mehr mittels der geometrischen Variablen des älteren Ansatzes (*Geometrodynamik*), sondern auf der Grundlage der sogenannten Ashtekar-Variablen<sup>22</sup>.

Dennoch bestehen immer noch ungelöste Probleme hinsichtlich der Ableitbarkeit der Niederenergiephysik und des klassischen Grenzfalles. Die basale Anforderung an eine Theorie der Quantengravitation, die Reproduktion der bekannten Phänomenologie der Gravitation bzw. der Einsteinschen Feldgleichungen als Näherung bzw. klassischem Grenzfall, konnte bisher nicht erfüllt wer-

<sup>19</sup> Siehe DeWitt (1967a, 1967b).

<sup>20</sup> Siehe DeWitt (1967), Kuchar (1986, 1993), Ehlers / Friedrich (1994).

<sup>21</sup> Siehe Ashtekar (2007, 2007a), Ashtekar / Lewandowski (2004), Ashtekar / Rovelli / Smolin (1992), Rovelli (1991, 1997, 1998, 2003, 2004), Smolin (1991, 2000), Thiemann (2001, 2006), Nicolai / Peeters (2006), Nicolai / Peeters / Zamboni (2005). Für eine Literaturübersicht siehe: Hauser / Corichi (2005).

<sup>22</sup> Siehe Ashtekar (1986, 1987).

den. Auch wenn die *Loop Quantum Gravity* von einer Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie ihren Ausgang nimmt, führt sie nicht zu ihr zurück. Wie alle anderen Ansätze zur Quantengravitation, macht die *Loop Quantum Gravity* zudem keine empirisch direkt überprüfbaren Vorhersagen. Darüberhinausgehend besteht immer noch eine Vieldeutigkeit in der Formulierung des Hamilton-Operators sowie in der Festlegung der Repräsentation der Operator-Algebra.

Hinzu kommen radikale Konsequenzen, verglichen mit den etablierten Theorien, wie etwa das virulente *Problem der Zeit*<sup>23</sup>: Die Theorie beschreibt eine eingefrorene Dynamik; die Zeit ist eine unphysikalische Eichvariable; es gibt keine zeitabhängigen Observablen. Alle Observablen erweisen sich zudem als nicht-lokal und die beschriebene Dynamik ist nicht unitär.

### (3) *Quantisierung einer diskretisierten Version der Allgemeinen Relativitätstheorie:*

Es gibt eine ganze Reihe von Ansätzen, die versuchen, eine diskretisierte Form der Allgemeinen Relativitätstheorie zu quantisieren: *Konsistente Diskretisierung*<sup>24</sup>, *Regge Calculus*<sup>25</sup> sowie verschiedene Varianten der *Dynamischen Triangulation*<sup>26</sup>. Diese unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der Diskretisierungsmethode, der vorausgesetzten Signatur der Raumzeit sowie dem Erfolg in den Quantisierungsbemühungen. Sie lassen sich jedoch vermutlich auch im Falle ihres Erfolgs bestenfalls als effektive Theorien, vergleichbar den Gittereichtheorien, ansehen.

### (4) *Quantisierung einer erweiterten Version der Allgemeinen Relativitätstheorie bzw. Erweiterung einer Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie:*

Zudem besteht die Möglichkeit zu versuchen, entweder eine erweiterte Version der Allgemeinen Relativitätstheorie zu Quantisieren oder - unter zunehmender Aufweichung des Konzeptes einer direkten Quantisierung - die Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie nachträglich zu erweitern. In diesen Kontext fällt etwa die *Supergravity*<sup>27</sup>, die, um die Supersymmetrie angereichert und mit zusätzlichen Raumdimensionen ausgestattet, in den siebziger und achtziger Jahren zeitweise heftig diskutiert wurde, aber aufgrund konzeptioneller Probleme heute allgemein nicht mehr als aktuell angesehen wird.

---

<sup>23</sup> Siehe Belot / Earman (1999, 2001), Butterfield / Isham (1999), Kuchar (1991, 1992), Rickles (2004, 2005), Rovelli (1991, 1998, 2007), Unruh / Wald (1989).

<sup>24</sup> Siehe Gambini / Pullin (2003, 2004, 2005, 2005a, 2005b), Gambini / Porto / Pullin (2003).

<sup>25</sup> Siehe Regge / Williams (2000), Williams / Tuckey (1992), Gentle (2002), Barrett (1987).

<sup>26</sup> Siehe Ambjorn (1995) Ambjorn / Jurkiewicz / Loll (2000, 2001, 2001a, 2004, 2005, 2005a, 2005b, 2006), Ambjorn / Loll (1998), Loll (1998, 2001, 2003, 2007), Loll / Ambjorn / Jurkiewicz (2005).

<sup>27</sup> Siehe Cremmer / Julia / Scherk (1978).

(5) *Bedingungen, unter denen eine Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie als Weg zu einer Theorie der Quantengravitation unangemessen wäre:*

Sollte die Raumzeit nicht fundamental sein, sondern Ausdruck anderer nicht-raumzeitlicher Freiheitsgrade, oder sollte die Gravitation keine fundamentale Wechselwirkung, sondern ein residuales bzw. induziertes Phänomen sein, so wäre eine Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie als Theorie der Gravitation und der Raumzeit konzeptionell völlig unsinnig. Wenn die Raumzeit bzw. die Gravitation emergente Phänomene sind und die Allgemeine Relativitätstheorie entsprechend nur als effektive Theorie zur Erfassung dieser emergenten Grössen und ihrer Dynamik angesehen werden kann, so führt eine Quantisierung dieser effektiven Theorie ganz sicher nicht zu einer angemessenen Theorie der Quantengravitation - genausowenig wie etwa eine Quantisierung der Navier-Stokes-Gleichung zu einer Quantenhydrodynamik führen würde; man würde schlichtweg die falschen Freiheitsgrade quantisieren, nämlich kollektive, makroskopische Grössen, denen eine völlig andere Mikrodynamik zugrundeliegt.

Sollten Raumzeit und/oder Gravitation emergent sein, so wäre also vielmehr zu versuchen, diese aus einer fundamentalen (mikroskopischen) präraumzeitlichen Theorie bzw. Dynamik als (makroskopische) Näherungen, etwa nach Einführung und Berücksichtigung von Ordnungsparametern oder kollektiven Anregungszuständen, abzuleiten. Es wäre aber umgekehrt völlig unsinnig, diese nicht-fundamentalen Kollektivparameter zu quantisieren.

Im Falle einer emergenten Raumzeit bzw. einer emergenten Gravitation ginge es in einer Theorie der Quantengravitation also nicht mehr um Quantenkorrekturen zu einer klassischen Raumzeitauffassung, etwa Quantenfluktuationen der Metrik oder quantenmechanische Unschärfen der Raumzeit. Eine emergente, klassische Raumzeit hätte keine solchen Quanteneigenschaften. Sie käme vielmehr auf der Grundlage eines gänzlich anders gearteten Substrats zustande. Es ginge also in einer Theorie der Quantengravitation nicht um die Quanteneigenschaften von Gravitation oder Raumzeit - diese gäbe es nämlich gar nicht -, sondern vielmehr um die Quanteneigenschaften des Substrats, auf dessen Grundlage sich Gravitation und klassische Raumzeit ergeben.

Die konzeptionellen Voraussetzungen, die sich für eine Theorie der Quantengravitation vielleicht aus den etablierten Theorien, insbesondere der Allgemeinen Relativitätstheorie, ableiten liessen, würden sich unter diesen Umständen nur bedingt als relevant und verlässlich erweisen. Vielleicht würden sie sogar in eine völlig falsche Richtung weisen.

Die Möglichkeit, dass Raumzeit und/oder Gravitation emergente Phänomene sein könnten, ist jedoch mehr als nur eine abstrakte Idee. Es gibt inzwischen eine Vielzahl von mehr oder weniger konkreten theoretischen Szenarien mit emergenter Raumzeit und/oder emergenter Gravitation:

(a) *Raumzeit als Ausdruck eines prägeometrischen quantenmechanischen Zustandsspektrums:*<sup>28</sup> Dimensionalität und Topologie der Raumzeit werden als Ergebnis der Herausbildung von Ordnungsparametern innerhalb des Zustandsspektrums relativ einfacher Quantensysteme dynamisch erzeugt. Fermionische Freiheitsgrade führen zu einer flachen Raumzeit. Bosonische Freiheitsgrade

---

<sup>28</sup> Siehe Kaplunovsky / Weinstein (1985); vgl. auch Dreyer (2004).

führen zu einer aufgerollten Raumzeit. Es kommt unter bestimmten Bedingungen zu Phasenübergängen zwischen Raumzeiten unterschiedlicher Dimensionalität.

(b) *Raumzeit als emergentes thermodynamisches bzw. statistisches Phänomen:*<sup>29</sup> Die Einsteinschen Feldgleichungen lassen sich aus einer Verallgemeinerung der Proportionalität von Entropie und Horizontfläche bei Schwarzen Löchern (*Bekenstein-Hawking-Entropie*) ableiten. Die Grundlage dafür liefert die thermodynamische Beziehung zwischen Wärme, Temperatur und Entropie, gemeinsam mit der Deutung der Temperatur als Unruh-Temperatur eines beschleunigten Beobachters innerhalb eines lokalen Rindler-Horizontes. Wärme wird als Energiefluss durch einen kausalen (Vergangenheits-)Horizont gedeutet. Dieser Energiefluss durch den Horizont tritt als Krümmung der Raumzeit und mithin als Gravitationsfeld in Erscheinung.

(c) *Raumzeit als emergentes hydrodynamisches Phänomen:*<sup>30</sup> Die Raumzeit ergibt sich als kollektiver Quantenzustand vieler Mikrokonstituenten mit einer makroskopischen Quantenkohärenz, vergleichbar einem Bose-Einstein-Kondensat.

(d) *Raumzeit als emergentes festkörperphysikalisches Phänomen:*<sup>31</sup> Gravitation und Raumzeit kommen als emergente Phänomene auf der Grundlage von masselosen Spin-2-Anregungszuständen eines Fermionen-Systems mit Fermi-Punkt zustande.

(e) *Raumzeit als phänomenologisches Ergebnis eines computationalen Prozesses:* Hierzu gibt es eine Vielzahl von Ansätzen mit unterschiedlichsten Voraussetzungen.<sup>32</sup> Manche gehen sogar von einem Nicht-Quanten-Substrat und einer Emergenz der Quanteneigenschaften mikroskopischer Systeme aus.

### 3.2. Quantengravitation ohne direkte Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie

Es gibt ausser dem Versuch der direkten Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie im wesentlichen zwei Strategien um zu einer (Quanten-)Theorie der Quantengravitation zu gelangen.<sup>33</sup>

<sup>29</sup> Siehe Jacobson (1995, 1999), Eling / Guedens / Jacobson (2006), Jacobson / Parentani (2006), Padmanabhan (2002, 2004, 2007).

<sup>30</sup> Siehe Hu (2005), Hu / Verdaguer (2003, 2004), Oriti (2006), Sakharov (2000), Visser (2002), Barcelo / Liberati / Visser (2005), Weinfurtner (2007).

<sup>31</sup> Siehe Volovik (2000, 2001, 2003, 2006, 2007), Zhang (2002), Tahim et al. (2007).

<sup>32</sup> Siehe Lloyd (1999, 2005, 2005a, 2007), Cahill (2005), Cahill / Klinger (1997, 2005), Hsu (2007), Livine / Terno (2007), Zizzi (2001, 2004, 2005), Hardy (2007).

<sup>33</sup> Beide Strategien sind grundsätzlich mit und ohne nomologische Vereinheitlichung der Gravitation mit allen anderen Wechselwirkungen denkbar. Eine nomologische Vereinheitlichung ist als Ziel erst einmal unabhängig von der grundsätzlichen Motivation zur Entwicklung einer Theorie der Quantengravitation, die wechselseitigen Unvereinbarkeiten zwischen Allgemeiner Relativitätstheorie und Quantenmechanik bzw. Quantenfeldtheorien zu überwinden. Erst im Bereich der prägeometrischen Theorien, die von einer emergenten Raumzeit ausgehen, gibt es schliesslich Gründe, von einer gemeinsamen Materie- und Geometrogenese auszugehen. Siehe Abschnitt 3.3.

(1) *Entwicklung einer Theorie der Quantengravitation durch (direkte) Quantisierung einer anderen klassischen Theorie:*

Als auf den ersten Blick überraschende Instantiierung dieser Strategie hat sich der perturbative Stringansatz erwiesen.<sup>34</sup> Ausgehend von einer Entwicklung, die in den sechziger Jahren in der Hadronenphysik ihren Anfang nahm, hat sich post hoc herausgestellt, dass die Quantisierung der speziell-relativistischen Dynamik eines eindimensional ausgedehnten, schwingungsfähigen Objekts (*String*) zumindest formal die Dynamik von *Gravitonen* auf einer Minkowski-Hintergrundraumzeit beschreibt und somit näherungsweise die Phänomenologie der Gravitation bzw. die Einsteinschen Feldgleichungen (mit Stringkorrekturen) reproduziert.

Zu den spezifischen Bedingungen, unter denen dies jedoch erst gilt, zählt, dass (i) die Hintergrundraumzeit zehn Dimensionen umfasst - und insofern erklärt werden muss, wie es zu unserer vierdimensionalen phänomenologischen Raumzeit kommt -, und dass (ii) die Dynamik des *String* die Supersymmetrie erfüllt, die für jedes bekannte Fermion einen unbekanntem bosonischen Partner - und umgekehrt - fordert, so dass erklärt werden muss, wieso wir diese Teilchen noch nicht beobachtet haben und wieso, und auf welche Weise, die Supersymmetrie, wenn sie überhaupt vorliegt, gebrochen ist.

Neben den Spin-2-Zuständen, die als *Gravitonen* interpretiert werden können, gehören zum Schwingungsspektrum des *String* Skalarteilchen, Spin-1-Eichbosonen und fermionische Materiebestandteile; formal führt der perturbative Stringansatz damit zu einer nomologischen Vereinheitlichung aller Wechselwirkungen inklusive der Gravitation.

Abgesehen von seiner Hintergrundabhängigkeit, die der Stringansatz von den Quantenfeldtheorien und der kovarianten Quantisierung geerbt hat und die einer Theorie, welche die Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie als klassischen Grenzfall reproduziert, völlig unangemessen ist, solange dafür keine guten Gründe angeführt werden können, weist der Stringansatz eine Vielzahl weiterer Probleme auf:<sup>35</sup> So ist kein physikalisch motivierbares, fundamentales Prinzip bekannt, aus dem heraus sich der Stringansatz motivieren oder gar entwickeln liesse. Es gibt keine analytische, nicht-perturbative Formulierung der Theorieansätze. Dafür gibt es eine zu grosse Zahl perturbativer Szenarien: die fünf bekannten perturbativen zehndimensionalen Stringtheorien (schon vier zu viel!) führen zu einer riesigen Zahl (etwa  $10^{500}$ ) von vierdimensionalen Modellen mit unterschiedlicher Niederenergiephysik - der sogenannten *String-Landscape*. Es ist aber nicht ein einziges Modell bekannt, welches zu einer Phänomenologie entsprechend dem quantenfeldtheoretischen Standardmodell führen würde. Und es lassen sich keine quantitativen, experimentell überprüfbareren Vorhersagen ableiten - wie bei allen anderen Ansätzen zur Quantengravitation.

---

<sup>34</sup> Sie Kaku (1999) und Polchinski (2000, 2000a). Eine Literaturübersicht gibt Marolf (2004).

<sup>35</sup> Zu Problemen des Stringansatzes aus einer wissenschaftstheoretischen Perspektive siehe Hedrich (2002, 2002a, 2006, 2007, 2007a).

(2) *Entwicklung einer Theorie der Quantengravitation in Form einer Quantentheorie, die nicht durch die Quantisierung einer klassischen Theorie zustandekommt:*

Vor dem Hintergrund der Probleme sowohl des Stringansatzes<sup>36</sup> (dem immer noch populärsten und personalstärksten Ansatz im Bereich der Quantengravitation) als auch der *Loop Quantum Gravity*<sup>37</sup> (dem vielversprechendsten Vertreter des direkten kanonischen Quantisierungsansatzes) lohnt es sich, nach Alternativen Ausschau zu halten. Die direkte Quantisierung einer klassischen Theorie - sei dies die Allgemeine Relativitätstheorie oder eine andere klassische Dynamik - ist nicht der einzige Weg zu einer Theorie der Quantengravitation. Das Spektrum der Alternativen und ihrer jeweiligen konzeptionellen Hintergründe und Motivationen ist inzwischen schon recht vielfältig und bietet nicht zuletzt Aussichten, die jeweiligen Probleme, die sich für die direkten Quantisierungsansätze abzeichnen, zu vermeiden.

Insbesondere formieren diverse prä-raumzeitliche ('prägeometrische'), diskrete Ansätze in diesem Spektrum:<sup>38</sup> *Causal Sets*<sup>39</sup>, computationale Ansätze<sup>40</sup>, prägeometrische *Quantum Causal Histories*<sup>41</sup> etc. Diese Ansätze lassen sich - über ihre jeweiligen Unterschiede hinweg - nicht zuletzt aus den zahlreichen Indizien für ein diskretes Substrat der Raumzeit heraus motivieren, wie sie sich sowohl im (erweiterten) Kontext der etablierten Theorien ergeben (v.a. die *Bekenstein-Hawking-Entropie* als Ergebnis des Zusammenspiels von Argumenten aus Allgemeiner Relativitätstheorie, Quantenfeldtheorien und Thermodynamik), als auch darüber hinausgehend (Ableitung diskreter Spinnnetzstrukturen in der *Loop Quantum Gravity*; Anzeichen für eine minimale Länge im Stringansatz; Reproduktion der *Bekenstein-Hawking-Entropie* im Rahmen beider Ansätze).

### 3.3. Prägeometrische Theorien

Bei den prägeometrischen Theorien handelt es sich um Ansätze, die eine Dynamik diskreter Strukturen bzw. Entitäten ohne die Voraussetzung einer Raumzeit beschreiben. Dies hat den Vorteil, dass diese Theorien notwendigerweise hintergrundunabhängig sind. Die zugrundeliegende Idee ist die, dass sich Raumzeit und Gravitation als emergente Phänomene ergeben: als Konsequenzen einer Dynamik auf der Substratebene, auf der es keine Raumzeit gibt. Die grundlegende Anforderung an

<sup>36</sup> Zusammengefasst: Der Stringansatz existiert auch nach über dreissig Jahren Entwicklung nur als perturbatives Konstrukt ohne physikalisch motivierbares fundamentales Prinzip; er arbeitet wie die Quantenfeldtheorien mit einer festen Hintergrundraumzeit; zudem scheint die Aussicht auf eine zukünftige Erklärungsleistung mit der Entdeckung der String-Landscape endgültig dahin zu sein.

<sup>37</sup> Die *Loop Quantum Gravity* kämpft immer noch mit diversen konzeptionellen Schwierigkeiten und ist bisher noch nicht in der Lage, die bekannte Phänomenologie der Gravitation bzw. die Allgemeine Relativitätstheorie als klassischen Grenzfall zu reproduzieren, obwohl letztere ihr Ausgangspunkt vor der Quantisierung darstellt.

<sup>38</sup> Siehe Abschnitt 3.3.

<sup>39</sup> Siehe Bombelli / Lee / Meyer / Sorkin (1987), Sorkin (2003), Rideout / Sorkin (2000, 2001), Rideout (2002), Henson (2006), Surya (2007).

<sup>40</sup> Siehe Lloyd (1999, 2005, 2005a, 2007), Cahill (2005), Cahill / Klinger (1997, 2005), Hsu (2007), Livine / Terno (2007), Zizzi (2001, 2004, 2005), Hardy (2007).

<sup>41</sup> Siehe Abschnitt 3.3.

diese prägeometrischen Ansätze besteht weiterhin in der Notwendigkeit der Reproduktion der in der Allgemeinen Relativitätstheorie beschriebenen Phänomenologie als Näherung bzw. als Kontinuumsgrenzfall.

Fast alle vorliegenden Ansätze setzen die Quantenmechanik in irgendeiner Weise voraus, auch wenn sie ohne Raumzeit auskommen. Als Basiselemente auf der Substratebene dienen fast durchgängig elementare (Quanten-)Ereignisse ohne raumzeitliche Einbettung. Die Einbettung erfolgt durch basale relationale Strukturen zwischen den elementaren Konstituenten; diese relationalen Strukturen lassen sich etwa in Form von Graphenstrukturen erfassen: als Netzwerke aus äquivalenten, zweistelligen Relationen. Im allgemeinen werden sowohl den elementaren Ereignissen (Vertices) wie auch den Relationen (Linien) Quanteneigenschaften zugesprochen.

Entscheidend ist innerhalb dieser prägeometrischen Modelle die Frage, wofür die Relationen stehen. In den meisten Fällen sind es kausale Relationen zwischen elementaren Ereignissen (wie etwa bei den *Causal Sets* oder im *Twistor*-Ansatz) oder dynamische Informationskanäle (wie etwa bei den *Quantum Causal Histories*).

Die *Quantum Causal Histories*<sup>42</sup> können dabei in gewisser Weise gleichermassen als paradigmatisches Beispiel eines prägeometrischen Ansatzes wie als Konvergenzpunkt und Synthese der unterschiedlichsten Denkansätze zu einer prägeometrischen, kausal bestimmten Quantenstruktur angesehen werden. So lassen sich die *Quantum Causal Histories* einerseits, indem sie Wheelers Idee des *It from bit*<sup>43</sup>, Elemente aus Lloyds Konzeption des *Computationalen Universums*<sup>44</sup> sowie die Idee der *holographischen Schirme*<sup>45</sup> einbeziehen, als konzeptionelle Erweiterung von Sorkins *Causal-Sets*-Ansatz<sup>46</sup> verstehen; andererseits lassen sie sich ebenso als Verallgemeinerung kausaler Spinnetze und des *Spin-Foam*-Ansatzes<sup>47</sup> ansehen, angereichert um Elemente aus den *algebraischen Quantenfeldtheorien*.

Zu den Ausgangspunkten in der Theoriebildung zählt die Annahme, dass es keine kontinuierliche Raumzeit auf der Substratebene (identifiziert mit der *Planck-Ebene*) gibt, dass einer finiten Region nur eine finite Zahl von Freiheitsgraden zugeschrieben werden kann<sup>48</sup>, dass die kausale Ordnung fundamentaler ist als die Eigenschaften der Raumzeit (wie etwa Metrik oder Topologie), dass kausale Relationen auf der Substratebene in Form von elementarsten kausalen Vernetzungsstrukturen vorliegen, und schliesslich, dass die Quantentheorie auch auf der fundamentalen Ebene gültig ist.

<sup>42</sup> Siehe Markopoulou (2000, 2000a, 2000b, 2002, 2006, 2007), Dreyer (2004, 2006) (Dreyer nennt seinen Ansatz *Internal Gravity*), Kribs / Markopoulou (2005) (Emergente Teilchenphysik), Konopka / Markopoulou / Smolin (2006) (*Quantum Graphity*), Hawkins / Markopoulou / Sahlmann (2003).

<sup>43</sup> Siehe Wheeler (1989).

<sup>44</sup> Siehe Lloyd (1999, 2005, 2005a, 2007).

<sup>45</sup> Siehe Markopoulou / Smolin (1999).

<sup>46</sup> Siehe Bombelli / Lee / Meyer / Sorkin (1987), Sorkin (2003), Rideout / Sorkin (2000, 2001), Rideout (2002), Henson (2006), Surya (2007).

<sup>47</sup> Siehe Oriti (2001, 2003), Livine / Oriti (2003), Perez (2003, 2006), Baez (1998, 2000), Markopoulou / Smolin (1997).

<sup>48</sup> Als Argument hierfür wird zuletzt die Bekenstein-Hawking-Entropie Schwarzer Löcher angeführt, die sogar vom Stringansatz und von der Loop Quantum Gravity reproduziert wird. Siehe Das / Mathur (2001), Lemos (2005), Peet (1998, 2000), Maldacena (1996).

Formal beschreiben die *Quantum Causal Histories* diskrete, gerichtete, lokal finite, zirkelfreie Graphenstrukturen, die für relationale, sich lokal verändernde Netzwerke von Quantensystemen ohne raumzeitlichen Hintergrund stehen. Die Vertices der Graphenstruktur stehen für elementare Ereignisse, die gerichteten Linien für kausale Relationen zwischen jeweils zwei Ereignissen. Für jeden Vertex (= Ereignis) innerhalb des gerichteten Graphen wird ein endlich-dimensionaler Hilbertraum definiert (bzw. eine Matrixalgebra von Operatoren, die auf den entsprechenden Hilbertraum wirken). Jeder Vertex ist also ein Quantensystem. Mit jeder (gerichteten) Linie (= kausale Verbindung zwischen zwei Ereignissen) ist ein Quantenkanal verbunden, der einen Quantenübergang von einem Hilbertraum zu einem anderen beschreibt. Die Graphenstruktur wird somit zu einem Netzwerk von Informationsflüssen zwischen den als Quantensystemen verstandenen Vertices. Prägeometrische *Quantum Causal Histories* sind damit formal identisch mit informationsverarbeitenden Quantensystemen bzw. Quantencomputern.

Es gibt keine raumzeitlichen Freiheitsgrade auf der fundamentalen Ebene. Daher sind die *Quantum Causal Histories* notwendigerweise hintergrundunabhängig. Das erste Ziel auf dem Weg zur Reproduktion der phänomenologischen Implikationen der Allgemeinen Relativitätstheorie, also der Einlösung der basalsten Anforderung an eine Theorie der Quantengravitation, besteht in einer Rekonstruktion der Geometrogenese. Die dynamische Raumzeit und die Gravitation werden im Kontext der prägeometrischen *Quantum Causal Histories* als emergente Phänomene verstanden; sie ergeben sich auf der Grundlage der Dynamik von kohärenten Anregungszuständen (sogenannten *rauschfreien Subsystemen*), die von der Mikrodynamik der Substratebene bestimmt und durch sie erhalten bleiben. Die Allgemeine Relativitätstheorie wird als eine effektive Theorie angesehen, welche die emergente Raumzeit bzw. Gravitation beschreibt. Die Diffeomorphismusinvarianz der Allgemeinen Relativitätstheorie ist dann das emergente Resultat einer relationalen 'geometriefreien' Dynamik auf der prägeometrischen Ebene. (Aber nicht alle prägeometrischen Systeme haben notwendigerweise eine geometrische Phase.) Die (makroskopische) Raumzeit, wenn es zu ihr kommt, ist notwendigerweise dynamisch, weil sie überhaupt erst auf der Grundlage einer (hintergrundunabhängigen) prägeometrischen Dynamik zustandekommt.

Im angezielten Szenario ergeben sich klassische Raumzeit und Gravitation also nicht in Folge einer Mittlung quantengeometrischer Freiheitsgrade - solche gibt es im Kontext der *Quantum Causal Histories* nicht -, sondern auf der Grundlage von langreichweitig propagierenden kohärenten Anregungszuständen. Die Dynamik dieser kohärenten Anregungszustände ist von der Dynamik auf der Substratebene entkoppelt. Die Kausalität, die in den Wechselwirkungen auf der emergenten Makroebene zum Ausdruck kommt, hat im allgemeinen nichts mit der Kausalität auf der Substratebene zu tun. Die Lokalität der Dynamik auf der Makroebene ist ebenso von den lokalen Beziehungen auf der Substratebene zu unterscheiden. Insbesondere ist auch die zeitliche Entwicklung auf der Makroebene, der Ebene der emergenten Raumzeit, die durch die Dynamik der kohärenten Anregungszustände zustandekommt, von der zeitlichen Abfolge auf der Substratebene entkoppelt. Die zeitliche Ordnung wird auf der Substratebene nur lokal in Form kausaler Beziehungen erfasst.

Für die *Quantum Causal Histories* sind insbesondere Geometrogenese und Materiegenese untrennbar miteinander verbunden. Die Materiegenese ist die Voraussetzung zur Emergenz der Raumzeit. Die Emergenz der Raumzeit ist eine notwendige Implikation der Materiegenese. Letztlich gibt es

keine Trennung in geometrogenetische und materiegenetische Freiheitsgrade.<sup>49</sup> Denn die kohärenten Anregungszustände, die sich auf der Grundlage der Substratdynamik ergeben, konstituieren mit ihrer spezifischen, entkoppelten Dynamik gerade deshalb die Raumzeit, weil sie sich so verhalten, als würden sie sich in einer Raumzeit bewegen. Diese langreichweitig propagierenden kohärenten Anregungszustände sind aber gerade die Materieteilchen. Die Raumzeit ist also das Ergebnis der Verhaltens der Materie.

Welcher Art ist jedoch die von den *Quantum Causal Histories* beschriebene Materie? Lässt sich die Beschaffenheit der Materie aus der Substratdynamik ableiten? Wodurch zeichnen sich diese kohärenten Anregungszustände aus, die sich gerade so verhalten, als befänden sie sich in einer Raumzeit? Was ist es, was dazu führt, dass sie erhalten bleiben? - Eine mögliche Antwort lautet: Topologie. Dieser Antwort zufolge lassen sich die kohärenten Anregungszustände mit stabilen topologischen Strukturen identifizieren, genauer: mit topologischen Knotenstrukturen mit Überkreuzungen und Verdrillungen.<sup>50</sup> Grundlage der Erhaltung dieser topologischen Strukturen sind entsprechende Symmetrien bzw. Erhaltungssätze. Die topologischen Eigenschaften dieser Strukturen lassen sich mit den typischen Eigenschaften von Elementarteilchen identifizieren: Ladung entspricht etwa der Verdrillung eines Bandes; entsprechend gibt es topologische Gegenstücke zur Ladungskonjugation, zur Parität sowie zu den Farbeigenschaften von Quarks. Es ist sogar gelungen, die Teilchen des quantenfeldtheoretischen Standardmodells mit spezifischen topologischen Strukturen zu identifizieren.<sup>51</sup> Was allerdings noch fehlt ist eine dynamische Erklärung. Die sich aus der Dynamik der rauschfreien Subsysteme (und der wiederum aus ihr abzuleitenden Translationsinvarianz) ergebende Energieerhaltung sollte nicht zuletzt auch die Massen der Teilchen verstehbar werden lassen.

### 3.4. Fundamentaltheoretische Neukonzeption

Die Frage bleibt jedoch, ob die angesprochenen Ansätze zu einer Theorie der Quantengravitation radikal genug sind, um tatsächlich einerseits die konzeptionellen Widersprüche zwischen Allgemeiner Relativitätstheorie und Quantenmechanik bzw. Quantenfeldtheorien aufzuheben und andererseits zu einer durchweg empirisch angemessenen Beschreibung der Natur zu gelangen. Ist insbesondere die Quantenmechanik auf der fundamentalsten Ebene immer noch gültig, wie dies die *Quantum Causal Histories* etwa noch annehmen? Oder müsste ein noch radikalerer Weg beschritten werden?

Könnte es also möglicherweise erforderlich sein, zur Ausräumung der konzeptionellen Unvereinbarkeiten zwischen Allgemeiner Relativitätstheorie und Quantenmechanik eine 'Theorie der Quantengravitation' zu formulieren, die selbst keine Quantentheorie im engeren Sinne mehr ist? Bisher gibt es nur wenige, die dieser Auffassung sind. Das prominenteste Beispiel ist Gerard 't Hooft, der

---

<sup>49</sup> Für eine präraumzeitliche Substratebene gäbe es auch kaum noch eine Rechtfertigung für die Unterscheidung in geometrogenetische und materiegenetische Freiheitsgrade.

<sup>50</sup> Siehe Bilson-Thompson / Markopoulou / Smolin (2006), Bilson-Thompson (2005).

<sup>51</sup> Siehe Bilson-Thompson / Markopoulou / Smolin (2006), Bilson-Thompson (2005).

eine nicht-quantenmechanische, prägeometrische, deterministische Basaldynamik anstrebt, aber bisher nicht ausformuliert hat.<sup>52</sup>

### 3.5. Anomologisches Substrat

Andere Ansätze und Überlegungen stellen die grundlegende Gesetzesartigkeit der Natur in Frage. Vielleicht ist die scheinbare Nomologie der Natur nicht zuletzt das Ergebnis unserer Methodologie. Vielleicht besitzt die scheinbare, phänomenologisch untermauerbare Nomologie nur approximative Gültigkeit für den makroskopischen und den niederenergetischen Bereich. Vielleicht ist die Natur auf ihrer fundamentalsten Ebene anomologisch und damit in gewisser Hinsicht chaotisch. John Wheeler hat diese Idee als *Law-without-law-Physik*<sup>53</sup> ins Spiel gebracht. Weiter ausgearbeitet wurde sie von Holger Nielsen im Rahmen seiner *Random Dynamics*.<sup>54</sup>

### 3.6. Flickwerk-Physik

Sollten alle auch noch so radikalen Versuche einer Beseitigung der konzeptionellen Inkompatibilitäten zwischen den etablierten physikalischen Theorien auf lange Sicht erfolglos bleiben, bliebe als letzte Option die Auffassung, dass eine einheitliche, konzeptionell kohärente physikalische Beschreibung der Natur vielleicht nicht erreichbar ist. Vielleicht sind physikalische Theorien ausschliesslich als Instrumentarien mit begrenzter explikatorischer Reichweite zu sehen. Vielleicht sind die Bemühungen um eine fundamentale physikalische Weltbeschreibung, die auf die Erfassung einer einheitlichen Substratdynamik abzielt, als unangemessene Extrapolation nomologischer Ambitionen zu sehen. Vielleicht ist also die Annahme einer Einheit der Welt letztendlich falsch. Vielleicht haben wir es mit einer *gesprenkelten Welt*<sup>55</sup> zu tun, die schlichtweg disparate Phänomenbereiche aufweist, welche jeweils eine völlig eigenständige wissenschaftliche Herangehensweise erfordern. Vielleicht gibt es sogar Bereiche der Welt, die sich jeder wissenschaftlichen Erschliessung versperren. - Dann gäbe es keine Theorie der Quantengravitation im angezielten Sinne. Bevor man sich jedoch damit zufrieden gibt, sollte man alles versucht haben und keine der Alternativen - seien sie auch noch so radikal - ausser Acht gelassen haben. Und wann könnte man das schon sagen!

---

<sup>52</sup> Siehe 't Hooft (1999, 2000, 2001, 2001a, 2007), Suarez (2007). Siehe auch Requardt (1996, 1996a, 1996b, 2000) sowie Cahill (2002, 2005), Cahill / Klingler (1996, 1997, 1998, 2005).

<sup>53</sup> Siehe Wheeler (1979, 1983).

<sup>54</sup> Siehe Nielsen (1983), Frogatt / Nielsen (1991), Nielsen / Rugh (1994), Nielsen / Rugh / Surlykke (1994), Bennett / Brene / Nielsen (1987).

<sup>55</sup> Siehe etwa Cartwright (1983, 1989, 1994, 1999). Vgl. auch Morrison (2000).

## 4. Literaturverzeichnis

- Ambjorn, J., 1995: Quantum Gravity represented as Dynamical Triangulation, *Classical and Quantum Gravity* **12**, 2079-2134
- Ambjorn, J. / Jurkiewicz, J. / Loll, R., 2000: A Non-perturbative Lorentzian Path Integral for Gravity, *Physical Review Letters* **85**, 924-927, arXiv: hep-th/0002050
- Ambjorn, J. / Jurkiewicz, J. / Loll, R., 2001: Non-perturbative 3D Lorentzian Quantum Gravity, *Physical Review D* **64**, 044011, arXiv: hep-th/0011276
- Ambjorn, J. / Jurkiewicz, J. / Loll, R., 2001a: Dynamically Triangulating Lorentzian Quantum Gravity, *Nuclear Physics B* **610**, 347-382, arXiv: hep-th/0105267
- Ambjorn, J. / Jurkiewicz, J. / Loll, R., 2004: Emergence of a 4D World from Causal Quantum Gravity, *Physical Review Letters* **93**, 131301, arXiv: hep-th/0404156
- Ambjorn, J. / Jurkiewicz, J. / Loll, R., 2005: Semiclassical Universe from First Principles, *Physics Letters B* **607**, 205-213, arXiv: hep-th/0411152
- Ambjorn, J. / Jurkiewicz, J. / Loll, R., 2005a: Spectral Dimension of the Universe, arXiv: hep-th/0505113
- Ambjorn, J. / Jurkiewicz, J. / Loll, R., 2005b: Reconstructing the Universe, arXiv: hep-th/0505154
- Ambjorn, J. / Jurkiewicz, J. / Loll, R., 2006: Quantum Gravity, or The Art of Building Spacetime, arXiv: hep-th/0604212
- Ambjorn, J. / Loll, R., 1998: Non-perturbative Lorentzian Quantum Gravity, Causality and Topology Change, *Nuclear Physics B* **536**, 407-434, arXiv: hep-th/9805108
- Ashtekar, A., 1986: New Variables for Classical and Quantum Gravity, *Physical Review Letters* **57**, 2244-2247
- Ashtekar, A., 1987: New Hamiltonian Formulation for General Relativity, *Physical Review D* **36**, 1587-1602
- Ashtekar, A., 2007: An Introduction to Loop Quantum Gravity through Cosmology, arXiv: gr-qc/0702030
- Ashtekar, A., 2007a: Loop Quantum Gravity: Four Recent Advances and a Dozen Frequently Asked Questions, arXiv: 0705.2222 [gr-qc]
- Ashtekar, A. / Lewandowski, J., 2004: Background Independent Quantum Gravity - A Status Report, *Classical and Quantum Gravity* **21**, R53, arXiv: gr-qc/0404018
- Ashtekar, A. / Rovelli, C. / Smolin, L., 1992: Weaving a Classical Metric with Quantum Threads, *Physical Review Letters* **69**, 237-240
- Ashtekar, A. / Stachel, J. (Eds.), 1991: *Conceptual Problems of Quantum Gravity*, Boston
- Baez, J., 1998: Spin Foam Models, *Classical and Quantum Gravity* **15**, 1827-1858, arXiv: gr-qc/9709052
- Baez, J., 2000: An Introduction to Spin Foam Models of Quantum Gravity and BF Theory, *Lecture Notes in Physics* **543**, 25-94, arXiv: gr-qc/9905087
- Barcelo, C. / Liberati, S. / Visser, M., 2005: Analogue Gravity, *Living Reviews in Relativity* (Electronic Journal) **8/12**, www.livingreviews.org, auch: arXiv: gr-qc/0505065
- Bardeen, J.M. / Carter, B. / Hawking, S.W., 1973: The Four Laws of Black Hole Mechanics, *Communications in Mathematical Physics* **31**, 161-170
- Barrett, J.W., 1987: The Geometry of Classical Regge Calculus, *Classical and Quantum Gravity* **4**, 1565-1576
- Bekenstein, J.D., 1973: Black Holes and Entropy, *Physical Review D* **7**, 2333-2346
- Bekenstein, J.D., 1974: Generalized Second Law of Thermodynamics in Black Hole Physics, *Physical Review D* **9**, 3292-3300
- Bekenstein, J.D., 1981: Universal Upper Bound on the Entropy-to-Energy Ratio for Bounded Systems, *Physical Review D* **23**, 287-298
- Bekenstein, J.D., 2000: Holographic Bound from Second Law, arXiv: gr-qc/0007062
- Bekenstein, J.D., 2001: The Limits of Information, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **32**, 511-524, arXiv: gr-qc/0009019
- Bekenstein, J.D., 2003: Das holografische Universum, *Spektrum der Wissenschaft* (11/2003), 34-41

- Belot, G. / Earman, J., 1999: From metaphysics to physics, in: Butterfield / Pagonis (1999)
- Belot, G. / Earman, J., 2001: Pre-socratic quantum gravity, in: Callender / Huggett (2001)
- Belot, G. / Earman, J., / Ruetsche, L., 1999: The Hawking Information Loss Paradox: The Anatomy of a Controversy, *British Journal for the Philosophy of Science* **50**, 189-229
- Bennett, D.L. / Brene, N. / Nielsen, H., 1987: Random Dynamics, *Physica Scripta* **T 15**, 158-163
- Bilson-Thompson, S.O., 2005: A Topological Model of Composite Preons, arXiv: hep-ph/0503213
- Bilson-Thompson, S.O. / Markopoulou, F. / Smolin, L., 2006: Quantum Gravity and the Standard Model, arXiv: hep-th/0603022
- Bombelli, L. / Lee, J. / Meyer, D. / Sorkin, R.D., 1987: Space-Time as a Causal Set, *Physical Review Letters* **59**, 521-524
- Bousso, R., 2002: The Holographic Principle, *Reviews of Modern Physics* **74**, 825-874, arXiv: hep-th/0203101
- Butterfield, J. / Isham, C., 1999: On the Emergence of Time in Quantum Gravity, in: J. Butterfield (Ed.): *The Arguments of Time*, Oxford, 111-168; auch: arXiv: gr-qc/9901024
- Butterfield, J. / Isham, C., 2001: Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity, in: Callender / Huggett (2001), auch: arXiv: gr-qc/9903072
- Butterfield, J. / Pagonis, C. (Eds.), 1999: *From Physics to Philosophy*, Cambridge
- Cahill, R.T., 2002: Process Physics - From Quantum Foam to General Relativity, arXiv: gr-qc/0203015
- Cahill, R.T., 2005: *Process Physics - From Information Theory to Quantum Space and Matter*, New York, auch: [www.scieng.flinders.edu.au/cpes/people/cahill\\_r/HPS13.pdf](http://www.scieng.flinders.edu.au/cpes/people/cahill_r/HPS13.pdf)
- Cahill, R.T. / Klinger, C.M., 1996: Pregeometric Modelling of the Spacetime Phenomenology, *Physics Letters A* **223**, 313-319, arXiv: gr-qc/9605018
- Cahill, R.T. / Klinger, C.M., 1997: Bootstrap Universe from Self-Referential Noise, arXiv: gr-qc/9708013
- Cahill, R.T. / Klinger, C.M., 1998: Self-Referential Noise and the Synthesis of Three-Dimensional Space, arXiv: gr-qc/9812083
- Cahill, R.T. / Klinger, C.M., 2005: Bootstrap Universe from Self-Referential Noise, *Progress in Physics*, **2**, 108-112, auch: [www.scieng.flinders.edu.au/cpes/people/cahill\\_r/CahillBoot.pdf](http://www.scieng.flinders.edu.au/cpes/people/cahill_r/CahillBoot.pdf)
- Callender, C. / Huggett, N. (Eds.), 2001: *Physics meets Philosophy at the Planck Scale. Contemporary Theories of Quantum Gravity*, Cambridge
- Callender, C. / Huggett, N., 2001a: Introduction, in: Callender / Huggett (2001)
- Callender, C. / Huggett, N., 2001b: Why quantize Gravity (or any other field for the matter)?, *Philosophy of Science* (Proceedings), **68**, S382-S394
- Cartwright, N., 1983: *How the Laws of Physics lie*, Oxford
- Cartwright, N., 1989: *Nature's Capacities and Their Measurement*, Oxford
- Cartwright, N., 1994: Fundamentalism vs the Patchwork of Laws, *Proceedings of the Aristotelian Society* **93**, 279-292
- Cartwright, N., 1999: *The Dappled World*, Cambridge
- Cremmer, E. / Julia, B. / Scherk, J., 1978: Supergravity Theory in Eleven Dimensions, *Physics Letters B* **76**, 409-412
- Das, S.R. / Mathur, S.D., 2001: The Quantum Physics of Black Holes - Results from String Theory, *Annual Reviews of Nuclear Particle Science* **50**, 153-206, arXiv: gr-qc/0105063
- DeWitt, B.S., 1967: Quantum Theory of Gravity. I. The Canonical Theory, *Physical Review* **160**, 1113-1148
- DeWitt, B.S., 1967a: Quantum Theory of Gravity. II. The Manifestly Covariant Theory, *Physical Review* **162**, 1195-1239
- DeWitt, B.S., 1967b: Quantum Theory of Gravity. III. Applications of the Covariant Theory, *Physical Review* **162**, 1239-1256
- Dreyer, O., 2004: Background Independent Quantum Field Theory and the Cosmological Constant Problem, arXiv: hep-th/0409048
- Dreyer, O., 2006: Emergent General Relativity, arXiv: gr-qc/0604075
- Earman, J., 1986: Why Space is not a Substance (at least not to the first degree), *Pacific Philosophical Quarterly* **67**, 225-244

- Earman, J., 1989: *World Enough and Spacetime - Absolute Versus Relational Theories of Space and Time*, Cambridge, Ma.
- Earman, J., 2002: Thoroughly Modern McTaggart. Or what McTaggart would have said if he had learned General Relativity Theory, *Philosopher's Imprint* **2**, 1-28, <http://www.philosophersimprint.org>
- Earman, J., 2006: Two Challenges to the Requirement of Substantive General Covariance, *Synthese* **148**, 443-468
- Earman, J., 2006a: The Implications of General Covariance for the Ontology and Ideology of Spacetime, in: D. Dieks (Ed.): *The Ontology of Spacetime*, Amsterdam, 3-23
- Earman, J. / Butterfield, J. (Eds.), 2007: *Handbook of the Philosophy of Science, Vol. 2: The Philosophy of Physics*, Amsterdam
- Earman, J. / Norton, J.D., 1987: What Price Spacetime Substantivalism? - The Hole Story, *British Journal for the Philosophy of Science* **38**, 515-525
- Ehlers, J. / Friedrich, H. (Eds.), 1994: *Canonical Gravity - From Classical to Quantum*, Berlin
- Eling, C. / Guedens, R. / Jacobson, T., 2006: Non-Equilibrium Thermodynamics of Spacetime, *Physical Review Letters* **96**, 121301, arXiv: gr-qc/0602001
- Froggatt, C.D. / Nielsen, H.B., 1991: *Origin of Symmetries*, Singapore
- Gambini, R. / Porto, R.A. / Pullin, J., 2003: Consistent Discrete Gravity Solution of the Problem of Time: A Model, in: K. Kokkotas / N. Stergioulas (Eds.): *Recent Developments in Gravity - Proceedings of the 10th Hellenic Relativity Conference*, Singapore, arXiv: gr-qc/0302064
- Gambini, R. / Pullin, J., 2003: Discrete Quantum Gravity: A Mechanism for Selecting the Value of Fundamental Constants, *International Journal of Modern Physics D* **12**, 1775-1782, arXiv: gr-qc/0306095
- Gambini, R. / Pullin, J., 2004: Consistent Discretization and Quantum Gravity, arXiv: gr-qc/0408025
- Gambini, R. / Pullin, J., 2005: Classical and Quantum General Relativity: A New Paradigm, arXiv: gr-qc/0505052
- Gambini, R. / Pullin, J., 2005a: Consistent Discretizations as a Road to Quantum Gravity, arXiv: gr-qc/0512065
- Gambini, R. / Pullin, J., 2005b: Discrete Space-Time, arXiv: gr-qc/0505023
- Gentle, A.P., 2002: Regge Calculus - A Unique Tool for Numerical Relativity, *General Relativity and Gravitation* **34**, 1701-1718, arXiv: gr-qc/0408006
- Hardy, L., 2007: Quantum Gravity Computers: On the Theory of Computation with Indefinite Causal Structure, arXiv: quant-ph/0701019
- Hauser, A. / Corichi, A., 2005: Bibliography of Publications related to Classical Self-Dual Variables and Loop Quantum Gravity, arXiv: gr-qc/0509039
- Hawking, S.W., 1974: Black Hole Explosions, *Nature* **248**, 30ff
- Hawking, S.W., 1975: Particle Creation by Black Holes, *Communications in Mathematical Physics* **43**, 199-220
- Hawking, S.W., 1976: The Breakdown of Predictability in Gravitational Collapse, *Physical Review D* **14**, 2460-2473
- Hawking, S.W., 1982: The Unpredictability of Quantum Gravity, *Communications in Mathematical Physics* **87**, 395-415
- Hawking, S.W., 2005: Information Loss in Black Holes, *Physical Review D* **72**, 084013, arXiv: hep-th/0507171
- Hawkins, E. / Markopoulou, F. / Sahlmann, H., 2003: Evolution in Quantum Causal Histories, arXiv: hep-th/0302111
- Hedrich, R., 2002: Anforderungen an eine physikalische Fundamentaltheorie, *Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie / Journal for General Philosophy of Science* **33/1**, 23-60
- Hedrich, R., 2002a: Superstring Theory and Empirical Testability, <http://philsci-archive.pitt.edu>, Dokument PITT-PHIL-SCI00000608
- Hedrich, R., 2006: String Theory - From Physics to Metaphysics, (i) *Physics and Philosophy* (Online-Zeitschrift) 2006, 005; (ii) <http://philsci-archive.pitt.edu>, Dokument PITT-PHIL-SCI00002709; (iii) arXiv: physics/0604171
- Hedrich, R., 2007: *Von der Physik zur Metaphysik - Physikalische Vereinheitlichung und Stringansatz*, Frankfurt am Main / Paris / Ebikon / Lancaster / New Brunswick
- Hedrich, R., 2007a: The Internal and External Problems of String Theory - A Philosophical View, (i) *Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie / Journal for General Philosophy of Science* **38** (2007) 261-278; (ii) <http://philsci-archive.pitt.edu>, Dokument: PITT-PHIL-SCI00003012; (iii) arXiv: physics/0610168
- Henson, J., 2006: The Causal Set Approach to Quantum Gravity, arXiv: gr-qc/0601121

- Hsu, S.D.H., 2007: Information, Information Processing and Gravity, arXiv: 0704.1154 [hep-th]
- Hu, B.L., 2005: Can Spacetime be a Condensate, *International Journal of Theoretical Physics* **44**, 1785-1806, arXiv: gr-qc/0503067
- Hu, B.L. / Verdaguer, E., 2003: Stochastic Gravity: A Primer with Applications, *Classical and Quantum Gravity* **20**, R1-R42, arXiv: gr-qc/0211090
- Hu, B.L. / Verdaguer, E., 2004: Stochastic Gravity: Theory and Applications, *Living Reviews in Relativity* (Electronic Journal) **7/3**, www.livingreviews.org; auch: arXiv: gr-qc/0307032
- Jacobson, E., 1995: Thermodynamics of Spacetime: The Einstein Equation of State, *Physical Review Letters* **75**, 1260-1263, arXiv: gr-qc/9504004
- Jacobson, T., 1999: On the Nature of Black Hole Entropy, arXiv: gr-qc/9908031
- Jacobson, T. / Parentani, R., 2003: Horizon Entropy, *Foundations of Physics* **33**, 323
- Kaku, M., 1999: *Introduction to Superstrings and M-Theory*, 2nd Ed., New York
- Kaplunovsky, V. / Weinstein, M., 1985: Space-Time: Arena or Illusion?, *Physical Review D* **31**, 1879-1898
- Kiefer, C., 1994: Probleme der Quantengravitation, *Philosophia Naturalis* **31**, 309-327
- Kiefer, C., 2004: *Quantum Gravity*, Oxford
- Kiefer, C., 2005: Quantum Gravity: General Introduction and Recent Developments, *Annalen der Physik* **15**, 129-148, arXiv: gr-qc/0508120
- Konopka, T. / Markopoulou, F. / Smolin, L., 2006: Quantum Graphity, arXiv: hep-th/0611197
- Kribs, D.W. / Markopoulou, F., 2005: Geometry from Quantum Particles, arXiv: gr-qc/0510052
- Kuchar, K., 1986: Canonical Geometrodynamics and General Covariance, *Foundations of Physics* **16**, 193-208
- Kuchar, K., 1991: The Problem of Time in Canonical Quantization of Relativistic Systems, in: Ashtekar / Stachel (1991), 141-171
- Kuchar, K., 1992: Time and Interpretation of Quantum Gravity, in: G. Kunstatter et al. (Eds.): *Proceedings of the 4th Canadian Conference on General Relativity and Relativistic Astrophysics*, Singapore
- Kuchar, K., 1993: Canonical Quantum Gravity, arXiv: gr-qc/9304012
- Lemos, J.P.S., 2005: Black Holes and Fundamental Physics, arXiv: gr-qc/0507101
- Livine, E.R. / Oriti, D., 2003: Implementing Causality in the Spin Foam Quantum Geometry, *Nuclear Physics B* **663**, 231-279, arXiv: gr-qc/0210064
- Livine, E.R. / Terno, D.R., 2007: Quantum Causal Histories in the Light of Quantum Information, *Physical Review D* **75**, 084001, arXiv: gr-qc/0611135
- Lloyd, S., 1999: Universe as Quantum Computer, arXiv: quant-ph/9912088
- Lloyd, S., 2005: The Computational Universe - Quantum Gravity from Quantum Computation, arXiv: quant-ph/0501135
- Lloyd, S., 2005a: A Theory of Quantum Gravity based on Quantum Computation, arXiv: quant-ph/0501135
- Lloyd, S., 2007: *Programming the Universe: A Quantum Computer Scientist takes on the Cosmos*, New York
- Loll, R., 1998: Discrete Approaches to Quantum Gravity in Four Dimensions, *Living Reviews in Relativity* (Electronic Journal), www.livingreviews.org
- Loll, R., 2001: Discrete Lorentzian Quantum Gravity, *Nuclear Physics B* **94** (Proc. Suppl.), 96-107, arXiv: hep-th/0011194
- Loll, R., 2003: A Discrete History of the Lorentzian Path Integral, in: D. Giulini / C. Kiefer / C. Lämmerzahl (Eds.): *Quantum Gravity - From Theory to Experimental Search*, Berlin, auch: arXiv: hep-th/0212340
- Loll, R., 2007: The Emergence of Spacetime, or, Quantum Gravity on Your Desktop, arXiv: 0711.0273 [gr-qc]
- Loll, R. / Ambjorn, J. / Jurkiewicz, J., 2005: The Universe from Scratch, arXiv: hep-th/0509010
- Maldacena, J.M., 1996: *Black Holes in String Theory*, Ph.D. Thesis, arXiv: hep-th/9607235
- Markopoulou, F., 2000: The Internal Description of a Causal Set: What the Universe looks like from the inside, *Communications in Mathematical Physics* **211**, 559, arXiv: gr-qc/9811053
- Markopoulou, F., 2000a: Quantum Causal Histories, *Classical and Quantum Gravity* **17**, 2059, arXiv: hep-th/9904009
- Markopoulou, F., 2000b: An Insider's Guide to Quantum Causal Histories, *Nuclear Physics B* **88** (Proc. Suppl.), 308-313, arXiv: hep-th/9912137

- Markopoulou, F., 2002: Planck-Scale Models of the Universe, arXiv: gr-qc/0210086
- Markopoulou, F., 2006: Towards Gravity from the Quantum, arXiv: hep-th/0604120
- Markopoulou, F., 2007: New Directions in Background Independent Quantum Gravity, arXiv: gr-qc/0703097
- Markopoulou, F. / Smolin, L., 1997: Causal Evolution of Spin Networks, *Nuclear Physics B* **508**, 409, arXiv: gr-qc/9702025
- Markopoulou, F. / Smolin, L., 1999: Holography in a Quantum Spacetime, arXiv: hep-th/9910146
- Marolf, D., 2004: Resource Letter: The Nature and Status of String Theory, *American Journal of Physics* **72**, 730, arXiv: hep-th/0311044
- Morrison, M., 2000: *Unifying Scientific Theories. Physical Concepts and Mathematical Structures*. Cambridge
- Nicolai, H. / Peeters, K., 2006: Loop and Spin Foam Quantum Gravity, arXiv: hep-th/0601129
- Nicolai, H. / Peeters, K. / Zamaklar, M., 2005: Loop Quantum Gravity: An Outside View, *Classical and Quantum Gravity* **22**, R193, arXiv: hep-th/0501114
- Nielsen, H.B., 1983: Field Theories without Fundamental Gauge Symmetries, *Philosophical Transactions of the Royal Society London A* **310**, 261-272
- Nielsen, H.B. / Rugh, S.E., 1994: Why do we live in 3+1 dimensions?, arXiv: hep-th/9407011
- Nielsen, H.B. / Rugh, S.E. / Surlykke, C., 1994: Seeking Inspiration from the Standard Model in order to go beyond it, arXiv: hep-th/9407012
- Norton, J.D., 1988: The Hole Argument, in: A. Fine / J. Leplin (Eds.): *PSA 1988*, Vol. 2, East Lansing, 56-64
- Norton, J.D., 1993: General Covariance and the Foundations of General Relativity, *Reports on Progress in Physics* **56**, 791-858
- Norton, J.D., 2004: The Hole Argument, in: E.N. Zalta (Ed.): *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu>
- Oriti, D., 2001: Spacetime Geometry from Algebra: Spin Foam Models for non-perturbative Quantum Gravity, *Reports on Progress in Physics* **64**, 1489-?, arXiv: gr-qc/0106091
- Oriti, D., 2003: *Spin Foam Models of Quantum Spacetime*, Ph.D. Thesis, arXiv: gr-qc/0311066
- Oriti, D., 2006: A Quantum Field Theory of Simplicial Geometry and the Emergence of Spacetime, arXiv: hep-th/0612301
- Padmanabhan, T., 2002: Gravity from Spacetime Thermodynamics, arXiv: gr-qc/0209088
- Padmanabhan, T., 2004: Gravity as Elasticity of Spacetime: A Paradigm to understand Horizon Thermodynamics and Cosmological Constant, *International Journal of Modern Physics D* **13**, 2293-2298, arXiv: gr-qc/0408051
- Padmanabhan, T., 2007: Gravity as an Emergent Phenomenon: A Conceptual Description, arXiv: 0706.1654 [gr-qc]
- Peet, A.W., 1998: The Bekenstein Formula and String Theory, *Classical and Quantum Gravity* **15**, 3291-3338, arXiv: hep-th/9712253
- Peet, A.W., 2000: TASI Lectures on Black Holes in String Theory, arXiv: hep-th/0008241
- Peres, A. / Terno, D.R., 2001: Hybrid Classical-Quantum Dynamics, *Physical Review A* **63**, 022101
- Perez, A., 2003: Spin Foam Models for Quantum Gravity, *Classical and Quantum Gravity* **20**, R43-R104, arXiv: gr-qc/0301113
- Perez, A., 2006: The Spin-Foam-Representation of Loop Quantum Gravity, arXiv: gr-qc/0601095
- Polchinski, J.G., 2000: *String Theory. Vol. 1: An Introduction to the Bosonic String*, Cambridge
- Polchinski, J.G., 2000a: *String Theory. Vol. 2: Superstring Theory and Beyond*, Cambridge
- Pons, J.M. / Salisbury, D.C., 2005: The Issue of Time in Generally Covariant Theories and the Komar-Bergmann Approach to Observables in General Relativity, *Physical Review D* **71**, 124012, arXiv: gr-qc/0503013
- Regge, T. / Williams, R.M., 2000: Discrete Structures in Quantum Gravity, *Journal of Mathematical Physics* **41**, 3964, arXiv: gr-qc/0012035
- Requardt, M., 1996: Discrete Mathematics and Physics on the Planck-Scale exemplified by means of a Class of 'Cellular Network Models' and their Dynamics, arXiv: hep-th/9605103
- Requardt, M., 1996a: Emergence of Space-Time on the Planck-Scale Described as an Unfolding Phase Transition within the Scheme of Dynamical Cellular Networks and Random Graphs, arXiv: hep-th/9610055

- Requardt, M., 1996b: Emergence of Space-Time on the Planck-Scale within the Scheme of Dynamical Cellular Network Models and Random Graphs, arXiv: hep-th/9612185
- Requardt, M., 2000: Let's Call it Nonlocal Quantum Physics, arXiv: gr-qc/0006063
- Rickles, D., 2004: Time and Structure in Canonical Gravity, <http://philsci-archive.pitt.edu>
- Rickles, D., 2005: Interpreting Quantum Gravity, <http://philsci-archive.pitt.edu>, Document: PITT-PHIL-SCI00002407
- Rideout, D.P., 2002: Dynamics of Causal Sets, arXiv: gr-qc/0212064
- Rideout, D.P. / Sorkin, R.D., 2000: A Classical Sequential Growth Dynamics for Causal Sets, *Physical Review D* **61**, 024002, arXiv: gr-qc/9904062
- Rideout, D.P. / Sorkin, R.D., 2001: Evidence for a Continuum Limit in Causal Set Dynamics, *Physical Review D* **63**, 104011, arXiv: gr-qc/0003117
- Rovelli, C., 1991: Loop Representation in Quantum Gravity: The Transform Approach, in: Ashtekar / Stachel (1991), 427-439
- Rovelli, C., 1997: Loop Quantum Gravity, *Living Reviews in Relativity* (Electronic Journal), [www.livingreviews.org](http://www.livingreviews.org); auch: arXiv: gr-qc/9710008
- Rovelli, C., 1998: Strings, Loops, and the Others: A Critical Survey on the Present Approaches to Quantum Gravity, in: N. Dadhich / J. Narlikar (Eds.): *Gravitation and Relativity: At the Turn of the Millenium*, Poona, arXiv: gr-qc/9803024
- Rovelli, C., 2003: A Dialog on Quantum Gravity, *International Journal of Modern Physics* **12**, 1, arXiv: hep-th/0310077
- Rovelli, C., 2004: *Quantum Gravity*, Cambridge
- Rovelli, C., 2007: Quantum Gravity, in: Earman / Butterfield (2007)
- Sakharov, A.D., 2000: Vacuum Quantum Fluctuations in Curved Space and the Theory of Gravitation, *General Relativity and Gravitation* **32**, 365-367 (Reprint; Original: *Doklady Akademii Nauk SSSR* **177** (1967) 70-71 / *Soviet Physics Doklady* **12** (1968) 1040-1041)
- Smolin, L., 1991: Nonperturbative Quantum Gravity via the Loop Representation, in: Ashtekar / Stachel (1991), 440-489
- Smolin, L., 2000: *Three Roads to Quantum Gravity*, London
- Sorkin, R.D., 2003: Causal Sets: Discrete Gravity, arXiv: gr-qc/0309009
- Suarez, A., 2007: Classical Demons and Quantum Angels: On 't Hooft's Deterministic Quantum Mechanics, arXiv: 0705.3974 [quant-ph]
- Surya, S., 2007: Causal Set Topology, arXiv: 0712.1648 [gr-qc]
- Tahim, M.O. et al., 2007: Spacetime as a deformable Solid, arXiv: 0705.4120 [gr-qc]
- Terno, D.R., 2006: Inconsistency of Quantum-Classical Dynamics, and What it Implies, *Foundations of Physics* **36**, 102-111, arXiv: quant-ph/0402092
- Thiemann, T., 2001: *Introduction to Modern Canonical Quantum General Relativity*, arXiv: gr-qc/0110034
- Thiemann, T., 2006: Loop Quantum Gravity: An Inside View, arXiv: hep-th/0608210
- 't Hooft, G., 1999: Quantum Gravity as a Dissipative Deterministic System, *Classical and Quantum Gravity* **16**, 3263-3279, arXiv: gr-qc/9903084
- 't Hooft, G., 2000: Determinism and Dissipation in Quantum Gravity, arXiv: hep-th/0003005
- 't Hooft, G., 2001: How does God play dice? - (Pre-)Determinism at the Planck-Scale, arXiv: hep-th/0104219
- 't Hooft, G., 2001a: Obstacles on the Way Towards the Quantisation of Space, Time and Matter - and Possible Resolutions, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **32**, 157-180
- 't Hooft, G., 2007: Emergent Quantum Mechanics and Emergent Symmetries, arXiv: 0707.4568 [hep-th]
- Unruh, W. / Wald, R., 1989: Time and the Interpretation of Canonical Quantum Gravity, *Physical Review D* **40**, 2598-2614
- Visser, M., 2002: Sakharov's Induced Gravity: A Modern Perspective, *Modern Physics Letters A* **17**, 977-992, arXiv: gr-qc/0204062
- Volovik, G.E., 2000: Links between Gravity and Dynamics of Quantum Liquids, arXiv: gr-qc/0004049

- Volovik, G.E., 2001: Superfluid Analogies of Cosmological Phenomena, *Physics Reports* **352**, 195-348, arXiv: gr-qc/0005091
- Volovik, G.E., 2003: *The Universe in a Helium Droplet*, Oxford
- Volovik, G.E., 2006: From Quantum Hydrodynamics to Quantum Gravity, arXiv: gr-qc/0612134
- Volovik, G.E., 2007: Fermi-Point Scenario for Emergent Gravity, arXiv: 0709.1258 [gr-qc]
- Wald, R.M., 2001: The Thermodynamics of Black Holes, *Living Reviews in Relativity* (Electronic Journal) **4/6**, [www.livingreviews.org](http://www.livingreviews.org); auch: arXiv: gr-qc/9912119
- Weinfurter, S.C.E., 2007: *Emergent Spacetimes*, Ph.D. Thesis, arXiv: 0711.4416 [gr-qc]
- Wheeler, J.A., 1979: Frontiers of Time, in: N. Toraldo di Francia (Ed.): *Problems in the Foundations of Physics. Proceedings of the International School of Physics 'Enrico Fermi', Course 72*, Amsterdam
- Wheeler, J.A., 1983: Law without Law, in: J.A. Wheeler / W.H. Zurek (Eds.): *Quantum Theory and Measurement*, Princeton, N.J.
- Wheeler, J.A., 1989: Information, Physics, Quantum: the Search for Links, in: *Proceedings 3rd International Symposium on the Foundation of Quantum Mechanics*, Tokyo, 354-368; auch in: W.H. Zurek (Ed.): *Complexity, Entropy and the Physics of Information*, New York (1990), 3-28
- Williams, R.M. / Tuckey, P.A., 1992: Regge Calculus - A Brief Review and Bibliography, *Classical and Quantum Gravity* **9**, 1409-1422
- Zhang, S.-C., 2002: To see a World in a Grain of Sand, arXiv: hep-th/0210162
- Zizzi, P.A., 2001: Quantum Computation toward Quantum Gravity, *General Relativity and Gravitation* **33**, 1305-1318, arXiv: gr-qc/0008049
- Zizzi, P.A., 2004: Computability at the Planck Scale, arXiv: gr-qc/0412076
- Zizzi, P.A., 2005: A Minimal Model for Quantum Gravity, *Modern Physics Letters A* **20**, 645-653, arXiv: gr-qc/0409069