

# Lorentz forever? – Warum die Lorentz–Invarianz verletzt sein könnte\*

C. Lämmerzahl

Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM),  
Universität Bremen, Am Fallturm, 28359 Bremen

23. Januar 2005

## Zusammenfassung

Die Lorentz–Symmetrie, die wesentliche Ingredienz der Speziellen Relativitätstheorie, ist auch Dank neuer Entwicklungen in der Experimentiertechnik eine der experimentell am besten bestätigten Tatsachen. Trotzdem gibt es mehr und mehr theoretische Physiker, die von einer winzigen Verletzung dieser Symmetrie überzeugt sind. Der Grund dafür liegt in der Suche nach einer Quantengravitationstheorie, die durch die Inkonsistenz zwischen Quantentheorie und Allgemeiner Relativitätstheorie begründet ist. In der Tat kann aus den bisherigen Ansätzen zur Quantengravitation wie der Stringtheorie, der kanonischen/Loop–Quantengravitation und der nichtkommutativen Geometrie auf recht natürliche Art auf eine Verletzung der Lorentz–Invarianz bei hohen Energien geschlossen werden. In diesem Artikel soll zunächst geklärt werden, was unter einer Verletzung der Lorentz–Invarianz zu verstehen ist. Sodann werden diese anvisierten Verletzungen motiviert und veranschaulicht. Mögliche experimentelle Methoden, diese Verletzungen vielleicht doch der Messung oder Beobachtung zugänglich zu machen, werden diskutiert.

## 1 Einleitung

Die 1905 von Einstein aufgestellte Spezielle Relativitätstheorie (SRT) ist eine der erfolgreichsten und einflussreichsten Theorien der Physik. Sie revolutionierte unser physikalisches Weltbild, führte zu einer neuen Vorstellung von Raum und Zeit und beeinflusste die Entwicklung weiterer physikalischer Theorien (siehe [1] für eine Übersicht). Eine dieser neuen Theorien ist die Allgemeine Relativitätstheorie [2], die die SRT ablöste. Dabei blieb jedoch der wesentliche Grundpfeiler der SRT, die Lorentz–Invarianz (LI) der Physik erhalten, die besagt, dass alle Experimente in allen Inertialsysteme gleich ablaufen. Genau genommen ist die LI nur lokal gültig, d.h. in Raum–Zeit–Bereichen, in denen die Raum–Zeit–Krümmung bzw. die Gezeitenkräfte vernachlässigt werden können.

Die SRT bzw. das Prinzip der LI hat nicht nur "esoterische" Konsequenzen für eine korrekte Beschreibung von physikalischen Experimenten z.B. in der Hochenergiephysik, sondern hat auch enorme Bedeutung für das tägliche Leben. Es ist notwendig, damit satellitengestützte Positionierungssysteme GPS die richtigen Entfernungen berechnen können (ohne Berücksichtigung der SRT würden sich täglich Fehler von bis zu 2 km ergeben), um eindeutig Zeiten und Längen definieren zu können und um spektroskopische Daten, die z.B. zur Analyse von Materialien verwendet werden, richtig deuten zu können. Daher hat die SRT auch eine essentielle praktische Bedeutung.

Obwohl es in diesem Artikel darum geht, mögliche Verletzungen der LI zu motivieren, zu veranschaulichen und zu diskutieren, soll hier gleich betont werden, dass es bisher kein einziges Experiment gibt, welches im Widerspruch zur LI steht. Die LI wird immer weiter durch die genauesten Tests

---

\*Eingereicht bei *Praxis der Naturwissenschaften, Physik*.

bestätigt. Falls in einem Experiment eine Abweichung von der LI festgestellt werden sollte, wäre dies eine Sensation und würde unser physikalisches Weltbild revolutionieren.

In diesem Artikel gehen wir zunächst auf den Stand der theoretischen Beschreibung der Physik ein. Diese besagt, dass die heutige theoretische Beschreibung irgendwo falsch ist: es gibt eine Inkonsistenz zwischen Quantentheorie und Allgemeiner Relativitätstheorie. Daher muss die Beschreibung der Physik geändert werden; es besteht die Notwendigkeit eine neue Theorie aufzustellen. Alle bisherigen Ansätze für solch eine Theorie verletzen logischerweise Prinzipien, die der heutigen Physik zugrunde liegen. Unter anderem kann dies die LI sein. Damit dies besser verstanden und bewertet werden kann, werden wir danach die Grundlagen der SRT und damit die der heutigen Physik allgemein diskutieren. Insbesondere werden wir die Besonderheiten der SRT und speziell der LI darlegen. Wir wollen betonen, dass es überhaupt kein Beinbruch wäre, wenn diese Theorie durch eine andere ersetzt werden würde. Die Entscheidung muss das Experiment treffen — die Physiker sind dann gezwungen, dem Experiment Folge zu leisten, ob sie es wollen, oder nicht.

## 2 Die gegenwärtige Situation der Physik

### 2.1 Die Ausgangslage

Die heutige theoretische Beschreibung der physikalischen Phänomene ist durch zwei Klassen von Theorien gekennzeichnet: Zum einen gibt es universelle Theorien, die bei der Beschreibung *aller* physikalischer Phänomene zu berücksichtigen sind, sowie die Theorien, die die verschiedenen Wechselwirkungen beschreiben. Zu den universellen Theorien gehört die Quantentheorie, da alle Materie letztendlich mikroskopischen Ursprungs ist und damit durch die der Mikrophysik zugrundeliegenden Theorie, der Quantentheorie, zu beschreiben ist. Außerdem müssen aufgrund des allgemeingültigen Relativitätsprinzips (siehe unten) alle Theorien lorentzinvariant formuliert sein. Da Gravitation an alle Formen von Energie und damit an alle Formen von Materie koppelt, gehört auch die Allgemeine Relativitätstheorie zu den universell anzuwendenden Theorien. Zu guter Letzt kann auch die statistische Physik zu den Universaltheorien gezählt werden, da diese Aussagen über Phänomene macht, die aus einer großen Anzahl von Freiheitsgraden stammen, unabhängig davon, welche Systeme betrachtet werden.

Neben diesen allgemeingültigen Theorien gibt es die Theorien, die die vier bekannten Wechselwirkungen, nämlich die elektromagnetische, die schwache, die starke und die gravitative Wechselwirkung, beschreiben. Dabei konnten die ersten drei Wechselwirkungen schon in einem gewissen Maß im Rahmen einer Eichtheorie vereinigt werden. Die vierte Wechselwirkung, die Gravitation, die durch die Allgemeine Relativitätstheorie beschrieben wird, widersetzt sich allerdings einer Vereinheitlichung mit den anderen drei Wechselwirkungen.

Universelle Theorien	Wechselwirkungen
Quantentheorie	Elektrodynamik
Spezielle Relativitätstheorie	Gravitation
Allgemeine Relativitätstheorie	Schwache Wechselwirkung
Statistische Mechanik	Starke Wechselwirkung
Problem	Wunsch
Inkompatibilität der Quantentheorie und der Allgemeine Relativitätstheorie	Vereinheitlichung aller Wechselwirkungen

## 2.2 Eine Inkonsistenz

Soweit wäre ja alles in Ordnung, wenn es da nicht ein wesentliches Problem gäbe: Es hat sich gezeigt, dass die Quantentheorie und die Allgemeine Relativitätstheorie nicht miteinander kompatibel sind: da alle Formen der Materie den Regeln der Quantentheorie unterworfen sind, d.h. quantisiert sind, müssen aus Konsistenzgründen auch die Felder, die die Wechselwirkungen zwischen dieser Materie vermitteln, ebenfalls quantisiert werden. Sehr erfolgreich wurde dies durch die Quantisierung des elektromagnetischen Feldes gezeigt, welches zur Quantenelektrodynamik QED führte, die bisher alle Experimente erfolgreich mit höchster Genauigkeit beschreibt. Dies konnte auch direkt z.B. mittels des Casimir-Effektes nachgewiesen werden (siehe Abschnitt 8.2).

Wie die quantisierte Materie mit dem elektromagnetischen Feld wechselwirkt, so konnte auch mit höchster Präzision gezeigt werden, dass auch die Elementarteilchen mit dem Gravitationsfeld wechselwirken. Dies wurde z.B. in Neutroneninterferometrie-Experimenten gezeigt: Die in dem Experiment beobachtete Verschiebung der Interferenzstreifen konnte eindeutig der Wechselwirkung mit dem Gravitationsfeld zugeordnet werden. Viel genauer, wenn auch nicht so anschaulich, konnte dies mittels Atominterferometrie nachgewiesen werden. Außerdem konnten auch schon quantisierte Zustände von Neutronen in einem gravitativen Bindungspotential nachgewiesen werden. Daher wirkt das Gravitationsfeld in derselben Art und Weise wie das elektrische Feld auf Quantenmaterie, wenn auch mit einer anderen Kopplungsstruktur und mit unterschiedlicher Stärke.

Daher sollte analog zur elektromagnetischen Wechselwirkung auch das Gravitationsfeld, welches die gravitative Wechselwirkung zwischen allen Materieformen beschreibt, quantisiert werden. Mit den Regeln der heutigen Quantentheorie ist dies allerdings nicht möglich. Es zeigte sich, dass die auch in der QED auftretenden Unendlichkeiten bei der Quantisierung der Gravitation nicht reguliert bzw. wegrenormiert werden können. Man kann also die Allgemeine Relativitätstheorie im Rahmen der heutigen Physik nicht quantisieren. Da man aber aus besagten Konsistenzgründen eine quantisierte Form der Gravitation benötigt, muss man entweder die Allgemeine Relativitätstheorie oder die Quantentheorie ändern, um beide Arten universeller Beschreibungen unter einen Hut zu bekommen. Es konnte z.B. auch gezeigt werden, dass, wenn man die Gravitation nicht quantisieren würde, Überlichtgeschwindigkeiten auftreten, die als Konsequenz die Kausalität verletzen.

Wir halten also fest, dass die heutige theoretische Beschreibung der physikalischen Phänomene nicht korrekt sein kann. Wie oben schon gesagt beruht diese Beschreibung im Wesentlichen auf den Gesetzen der Quantentheorie und denjenigen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die Gesetze der ART und der QM sind in den Einsteinschen Feldgleichungen sowie in den Gleichungen, die die Dynamik der Materie, das sind die Maxwell-Gleichungen und die Dirac-Gleichung, enthalten, wobei letztere in ihrer quantisierten Form zur korrekten Beschreibung der Phänomene zu verwenden sind. Die Lorentz-Invarianz der SRT liegt als wesentliche Grundlage sowohl der Allgemeinen Relativitätstheorie als auch der in der Quantentheorie auftretenden Feldgleichungen wie der Dirac-Gleichung der gesamten Physik zugrunde. Dieser Beschreibung liegen natürlich auch bestimmte Vorstellungen von Raum und Zeit als kontinuierliche differenzierbare Mannigfaltigkeiten zugrunde.

## 2.3 Die Konsequenz

Wenn nun diese Standardphysik nicht korrekt sein kann, dann kann entweder die Beschreibung der Gravitation, d.h. die Allgemeine Relativitätstheorie, die Beschreibung der quantenmechanischen Felder, d.h. die Dirac-Gleichung oder die Beschreibung der Wechselwirkungen, d.h. die Maxwell-Gleichungen oder die Yang-Mills-Gleichungen der elektroschwachen und starken Wechselwirkung nicht korrekt sein<sup>1</sup>. Eine oder alle dieser die physikalischen Phänomene beschreibenden Gleichun-

---

<sup>1</sup>Wenn wie hier von "nicht korrekt" sprechen, dann ist das im strengen Sinne gemeint. Diese Standard-Gleichungen stellen natürlich eine hervorragend gute Approximation der Physik dar – in demselben Sinne, wie die Newtonsche

gen muss modifiziert werden. Neben einer Modifikation der Einstein'schen Feldgleichungen oder der Maxwell- oder Dirac-Gleichung kann man sich auch vorstellen, dass die Begriffe der Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit zu modifizieren sind, wie es ja auch z.B. in Rahmen der nichtkommutativen Geometrie gemacht wird (siehe unten). Diese Modifikation ist aber auf der phänomenologischen Ebene nicht bedeutsam, da ja die Eigenschaften von Raum und Zeit durch die Dynamik von Teilchen und Feldern exploriert und definiert werden und nicht "an sich" beobachtet werden können: Eine Änderung der Eigenschaften von Raum und Zeit kann auf der theoretischen Ebene gleichermaßen durch eine Änderung der Dynamik der Teilchen und Felder dargestellt werden. (Man kann beide Möglichkeiten experimentell nicht unterscheiden, es kann jedoch sein, dass die modifizierten Phänomene im Rahmen einer modifizierten Beschreibung von Raum und Zeit viel effektiver und ökonomischer dargestellt werden können. Dann würde man natürlich dieses vorziehen.) Daher ist man unter allen Umständen immer genötigt, nach Modifikationen der Einstein-, der Maxwell- oder der Dirac-Gleichung zu suchen.

Eine mögliche Nicht-Gültigkeit dieser Standard-Theorien kann sich in einer Vielzahl von Effekten manifestieren, die in der Standard-Physik sonst nicht da sind. Wir listen hier nur einige ausgezeichnete Effekte auf:

1. Anisotropie der Lichtausbreitung
2. Doppelbrechung
3. Anisotropie in der Quantenmechanik bzw. in der Schrödinger- oder Dirac-Gleichung für eines der Elementarteilchen<sup>2</sup>
4. Verletzung der Universalität des Freien Falles (auch Äquivalenzprinzip genannt)
5. Verletzung der Universalität der Gravitativen Rotverschiebung
6. Nicht-Newtonsches Gravitationsfelder
7. anomale Dispersion für Licht oder Teilchen
8. fundamentale Fluktuationen oder Dekohärenz in der Quantenmechanik
9. Ladungsnietherhaltung
10. Wahrscheinlichkeitsnietherhaltung
11. Ungleichheit der aktiven und passiven Masse oder Ladung
12. Verletzung der *CPT* Invarianz (d.h. zu jedem Vorgang gelten dieselben physikalischen Gesetze auch dann, wenn man die Koordinaten spiegelt, die Zeitrichtung umkehrt und zu den Antiteilchen übergeht)

Letztendlich ist es eine Suche nach einer Verletzung eines oder mehrerer der heutigen Physik zugrundeliegenden fundamentalen Prinzipien. Man sucht nach allem, was irgendwie "falsch" sein könnte.

Diese Suche nach Effekten einer wie auch immer gearteten neuen Theorie kann aber strukturiert werden, wenn man sich die Prinzipien, auf denen die heutige Beschreibung der Physik beruht genauer vergegenwärtigt. Die heutige Beschreibung der Physik, d.h. die spezielle Form der Einstein-, Maxwell- und Dirac-Gleichung beruht im Wesentlichen auf der Gültigkeit des Einsteinschen Äquivalenzprinzips sowie auf einigen Prinzipien der Quantentheorie wie z.B. auf der Erhaltung der Wahrscheinlichkeit und der Lokalität. Das Einsteinsche Äquivalenzprinzip besteht aus dem Prinzip der Universalität des Freien Falles (auch Schwaches Äquivalenzprinzip oder auch einfach nur kurz Äquivalenzprinzip genannt), dem Prinzip der Universalität der gravitativen Rotverschiebung und der

Physik eine sehr gute Approximation der relativistischen Physik darstellt.

<sup>2</sup>Eine Anisotropie bedeutet hier, dass z.B. in der Schrödinger-Gleichung der Laplace-Operator, der bekanntermaßen rotationssymmetrisch ist, so modifiziert wird, dass die Rotationssymmetrie verletzt wird. Das kann z.B. durch eine Ersetzung des Kronecker-Symbols  $\delta^{ij}$  in dem Laplace-Operator  $\Delta = \delta^{ij} \nabla_i \nabla_j$  durch einen anderen Tensor geschehen,  $\Delta \rightarrow \alpha^{ij} \nabla_i \nabla_j$ . Dies ist für  $\alpha^{ij} \neq \delta^{ij}$  nicht mehr rotationssymmetrisch.

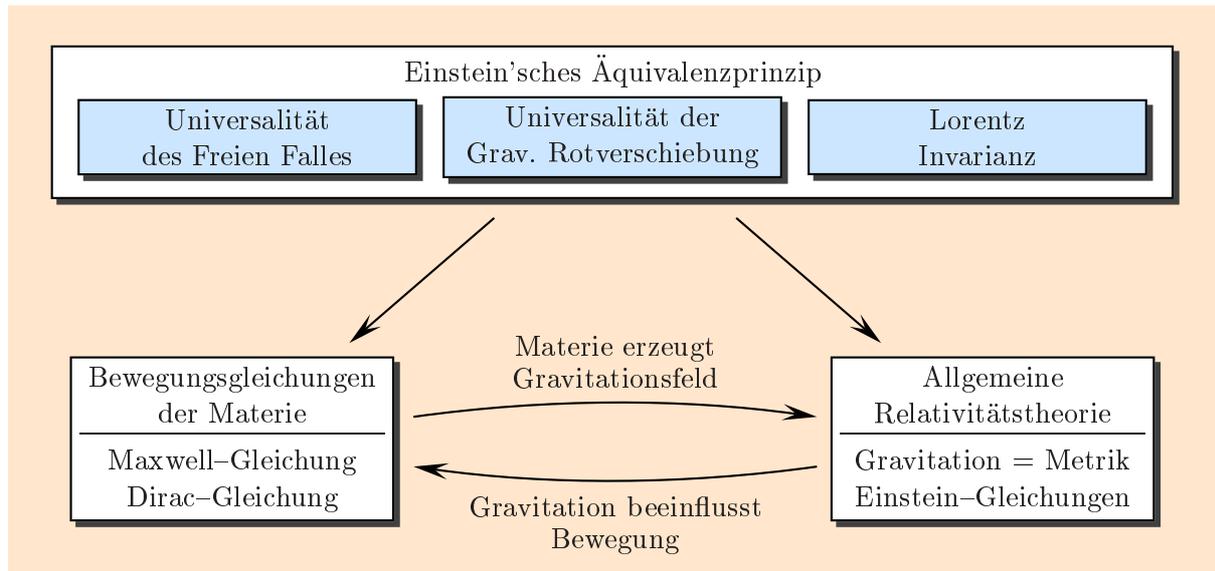


Abbildung 1: Zur Bedeutung der Lorentz-Invarianz. Die Lorentz-Invarianz ist Teil des Einstein'schen Äquivalenzprinzips, welches sowohl die Struktur der Gravitation in Form einer Raum-Zeit-Metrik, als auch die Form von möglichen Bewegungsgleichungen der Materie bestimmt.

lokalen Gültigkeit der LI. Dieses Prinzip impliziert einerseits, dass das Gravitationsfeld durch eine Raum-Zeit-Metrik und damit im Rahmen einer (pseudo-)Riemannschen Geometrie beschrieben werden kann, und andererseits auch die spezielle Form der Maxwell- und Dirac-Gleichung. Jede (genau genommen: fast jede) Abweichung von der üblichen Maxwell- oder Dirac-Gleichung führt zu einer Verletzung des Einstein'schen Äquivalenzprinzips.

Wenn die heutige Physik nicht richtig ist, kann also eines dieser Prinzipien nicht richtig sein. D.h., entweder ist die Universalität des Freien Falles, die Universalität der gravitativen Rotverschiebung oder die LI verletzt, oder wir haben eine z.B. nichtlokale und die Wahrscheinlichkeit nicht erhaltende Quantenmechanik, oder beides. Eine große Aufgabe der heutigen experimentellen Physik besteht darin, ganz allgemein nach solchen möglichen Verletzungen zu suchen.

Hier wollen wir uns auf die Suche nach möglichen Verletzungen der Lorentz-Invarianz beschränken. Weitere Verletzungen wie die der Universalität des Freien Falles oder der Universalität der gravitativen Rotverschiebung sind im Prinzip unabhängig davon. Im Rahmen von Theorien, wie gewisser Quantengravitationstheorien, können Verletzungen verschiedener Prinzipien jedoch miteinander korreliert sein. Um eine Verletzung der LI richtig einschätzen und deren Konsequenzen richtig darstellen zu können, rekapitulieren wir kurz nochmals die Voraussetzungen, die der SRT und speziell der LI zugrunde liegen. Danach wollen wir uns etwas von der Gewöhnung an die Relativität befreien und aufzeigen, dass es im Prinzip auch anders geht.

Bisher haben wir noch von keiner Quantengravitationstheorie gebrauch gemacht. Alle bisherigen Aussagen waren reine Schlussfolgerungen aus dem Umstand, dass zwei universelle Theorien nicht konsistent sind. Ein weiterer Leitfaden bei der Suche nach Effekten einer neuen Theorie kann durch die Analyse der bisherigen Ansätze für eine Quantengravitationstheorie geliefert werden. Dies wird in einem weiteren Kapitel geschehen.

Es soll nochmals betont werden, dass es hier nicht darum geht zu behaupten, dass die LI falsch ist. Sie ist auf jeden Fall im heutzutage durch das Experiment zugänglichen Bereich eine hervorragende Beschreibung aller Phänomene. Kein einziges Experiment widerlegt die LI. Der einzige Grund, warum man sich mit der Möglichkeit einer Verletzung der LI beschäftigt, ist die Inkonsistenz der Quantentheorie mit der Allgemeinen Relativitätstheorie, die notwendigerweise eine Verletzung einer der Grundlagen dieser Theorien bedeutet. Und ein Kandidat für eine Grundlage, die verletzt sein

könnte, ist die LI. Es geht in diesem Artikel nur darum, unseren Horizont für diese Möglichkeit zu öffnen. Was letztendlich richtig ist oder sein wird, kann nur das Experiment entscheiden.

### 3 Die Grundlagen der SRT

Die Poincaré-Transformationen werden üblicherweise aus zwei Postulaten hergeleitet: aus der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit  $c^2 = d\mathbf{x}^2/dt^2$  und dem Relativitätsprinzip, d.h. dass kein Bezugssystem ausgezeichnet sein darf. Ohne räumlichen Drehungen lauten die Poincaré-Transformationen

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \left( t - \frac{\mathbf{v}}{c^2} \cdot \mathbf{x} \right) + t_0 \quad (1)$$

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x}_\perp + \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} (\mathbf{x}_\parallel - \mathbf{v}t) + \mathbf{x}_0, \quad (2)$$

wobei  $\mathbf{x}_\parallel$  und  $\mathbf{x}_\perp$  die Komponenten des Ortsvektors parallel und orthogonal zur Relativgeschwindigkeit  $\mathbf{v}$  sind. Die Lichtgeschwindigkeit  $c$  ist eine Grenzgeschwindigkeit: Die Relativgeschwindigkeit zwischen zwei Bezugssystemen kann nie größer als  $c$  sein. Im Grenzfall  $c \rightarrow \infty$  reduzieren sich diese Transformationen auf die Galilei-Transformationen. Für verschwindende Translationen in Zeit und Raum, d.h. für  $t_0 = 0$  und  $\mathbf{x}_0 = 0$  ergeben die Poincaré-Transformationen die Lorentz-Transformationen. In kompakter 4-Schreibweise lauten diese Transformationen

$$x'^\mu = L^\mu{}_\nu x^\nu + x_0^\mu. \quad (3)$$

Die Poincaré-Transformationen bilden eine kontinuierliche Gruppe, wobei der Drehwinkel und die Relativgeschwindigkeit kontinuierliche Parameter der einzelnen Transformationen sind. Diesem Ganzen liegt zugrunde, dass die Raum-Zeit-Koordinaten  $x^\mu = (ct, x^m)$  ( $\mu = 0, 1, 2, 3$ ,  $m = 1, 2, 3$ ) einfach reelle Zahlen sind und damit kommutieren, d.h. vertauschen,

$$[x^\mu, x^\nu] = 0. \quad (4)$$

Die Lorentz-Invarianz besagt, dass die Lichtgeschwindigkeit unabhängig von der Propagationsrichtung und auch unabhängig von der Geschwindigkeit der Quelle und des Beobachters ist. Aus diesen Lorentz-Transformationen können die klassischen Effekte wie Zeitdilatation, Zwillingsparadoxon, Längenkontraktion, Doppler-Effekt, Aberration und Thomaspräzession (die Präzession des Spins eines Teilchen, wenn dieses beschleunigt wird, z.B. Präzession des Elektronenspins im Atom) hergeleitet werden. Nehmen wir noch die Translationsinvarianz hinzu, dann erhalten wir die Poincaré-Invarianz der SRT. Diese ist aber im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie nicht mehr gegeben, und auch die Lorentz-Invarianz wurde von einem globalen zu einem lokalen Prinzip.

Aufgrund des Relativitätsprinzips müssen nun alle physikalischen Theorien Lorentz-kovariant umgeschrieben bzw. neu konzipiert werden. Insbesondere die Newton'sche klassische Mechanik muss durch eine relativistische Mechanik ersetzt werden. Eine wichtige Konsequenz dieser relativistischen Mechanik ist eine neue Energie-Impuls-Beziehung. Hatten wir in den Newton'schen Mechanik noch  $E = \frac{1}{2m}\mathbf{p}^2$  ( $m$  und  $\mathbf{p}$  sind die Masse und der Impuls von Teilchen), so gilt im Rahmen Lorentz-invarianter Theorien

$$E^2 = m^2 c^4 + \mathbf{p}^2 c^2. \quad (5)$$

Ein wichtiger Spezialfall für verschwindenden Impuls ist die berühmte Energie-Masse-Beziehung  $E = mc^2$ .

## 4 Die Besonderheiten der SRT

Alle Grundlagen und Konsequenzen der LI sind mit allen bisherigen Experimenten verträglich und wir haben uns schon sehr an sie gewöhnt. Die Gewöhnung an eine Sache bedeutet aber nicht, dass diese letztendlich richtig ist. So war es z.B. mit der Newtonschen Mechanik. Diese Theorie schien bis zum Ende des 19. Jahrhunderts alle Phänomene vollständig zu erklären. Dabei hatte diese Theorie noch den Vorteil, dass sie vollkommen mit unserem Alltagsempfinden in Übereinstimmung war. Daher war es eine große Überraschung, dass diese bis dato als richtig erwiesene und empfundene Theorie doch falsch sein soll. Warum soll dies nicht auch mit der LI und damit auch mit der Allgemeinen Relativitätstheorie so sein?

Warum soll nicht Ähnliches passieren wie mit der Galilei-Invarianz? Vor der Entwicklung der SRT wurden alle physikalischen Phänomene sehr erfolgreich im Rahmen der Newtonschen Mechanik beschrieben. Erst später wurde man sich einer gewissen Inkompatibilität zwischen der Mechanik und der Elektrodynamik bewusst. Nachdem dieses Problem theoretisch erkannt wurde, hat man angefangen Experimente zu ersinnen und durchzuführen, die Aussagen über die wirklichen Verhältnisse machen können. Diese Experimente und Beobachtungen begannen mit der Beobachtung der Aberration, wurden weitergeführt von Fizeau und Airy, die die Mitführung von Licht in bewegten Medien beobachteten und kulminierten dann in einem sehr reinen Experiment, nämlich dem von Michelson und Morley, mit dem eindeutig die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit aufgezeigt wurde. Dieses Experiment ließ sich nicht im Rahmen der damaligen nichtrelativistischen Mechanik erklären. Daher musste etwas falsch sein. Das, was "falsch" war, wurde dann schließlich von Einstein in den richtigen begrifflichen Rahmen gestellt und mündete in der SRT. Die "Stärke" der experimentellen Ergebnisse wird auch dadurch betont, dass manche der Experimentatoren wie Michelson und auch später Ives und Stilwell, die als erstes die Zeitdilatation nachwiesen, der Lorentz-Invarianz der Physik sehr kritisch gegenüber standen und eigentlich nicht an diese geglaubt haben.

Eine ähnliche Situation liegt heute ebenfalls vor: Wir haben eine Inkompatibilität von Quantentheorie und Allgemeiner Relativitätstheorie. Nun versucht man, sich der Problematik sowohl theoretisch als auch experimentell zu nähern. Es wird immer gesagt, dass diese Suche nach QG Effekten ein hoffnungsloses Unterfangen ist, da die Effekte unvorstellbar klein sind. Das ist sicher korrekt. Aber wenn man bedenkt, wie lange die Experimentatoren gebraucht haben, um der SRT eine gesicherte Basis zu geben, so sind wir selbst im Vergleich damit erst am Anfang. Große Anstrengungen in der Hochenergiephysik, insbesondere in der Astroteilchenphysik werden gemacht, um eventuelle, die LI verletzende Effekte nachweisen zu können.

Wir wollen hier den *Glauben*, nicht das experimentelle Wissen, an die Lorentz-Invarianz etwas zu erschüttern versuchen, indem wir kurz darstellen, dass diese Theorie im Prinzip seltsame Effekte beinhaltet und dass es möglich ist, diese Effekte konsistent in verschiedenen Theorien zu beschreiben. *Welche Theorie letztendlich korrekt ist, kann alleine das Experiment entscheiden.*

Es gibt Aussagen der SRT, die sehr seltsam sind und die im Rahmen der Galileischen Kinematik und Newtonschen Mechanik eigentlich viel anschaulicher sind, weil sie dort dem Alltagsempfinden viel eher entsprechen. Zuallererst muss hier die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit genannt werden. Dies hat ja mindestens zwei Facetten: Zum einen ist die Lichtgeschwindigkeit unabhängig von der Geschwindigkeit der Quelle, und zum anderen unabhängig vom Bewegungszustand des Beobachters. Erstes wurde mittels astrophysikalischer Beobachtungen an Doppelsternen sehr genau nachgewiesen. Das diesbezüglich anschaulichste Experiment wurde aber am CERN durchgeführt: Dort wurden Protonen mit einer Energie von 19 GeV auf ein Beryllium-Target geschossen, wobei  $\pi$ -Mesonen erzeugt wurden, die eine Geschwindigkeit von 99,9975% der Lichtgeschwindigkeit besaßen. Diese Mesonen zerfielen nach  $10^{-16}$  Sekunden in Photonen, also in Licht. Die Geschwindigkeit dieses Lichts, welches selbst von einer Quelle abgesandt wurde, die selbst fast Lichtgeschwindigkeit

besaß, war wieder die Lichtgeschwindigkeit. Im Rahmen der Galileischen Kinematik würde man eine Geschwindigkeit von fast dem Zweifachen der Lichtgeschwindigkeit erwarten. Das war aber nicht der Fall. Das experimentelle Ergebnis ist etwas, was dem Alltagsempfinden vollkommen fremd ist. Ohne Kenntnis der Elektrodynamik, die dieses Ergebnis ja schon in ihrem Formalismus birgt (was aber erst spät nach dem Aufstellen der Theorie erkannt und auch so akzeptiert wurde), hätte sich kein Mensch vorstellen können, dass man so etwas beobachten würde. Nur dadurch, dass man sich völlig frei von allen Antizipationen macht, kann man dieses Ergebnis als reales Ereignis akzeptieren. Nur das Experiment kann sagen, was wie passiert. Genauso kann auch nur durch ein Experiment gezeigt werden – und wer weiß, ob das vielleicht bald passiert – dass die Annahmen, die der LI zugrunde liegen oder deren Konsequenzen falsch sind.

Eine weitere Besonderheit der relativistischen Physik ist, dass alle Teilchen dieselbe Grenzgeschwindigkeit besitzen. Kein Teilchen kann sich schneller als das Licht bewegen, wobei aber alle Teilchen beliebig nahe an die Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden können. Es ist ja schon seltsam, dass die ganzen verschiedenen Teilchen mit verschiedener Masse, Ladung, Spin etc plötzlich eine gemeinsame Eigenschaft besitzen. Man kann sich schon fragen, woher denn das Elektron weiß, was denn z.B. das Neutron für Eigenschaften besitzt?

Wenn wir uns von der Gewöhnung an die Gültigkeit der LI wieder trennen und uns nur auf die experimentellen Resultate verlassen, dann kann eine nichtuniverselle Grenzgeschwindigkeit oder ein ausgezeichnetes Bezugssystem genauso möglich sein wie die Existenz eines ausgezeichneten Bezugssystems (natürlich müssen diese Effekte, wenn sie denn so eintreten, kleiner sein, als es die heutige Messgenauigkeit ist). Seien wir also mal "open minded" und lassen für den Augenblick mal wieder alles zu, was im Prinzip möglich ist, ohne in innere Widersprüche oder Inkonsistenzen zu geraten, und schauen mal, was im Rahmen der Quantengravitation denn alles so möglich wäre. — Um es noch einmal zu betonen: Es geht hierbei nicht darum, die SRT oder LI als falsche Theorie zu überführen, denn alle bisherigen Experimente bestätigen sie auf das Genaueste. Da es aber innerhalb der theoretischen Physik eine Inkonsistenz gibt, kann die Möglichkeit einer Ersetzung der SRT bzw. der LI durch eine andere Theorie nicht ausgeschlossen werden – und welche Eigenschaften diese neue Theorie letztendlich besitzt, darüber können wir nur spekulieren.

## 5 Wie kann die Lorentz–Invarianz verletzt werden?

Wenn die LI verletzt ist, dann bedeutet dies, dass mindestens eines ihrer Postulate nicht mehr gelten kann. Dies kann also die Nichtkonstanz der Lichtgeschwindigkeit oder eine Verletzung des Relativitätsprinzips sein. Das bedeutet, dass die Physik abhängig von der Orientierung und der Geschwindigkeit des Labors ist (ohne aus dem Labor hinausschauen zu müssen, könnte man feststellen wie das Labor orientiert ist und mit welcher Geschwindigkeit es sich bewegt). In unserem realen Kosmos gibt es natürlich ein ausgezeichnetes Bezugssystem, den kosmischen Mikrowellenhintergrund. Dieser beeinflusst aber nicht das Geschehen in einem isolierten abgeschirmten Labor.

Dabei kann es sein, dass der Begriff der Lichtgeschwindigkeit etwas präzisiert werden muss. In manchen verallgemeinerten Theorien wird die Möglichkeit diskutiert, dass das Photon eine Masse besitzt. Wenn dies der Fall ist, dann zeigt die elektromagnetische Strahlung Dispersion, d.h. die Geschwindigkeit der Photonen hängt von deren Energie ab. Solch ein Verhalten kann aber immer noch mit den Postulaten der SRT bzw. der LI verträglich sein. Man muss dann nur den Begriff der Lichtgeschwindigkeit durch den der Grenzgeschwindigkeit ersetzen: Die den Postulaten der SRT genügende Lichtgeschwindigkeit ist nur durch den Grenzfall großer Energien gegeben.

Daneben könnte es aber auch quantengravitationsinduzierte Modifikationen geben, die die LI nicht verletzen, wie z.B. eine Nichtlokalität in der Quantentheorie (z.B. dadurch, dass die Dirac– oder sonstige Gleichungen der Quantenmechanik höhere Ableitungen besitzen und damit nichtlokal

werden) oder durch Fluktuationen in gewissen Feldern oder der Raum–Zeit. Solche Effekte können z.B. dadurch die LI brechen, dass sie ein ausgezeichnetes Bezugssystem definieren. Dies kann z.B. dadurch geschehen, dass die höheren Ableitungen in Feldgleichungen nur räumliche Ableitungen sind. Das zeichnet wie bei der Schrödinger–Gleichung ein spezielles Bezugssystem aus. Auch Fluktuationen können ein Bezugssystem auszeichnen. Man kann sich aber auch solche Effekte vorstellen, ohne dass dies mit einer Auszeichnung eines Bezugssystem einhergeht.

## 6 Wann ist die Lorentz–Invarianz wirklich verletzt?

Da es darum geht, mögliche Verletzungen der Lorentz–Invarianz zu suchen und eventuell zu finden, müssen wir uns natürlich auch fragen, wie man denn eine Verletzung der LI zweifelsfrei verifizieren kann. Wenn man einen Effekt gefunden hat, der nicht in das Schema der Standard–Physik passt, woher wissen wir, dass das wirklich eine Effekt der Verletzung der LI ist?

Als Allererstes muss der Experimentalphysiker detailliert bis ins Letzte geklärt haben, dass es wirklich keine einzige Erklärung im Rahmen der Standard–Physik gibt. Das ist sicher kein leichtes Unterfangen und kann lange Zeit und langwierige weitere experimentelle Untersuchungen nach sich ziehen. Nehmen wir also an, dass es keine Standard–Erklärung gibt – was wären dann Kriterien, dass es sich um eine Verletzung der LI handelt?

Wenn man einen Effekt findet, der nicht in den bisherigen Rahmen der Physik passt, könnte es auch sein, dass man eine neue Wechselwirkung gefunden hat, eine fünfte Kraft. Eine Wechselwirkung ist etwas, was eine identifizierbare Ursache (im Rahmen der elektromagnetischen Wechselwirkung z.B. eine Ladung) besitzt, oder was abschirmbar ist (die elektromagnetische Wechselwirkung kann z.B. abgeschirmt werden dadurch, dass man in einem Faraday’schen Käfig geht). Eine weitere Möglichkeit wäre, wenn der Effekt universell lokal wegtransformiert werden kann, d.h. dass man beim Übergang in ein speziell bewegtes und orientiertes Labor keinen Effekt mehr sieht. Das ist z.B. bei der Gravitationswechselwirkung der Fall, wenn man sich in den Einstein’schen Aufzug begibt. Nur wenn der Effekt (i) keiner Ursache zugeordnet, (ii) nicht abgeschirmt und (iii) nicht wegtransformiert werden kann, dann ist dieser Effekt universell immer da und würde automatisch in einem bestimmten Bezugssystem einen bestimmten Wert annehmen und dadurch ein Bezugssystem auszeichnen und damit das Relativitätsprinzip verletzen.

## 7 Theorien, die die SRT verletzen

### 7.1 Kanonische/Loop–Quantengravitation

Der Ausgangspunkt der kanonischen/Loop–Quantengravitation ist die Einsteinsche Gravitationstheorie und damit auch der geometrische Rahmen der gravitativen Wechselwirkung. Von diesem geometrischen Aspekt soll so viel wie möglich in die quantisierte Form der Gravitation übernommen werden. Dies wurde in der Tat erreicht: man konnte die Gravitation mit einem definierten Schema Quantisieren, wobei es natürlich immer noch viele Fragen gibt, wie das Erreichen des klassischen Grenzfalles der üblichen Einstein–Gleichungen, das Problem der Zeit, Uneindeutigkeiten bei der Quantisierungsvorschrift, etc. Gerade die Problematik des klassischen Grenzfalles ist wichtig für Vorhersagen zur Phänomenologie, da diese ja gerade Abweichungen von der üblichen Theorie beschreibt. Es gibt Vorhersagen innerhalb der Loop–Quantengravitation, dass man effektiv modifizierte Maxwell– und Dirac–Gleichungen erhält, die die Lorentz–Symmetrie verletzen, aber es gibt gleichzeitig auch Kritik daran, die behauptet, dass diese Effekte nur fiktiv sind, weil eben die Randbedingungen nicht angemessen gewählt wurden. Nichtsdestotrotz sind Spekulationen über eine Verletzung der LI in dieser Theorie genauso ernst zu nehmen wie die Aussagen der anderen Ansätze

zu einer Quantengravitationstheorie: keine dieser Theorien ist endgültig ausgebaut und letztendlich spekulativ solange es kein aussagekräftiges Experiment dazu gibt.

## 7.2 Stringtheorie

Im Gegensatz zur kanonischen/Loop-Quantengravitation steht in der Stringtheorie der geometrische Aspekt der gravitativen Wechselwirkung nicht im Vordergrund. Er gehört nicht zum Ausgangspunkt dieses Ansatzes. Ausgangspunkt ist vielmehr der gesamte Teilchenzoo der Hochenergiephysik und der Wunsch dieses mit der Gravitation im Sinne einer Vereinheitlichung zusammenzubringen. Dabei wird von einer festen Geometrie, meist dem Minkowski-Raum ausgegangen. Auf dieser Raum-Zeit der SRT werden dann viele neue Felder eingeführt, die sich effektiv (d.h. in Kombination oder nach Quantenkorrekturen) wie die bekannten Wechselwirkungen auswirken sollen. Das tun sie auch zum großen Teil. Ein Charakteristikum dieser neuen Felder ist es, dass diese in der Regel unterschiedlich an die verschiedenen Teilchen ankoppeln. Wenn dies der Fall ist, kann eine Wechselwirkung nicht geometrisiert werden. Daher ist auch in der Stringtheorie das Äquivalenzprinzip verletzt.

## 7.3 Nichtkommutative Geometrie

Ausgangspunkt der nichtkommutativen Geometrie ist die Nichtvertauschbarkeit der Orte,

$$[x^\mu, x^\nu] = i\theta^{\mu\nu} + i\zeta^{\mu\nu}{}_\rho x^\rho \quad (6)$$

wobei  $\theta^{\mu\nu}$  und  $\zeta^{\mu\nu}{}_\rho$  in  $\mu$  und  $\nu$  reelle antisymmetrische Tensoren sind (die Indizes  $\mu, \nu$ , und  $\rho$  laufen von 0 bis 3 und es gilt die Einstein'sche Summenkonvention). Man führt die komplexe Zahl  $i$  ein, weil der Antikommutator von hermiteschen Operatoren antihermitesch ist. Da nur Terme der Form  $\eta^{\mu\nu} a_\mu b_\nu$  Lorentz-Invariant sind, brechen diese obigen Tensoren die Lorentz-Invarianz indem sie eine neue Struktur einführen. Dies kann einfach so als verallgemeinertes Modell einer Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit verstanden werden. Man kann das aber auch als modifizierte Observable in einer die Orte einbeziehenden Observablenalgebra interpretieren. Die Diskussion darüber ist, wie auch die bei den anderen Quantengravitationsansätzen, nicht abgeschlossen.

Die einfachste Version obiger Relation

$$[x^\mu, x^\nu] = i\theta^{\mu\nu} \quad (7)$$

bricht offensichtlich die Lorentz-Invarianz. Wenn man dies einer Feldtheorie, z.B. einer nichtkommutativen Eichtheorie, zugrunde legt, dann muss man die Operationen wie Multiplikation, Ableitung etc. entsprechend modifizieren. Seiberg und Witten haben gezeigt, dass es eine direkte Korrespondenz zwischen solch einer nichtkommutativen Eichtheorie und einer konventionellen Eichtheorie auf einer Mannigfaltigkeit mit "normalen" kommutierenden Koordinaten gibt. Diese "Korrespondenz" ist derart konstruiert, dass die neue "kommutierende" Theorie zu äquivalenten physikalischen Aussagen führt. Es konnte allgemein gezeigt werden, dass schon in erster Näherung die Parameter  $\theta^{\mu\nu}$  in einer effektiven modifizierten Dirac-Gleichung vorkommt, und zwar in Gestalt eines globalen konstanten Tensorfeldes, welches die Lorentz-Invarianz der Theorie verletzt.

Die andere Version

$$[x^\mu, x^\nu] = i\zeta^{\mu\nu}{}_\rho x^\rho \quad (8)$$

führt auf eine Lie-Algebra-artige Struktur für die Ortsgrößen  $x^\mu$ . Ein wichtiger Spezialfall hiervon

$$[x^m, t] = \frac{1}{\kappa} x^m, \quad [x^m, x^n] = 0, \quad (9)$$

bei dem nur die Raum- und Zeitkoordinaten nicht kommutieren, ist die sogenannte  $\kappa$ -Deformation des Minkowski-Raumes. Dies führt jetzt zu einer anderen Struktur, als diejenige, die wir bisher kennen gelernt haben: Hier wird nicht die Lorentz-Symmetrie gebrochen, sondern *deformiert*. Der Unterschied liegt darin, dass bei den deformierten Lorentz-Symmetrien immer noch das Relativitätsprinzip gilt, d.h. es kann kein Bezugssystem ausgezeichnet werden.

## 8 Vorhergesagte Verletzungen der Lorentz-Invarianz

Jede Theorie, die ein globales Vektor- oder Tensorfeld beinhaltet, an das Teilchen und Felder koppeln, und welches nicht abschirmbar oder wegtransformierbar ist, ergibt eine Theorie, die die Lorentz-Invarianz verletzt. Das ist z.B. wie eine global wirkende konstante Beschleunigung, die in den physikalischen Effekten eine Richtung auszeichnet. Solche Theorien können im Rahmen von Quantengravitationstheorien [3, 4] wie der Stringtheorie oder der kanonischen/Loop-Quantengravitation auftreten. Auch in der Nichtkommutativen Geometrie wird die Lorentz-Invarianz verletzt, allerdings auf eine etwas andere Art. Damit führen die drei bedeutsamsten Ansätze für eine Quantengravitationstheorie zu einer Verletzung der Lorentz-Invarianz.

Wie kann man sich die Entstehung dieser Verletzungen der Lorentz-Invarianz vorstellen? Es gibt da mehrere Mechanismen: Zum Einen können es Raum-Zeit-Fluktuationen sein, die ein bestimmtes Bezugssystem auszeichnen können. Zum anderen kann es durch spontane Symmetriebrechung geschehen, ein Formalismus, der schon lange Teil des Standardmodells ist und mit dessen Hilfe man sich die Massen der Elementarteilchen erklärt (die letzte fehlende Bestätigung dieses Formalismus wäre das Auffinden eines sogenannten Higgs-Bosons, nach welchem auch intensiv in den neuen Hochenergiebeschleunigern gesucht wird). Auch die Nichtkommutativität von Raum-Zeit-Koordinaten im Rahmen von nichtkommutativen Geometrien führt auf eine Modifikation der Lorentz-Symmetrie. Dabei wird nicht einfach die Lorentz-Invarianz gebrochen, sondern an ihrer Stelle eine neue Invarianz, eine deformierte Lorentz-Symmetrie, eingeführt.

Auch hier muss man wieder genauer hinschauen und analysieren, was jetzt eine Verletzung der LI bedeutet. Es gibt nämlich Theorien, die anfangs Lorentz-invariant sind, die aber, nach ihrer Ausformulierung, bzw. nach Ausarbeitung der beobachtbaren Größen und Effekte, plötzlich die anfangs angenommene Symmetrie verletzen. Das taucht sogar schon im Rahmen der konventionellen Allgemeinen Relativitätstheorie auf. Dort sind die Grundgleichungen der Maxwell-Theorie, auch die, die an die Gravitation koppeln, lokal Lorentz-invariant. Dadurch, dass physikalisch jedes Photon aber ein endliches Volumen einnehmen muss, überstreicht dieses ein endliches Raum-Zeit-Gebiet und koppelt damit unweigerlich an die Raum-Zeit-Krümmung. Diese Kopplung die automatisch in den effektiven Gleichungen auftaucht, bricht dann sofort die LI, da der Riemann-Tensor bestimmte Richtungen auszeichnet. Die zugrundeliegenden "nackten" Theorien können also eine ganz andere Symmetrie besitzen, als das phänomenologische Pendant, d.h. diejenige, die effektiv, direkt Beobachtungen beschreibt.

### 8.1 Spontane Brechung der Lorentz-Symmetrie

Die "Methode" der spontanen Symmetriebrechung beschreibt, wie aus einer Theorie, die ursprünglich, d.h. in ihren Grundgleichungen bzgl. einer bestimmten Transformation vollkommen symmetrisch ist, aus sich heraus diese Symmetrie bricht. Der Grund für die Möglichkeit einer Brechung der Symmetrie liegt in einer Uneindeutigkeit des Grundzustandes des physikalischen Systems: es gibt eine Ambiguität im Einnehmen des Grundzustandes. Da es aber nur einen Grundzustand geben kann, wird die Symmetrie gebrochen. Alle möglichen Grundzustände sind zwar gleichwahrscheinlich, aber nur einer wird definitiv eingenommen. Das ist so, wie wenn man mit Kraft von oben

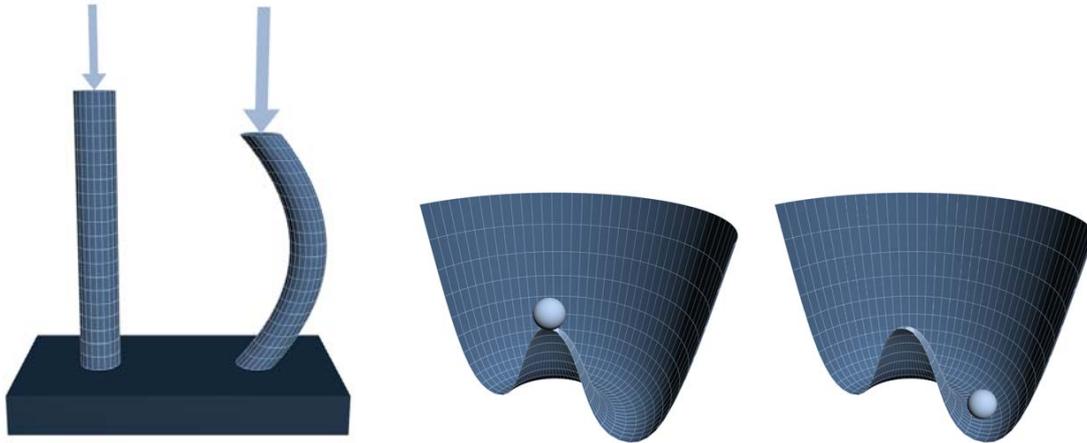


Abbildung 2: Anschauliche spontane Symmetriebrechung: Drückt man von oben auf einen Stab, so muss sich dieser aus energetischen Gründen durchbiegen. In welche Richtung er sich durchbiegt, ist aber dem Zufall überlassen. Alle Richtungen sind gleichwahrscheinlich, denn das Problem ist rotationssymmetrisch. Hat er sich durchgebogen, ist die Rotationssymmetrie gebrochen. – Das selbe Phänomen passiert bei physikalischen Systemen, die durch ein rotationssymmetrisches Potential beschrieben werden, dessen Minimum nicht ein einzelner Punkt, sondern ein Kreis ist. Das physikalische System (hier durch eine kleine Kugel dargestellt) wird mit gleicher Wahrscheinlichkeit einen dieser Minimum-Punkte einnehmen. Welcher das sein wird, kann aufgrund der Rotationssymmetrie nicht gesagt werden. Solche Systeme finden sich in Magneten. Dort kann bei tiefen Temperaturen eine spontane Magnetisierung eintreten, deren Richtung aber nicht vorhergesagt werden kann.

auf einen elastischen Stab drückt. Irgendwie muss er sich biegen (siehe Abb.2). Alle Richtungen sind gleichwahrscheinlich, aber nur eine Richtung wird letztlich angenommen. Ein anderes Beispiel ist der Ferromagnetismus, bei dem sich innerhalb eines magnetischen Materials Weiß'sche Bezirke mit gleichgerichteter Magnetisierung herausbilden. Die Richtung, in der die einzelnen Bezirke magnetisieren, ist völlig offen, aber eine Richtung wird aus energetischen Gründen eingenommen.

Analog dazu gibt es auch in der Stringtheorie und in der kanonischen/Loop-Quantengravitation eine Brechung der Lorentz-Symmetrie der zugrundeliegenden Theorie. Dabei wird der energetisch günstigste Zustand nicht mehr durch so ein einfaches Potential wie das in Abb.2 gezeigte "mexican hat"-Potential beschrieben. I.a. wird die Brechung der Symmetrie durch Tensorfelder beschrieben, die dann universell mit Teilchen wechselwirken [5].

Diese Tensorfelder können nun in den effektiven Feldgleichungen, den Maxwell-Gleichungen oder der Dirac-Gleichung stehen. Dort können sie dann zu Effekten führen wie eine anisotrope Lichtausbreitung, siehe Abb.5 links. (Im Vergleich dazu ist der Lorentz-invariante Lichtkegel in Abb.4 links zu sehen.) Auch können diese Koeffizienten zu einer Doppelbrechung der Lichtausbreitung führen, siehe Abb.6 links. D.h., die Verletzung der Lorentz-Invarianz kann dazu führen, dass sich das Vakuum in Bezug auf die Lichtausbreitung wie ein Kristall verhält. Hier ist "Kristall" aber nur als Analogie gedacht. Das Licht propagiert immer nur durch das Vakuum. Diesem ist aber eine bestimmte Struktur aufgeprägt, die weder abschirmbar noch wegtransformierbar ist. Außerdem kann es auch noch den Effekt geben, dass eine elektrische Punktladung neben dem üblichen Coulomb-Potential ein Magnetfeld erzeugt (siehe Abb.3) und dass ein magnetisches Moment neben dem Magnetfeld noch ein zusätzliches kleines elektrisches Feld erzeugt.

Diese ganzen *anormalen* Effekte, also Effekte, die in der normalen Maxwell-Theorie im Vaku-

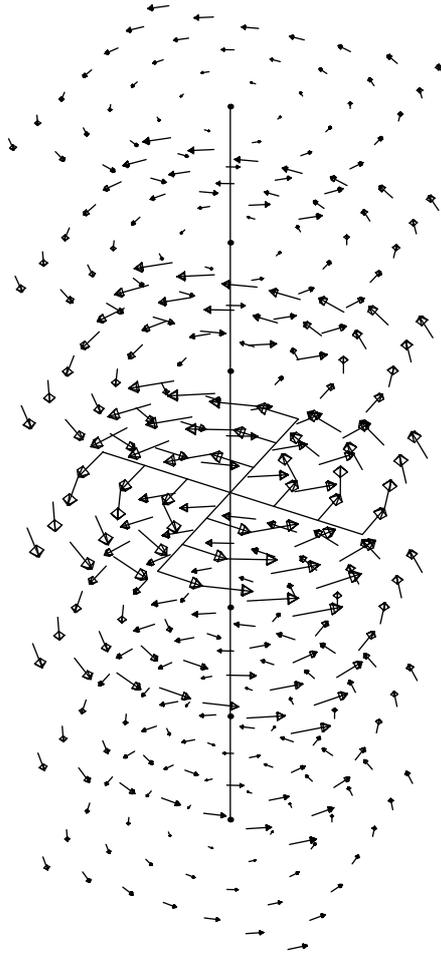


Abbildung 3: Ein Effekt der möglichen durch die Quantengravitation modifizierten Maxwell-Gleichungen ist ein durch eine Punktladung erzeugtes Magnetfeld. In diesem Bild liegt die Punktladung im Zentrum und das Magnetfeld hat die Form eines von einem in  $z$ -Richtung verlaufenden stromführenden Leiter erzeugten Magnetfeldes, nur dass in unserem Fall der Betrag mit  $1/r^2$  vom Ursprung abnimmt. Diese ausgezeichnete Richtung ist natürlich mit einem dieser die LI verletzenden Felder in der Maxwell-Gleichungen verknüpft.

um nicht vorkommen, lassen sich besonders gut austesten. Mittels einer Analyse astrophysikalischer Beobachtungen von Licht ferner Galaxien konnte gezeigt werden, dass die Parameter, die eine Doppelbrechung verursachen, kleiner als  $10^{-32}$  sein müssen. Dazu hat man das Licht ferner Galaxien nach seinen Polarisationsfreiheitsgraden zerlegt und untersucht, ob das zu einer Polarisation gehörige Licht sich schneller als das zur anderen Polarisation gehörige ausbreitet. Andere Parameter führen zu einer Anisotropie der Lichtausbreitung (siehe Abb.5 links), die man mittels der bekannten Michelson-Morley Experimente detektieren könnte. Da keine anisotrope Lichtgeschwindigkeit beobachtet wurde, konnte aus der Genauigkeit der Messung gefolgert werden, dass die hierfür verantwortlichen Koeffizienten kleiner als  $10^{-15}$  sein müssen. Das möglicherweise von einer Ladung

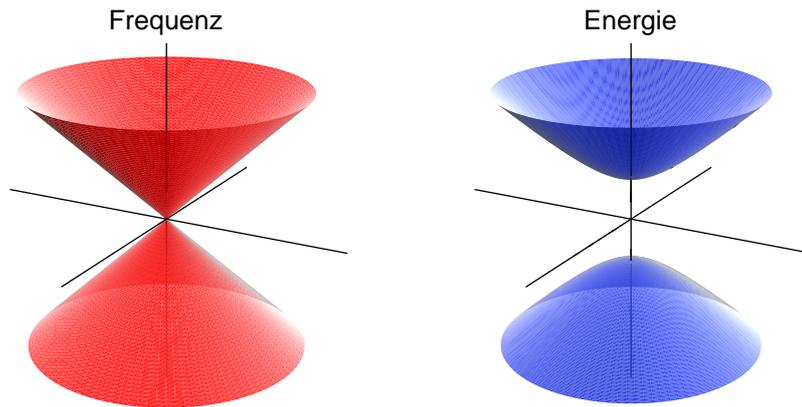


Abbildung 4: Die Bewegung der Lichtstrahlen und massiver Teilchen wird durch die Beziehung zwischen Frequenz und Wellenvektor bzw. zwischen Energie und Impuls dargestellt. Bei Lorentz-invarianten Theorien stellt die Frequenz–Wellenvektor–Beziehung einen Kegel, den Lichtkegel, dar, die Energie–Impuls–Beziehung ein Rotationshyperboloid, die sogenannte Massenschale.

erzeugte kleine Magnetfeld wurde allerdings noch nicht untersucht und muss zukünftigen Experiment vorbehalten bleiben.

Auf der Ebene der Teilchen, wie z.B. von Elektronen, bewirken solche zusätzlichen Tensorfelder ebenfalls eine Anisotropie in der Bewegung der Teilchen. Das bedeutet: gibt man allen Teilchen dieselbe Energie, dann haben sie verschiedene Geschwindigkeiten wenn sie sich in verschiedenen Richtungen bewegen. Oder anders ausgedrückt: Obwohl alle Teilchen zur Beschleunigung aus der Ruhe z.B. dieselbe Spannungsdifferenz durchlaufen, erreichen sie je nach Richtung eine andere Geschwindigkeit, siehe Abb.5 rechts. Im Falle der LI ergibt die Energie–Impuls–Relation ein Rotationshyperboloid als Massenschale, siehe Abb.4 rechts. Darüberhinaus kann die Geschwindigkeit auch von der Ausrichtung des Spins abhängen, siehe Abb.6 rechts.

Die Suche nach Anisotropien in der Lichtausbreitung, bzw. allgemeiner in den Maxwell–Gleichungen, oder in der Dynamik von Teilchen, sind nicht die einzigen Experimente, die sensitiv auf Verletzungen der LI sind. Ganz allgemein zeigen Atomuhren eine Verletzung der LI, falls entweder in der Maxwell–Gleichungen oder in der Dirac–Gleichung Terme stehen, die die LI verletzen. Das führt zu einer anderen großen Klasse von Tests: den Uhrenvergleichsexperimenten. Dabei wird der Uhrengang zweier Uhren auf vielfältige Art miteinander verglichen, siehe Abb.7. Das beinhaltet

- Vergleich von zwei verschiedenen Uhren bei verschiedenen Orientierungen (entweder gemeinsam rotierend oder eine Uhr feststehend). Dies testet die Orientierungsunabhängigkeit in der LI und stellt damit eine Verallgemeinerung der berühmten Michelson–Morley Experimente dar. Bei einer Brechung der Orientierungsunabhängigkeit würde man beobachten, dass eine gedrehte Uhr schneller oder langsamer geht als die feststehende, siehe Abb.8.
- Vergleich von zwei verschiedenen Uhren bei Änderung der Geschwindigkeit beider Uhren. Damit wird getestet, ob die Physik von der Geschwindigkeit des Inertialsystems abhängt und verallgemeinert die Kennedy–Thorndike Experimente. Hier könnte passieren, dass in einem Inertialsystem zwei verschiedene Uhren gleich schnell gehen, in einem dazu bewegten System

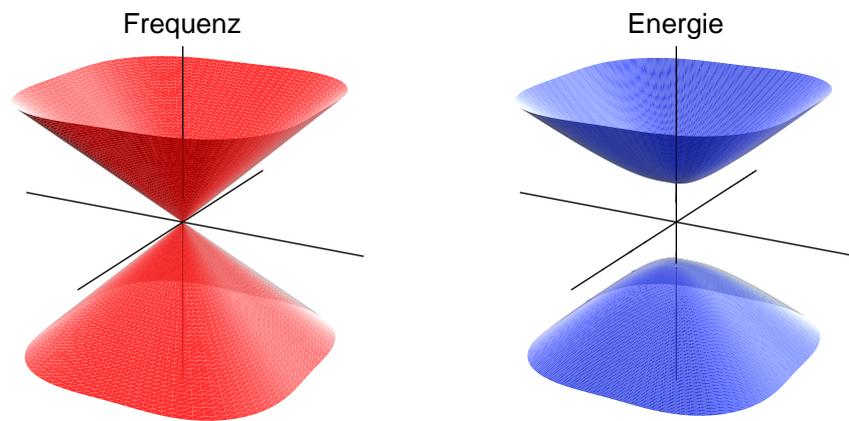


Abbildung 5: Lichtkegel und Massenschale mit Anisotropien.

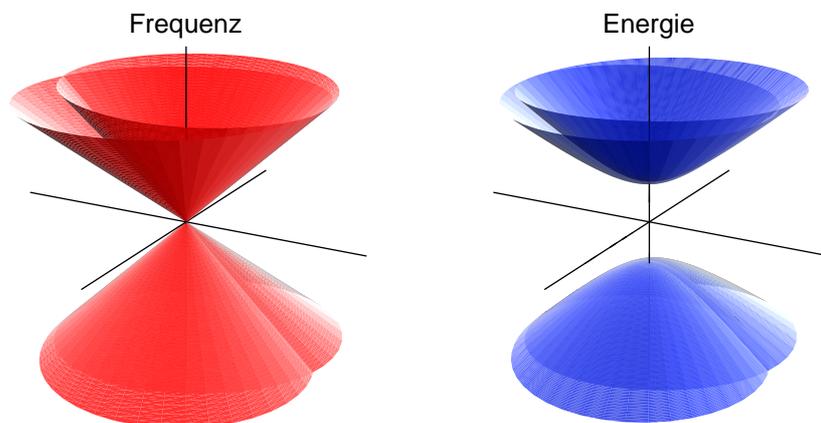


Abbildung 6: Lichtkegel und Massenschale für den Fall der Doppelbrechung.

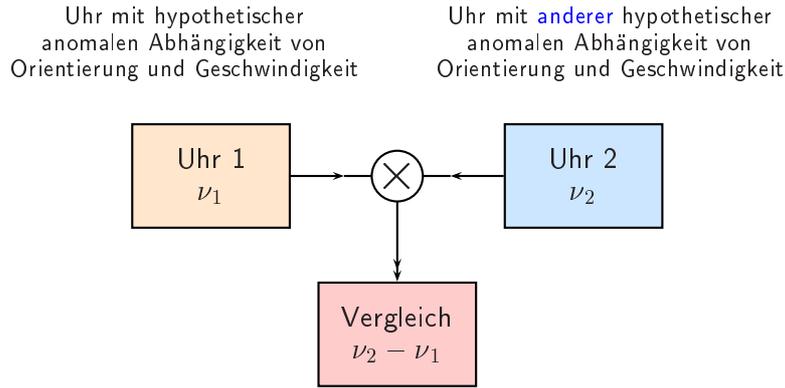


Abbildung 7: Uhrenvergleiche bzgl. der Abhängigkeit des relativen Uhrengangs bei Orientierungswechsel und Übergang in andere bewegte Inertialsysteme stellen Tests der LI dar.  $\nu_1$  und  $\nu_2$  sind die Tickraten der Uhren.

jedoch verschieden laufen, siehe Abb.9. Für die Genauigkeit dieser Tests ist es von Vorteil einen möglichst großen Geschwindigkeitsbereich auszutesten.

- Vergleich zweier Uhren, die sich relativ zueinander bewegen. Damit wird die relativistische Zeitdilatation getestet.

Die gesamte LI kann damit durch Uhrenvergleiche getestet werden. Da Uhren sehr genau sind und es auf diesem Gebiet in letzter Zeit große Fortschritte gab, sind die heutzutage genauesten Tests der LI Uhrenvergleichstests.

## 8.2 Raum–Zeit–Fluktuationen

Eine Fluktuation der Raum–Zeit kann auch ein bestimmtes Bezugssystem auszeichnen z.B. dadurch, dass in einem Bezugssystem das Frequenz– oder Wellenlängenspektrum der Fluktuationen ausgezeichnet ist. Die Wirkung dieser Fluktuationen kann man sich dann so vorstellen, dass sie mit Teilchen wechselwirkt, wie die Wellen auf hoher See mit einem Boot wechselwirken. Starke Wellen würden das Boot stärker abbremmen. Die Fluktuationen wirken effektiv, d.h. aus phänomenologischer Ebene, wie ein Medium, in dem physikalische Vorgänge sich abspielen.

Es gibt dazu ein Analogon aus der Quantenelektrodynamik, den Casimir–Effekt. Im Raum zwischen zwei leitenden parallelen Platten (es gilt aber auch bei allgemeineren Anordnungen) bilden sich Fluktuationen des elektromagnetischen Feldes aus, die sogenannten Nullpunkts–Schwingungen. Diese sind durch die Randbedingungen, nämlich dass das elektromagnetische Feld an den Platten verschwindet, charakterisiert. Diese Nullpunktschwingungen sind rein quantenmechanischen Ursprungs und besitzen kein klassisches Analogon. Die Auswirkungen dieser Fluktuationen, nämlich der Casimir–Effekt, siehe Abb.10, besagt, dass diese Kondensator–Platten sich leicht anziehen sollten, wurde in der Tat experimentell nachgewiesen. Ein weiterer Effekt ist, dass die Grenzgeschwindigkeit von Dirac–Teilchen innerhalb des Kondensators sich ebenfalls etwas im Vergleich zum "freien" Raum verändert. Es wurde gezeigt, dass die Maximalgeschwindigkeit, die sonst gleich der Lichtgeschwindigkeit ist, leicht (um den  $10^{20}$ sten Teil der Lichtgeschwindigkeit) verringert wird [6]. Das kann so interpretiert werden, dass sich die Dirac–Teilchen durch ein Medium, welches effektiv durch die elektromagnetischen Fluktuationen gebildet wird, bewegen müssen und dabei einen kleinen Wi-

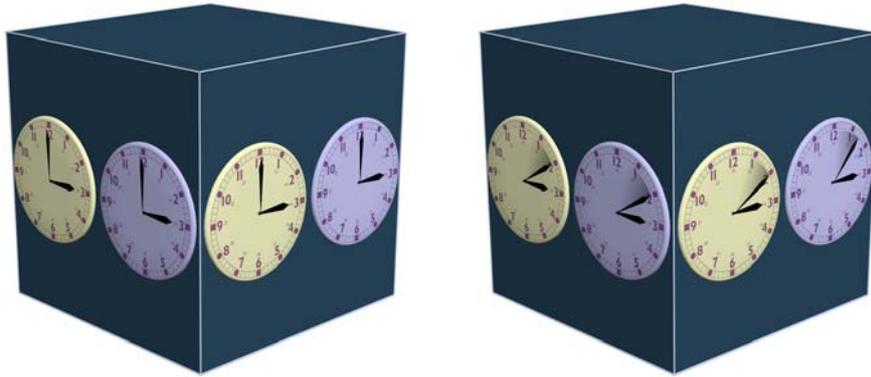


Abbildung 8: Durch Vergleich von *verschiedener* Uhren (hier durch die Farbe der Uhr gekennzeichnet) wird die Lorentz-Invarianz der Physik getestet. Ist die Physik abhängig von der Orientierung, würden zueinander verdrehte Paare verschiedener Uhren plötzlich verschieden laufen. Links: Alle Uhren starten bei derselben Zeit um 3 Uhr. Rechts: Verletzung der LI. Während die linken Uhren gleich gehen, zeigen die gedrehten Uhren nach einer Weile unterschiedliche Zeiten an.

derstand erfahren; die Teilchen müssen gegen die Fluktuation anrennen wie ein Boot gegen die Wellen ankämpfen muss. Die Fluktuationen wirken effektiv wie ein Medium.

Derselbe Effekt tritt bei Fluktuationen der Raum-Zeit auf. Diese Fluktuationen wirken ebenfalls effektiv wie ein Medium und beeinflussen die Propagation von Teilchen, und zwar nicht nur die von massiven Teilchen wie Elektronen, Protonen und Neutronen, sondern auch die der masselosen Photonen. Eine weitere Besonderheit ist hierbei, dass dieser Einfluss des "Mediums" der Raum-Zeit-Fluktuationen je nach Energie der Teilchen verschieden wirkt. Wegen der Linearität der Elektrodynamik ist dies beim Casimir-Effekt nicht zu erwarten. Solche Effekte können auch anschaulich die vorhergesagten Verletzungen der Universalität des Freien Falles erklären: verschieden Teilchen spüren die Raum-Zeit-Fluktuationen, gegen die sie anrennen, mit verschiedener Stärke. Da diese Raum-Zeit-Fluktuationen aber das effektive Vakuum darstellen, ist dies genau das, was man im Experiment beobachtet.



Abbildung 9: Bei Verletzung der LI könnten verschiedene Uhren, die in einem Inertialsystem immer dieselbe Zeit anzeigen (links), bei Übergang in ein bewegtes Inertialsystem plötzlich verschieden laufen (rechts).

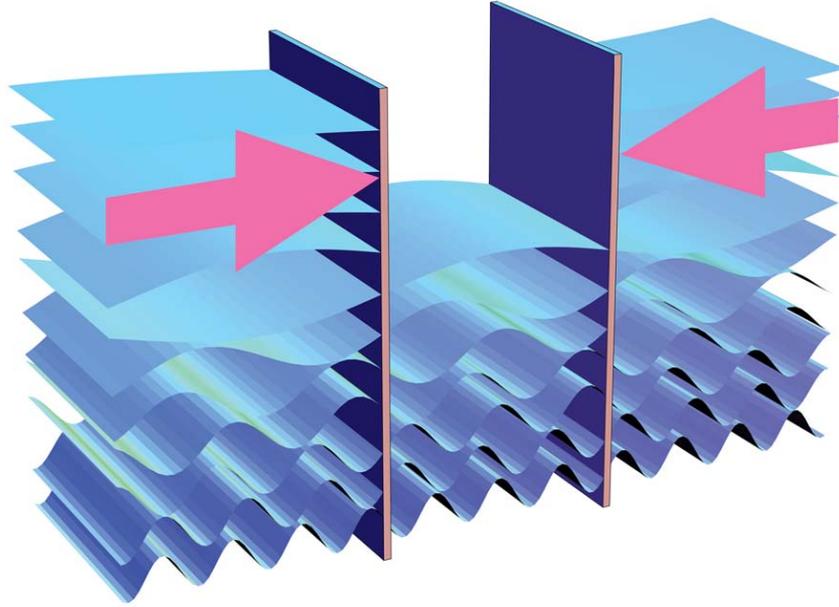


Abbildung 10: Nullpunktsfluktuationen des elektromagnetischen Feldes innerhalb eines Kondensators sind verschieden von denen außerhalb. Das bewirkt, dass sich die Kondensatorplatten leicht anziehen. Dies wurde experimentell bestätigt. Die innerhalb und außerhalb des Kondensators verschiedene Struktur der Fluktuationen bewirken auch eine leicht verschiedene Maximalgeschwindigkeit von Teilchen.

Raum-Zeit-Fluktuationen können auch zu Dekohärenz in Quantensystemen führen, was nebenbei auch einige Probleme, wie den Übergang von der Quantenmechanik zur klassischen Mechanik oder das Messproblem in der Quantenmechanik lösen helfen würde.

### 8.3 Anomale Dispersionsrelation

Eine der "Vorhersagen" der nichtkommutativen Geometrie besteht darin, dass der übliche Energie-Impuls-Zusammenhang (wovon die berühmte Formel  $E = mc^2$  ein Spezialfall ist) modifiziert wird. Es ergeben sich nach langwierigen quantenfeldtheoretischen Betrachtungen in der effektiven Dispersionsrelation z.B. von Photonen typischerweise Modifikation der Art

$$\mathbf{p}^2 = E^2 + \xi \frac{E^3}{E_{\text{QG}}}, \quad (10)$$

wobei  $E_{\text{QG}}$  eine durch die Quantengravitation definierte Energieskala ist, die meist von der Größenordnung der Planck-Energie angenommen wird. Dies verallgemeinert die übliche Energie-Impuls-Beziehung (5).  $\xi$  ist ein Parameter von der Ordnung 1, der für verschiedene Quantengravitationstheorien verschiedene Werte annehmen kann. Da  $E_{\text{QG}}$  von der Größenordnung der Planck-Energie ist, ist diese Korrektur nur Strahlung von sehr hoher Energie zugänglich. Diese findet man in der kosmischen Strahlung mit Energien von bis zu  $10^{21}$  eV.



Abbildung 11: Darstellung von Fluktuationen der Raum–Zeit–Geometrie. Auf der Skala der Planck–länge und Planck–Zeit verändert sich die Geometrie; es gibt Beulen und Henkel, die sich bilden und wieder verschwinden.

## 9 Wie groß können QG–Effekte sein?

Auch wenn wir alle dem zustimmen, dass es im Prinzip Abweichungen von der bekannten Lorentz–Invarianz geben sollte, bleibt die Frage, ob wir diese entdecken können oder ob diese so klein sind, dass sie außerhalb der experimentellen Zugänglichkeit sind – auch wenn es in letzter Zeit große Fortschritte bei der Verbesserung von Hochpräzisionstests, insbesondere auf dem Gebiet der Quantenoptik, gibt. In einem ersten Schritt wird man davon ausgehen, dass die Effekte sehr klein sind. Der Grund dafür ist, dass die relevante Energieskala der Quantengravitation durch die Planck Energie gegeben ist. Da typische Energien in Laborexperimenten von der Größenordnung 1 eV sind, die Planck–Energie aber etwa  $10^{28}$  eV beträgt, sind die Abweichungen von der Standardphysik, die man in Laborexperimenten sehen sollte, von der Größenordnung  $10^{-28}$ . Das sieht sehr weit außerhalb jeder experimentellen Zugänglichkeit aus. Allerdings kann man sich einmal verschiedene Szenarien vorstellen, die größere Effekte ergeben würden, und zum anderen gibt es durchaus Experimente, die in diese Größenordnung der Genauigkeit kommen:

- Es gibt bisher noch keine ausgearbeitete Theorie der Quantengravitation. Alle Ansätze befinden sich noch im Stadium der Entwicklung und sind daher reine Spekulation. Daher ist auch die Aussage, dass die relevante Energieskala für QG Effekte die Planck–Energie von  $10^{28}$  eV ist, ebenfalls reine *Spekulation*. Niemand kennt die endgültige Energieskala der endgültigen Quantengravitationstheorie.
- Unter bestimmten Umständen kann es Mechanismen geben, die die durch die Quantengravitation induzierten Effekte vergrößern können. So können z.B. durch den Einbau höherer Dimensionen neue Skalen eingeführt werden, die Effekte vergrößern können. So gibt es in der Tat Spekulationen ob es in solch einem Rahmen bei kleinen Abständen erhebliche Abweichungen vom bekannten Newtonschen Potential gibt, siehe z.B. [7]. Ein weiteres Beispiel sind Fluktuationen in Interferometern. In einer Klasse von Modellen solcher Fluktuationen wird angenommen, dass diese sich durch einen *random walk* Ansatz beschreiben lassen. Das führt zu einem sogenannten  $1/f$ –Rauschen, d.h. zu Effekten, die bei kleinsten Frequenzen größer werden. Wenn man also langzeitstabile Apparate hat, wie z.B. optische Resonatoren, kann man durch Beobachtung der Langzeitfluktuationen nach quantengravitationsinduzierten Fluktuationen suchen, wie es auch schon gemacht wurde [8]. Ein weiteres Beispiel hierfür sind die Vorhersagen zur Abweichung von der Universalität des Freien Falles und von der Einstein–

schen Theorie im Sinne einer Post-Newtonischen Parametrisierung, die Effekte kurz unterhalb der gegenwärtigen experimentellen Nachweisgrenze für möglich hält [9].

- Es gibt Vermutungen, dass die Vereinheitlichung der elektroschwachen und starken Wechselwirkung mit der Gravitation nicht erst bei der Planck-Energie stattfindet, sondern bei einer um ca. drei Größenordnungen kleineren Energie von ca.  $10^{25}$  eV [10]. Um die Größenordnung von Vereinheitlichungs- und Quantengravitationsseffekten abschätzen zu können, braucht man daher die typischen Laborenergien nicht mit der Planck-Energie vergleichen, sondern kann diese bereits mit dieser GUT Vereinheitlichungsenergieskala tun.
- Es ist sehr erstaunlich, aber es gibt, zumindest in naher Zukunft, mit den neuen Generationen von Gravitationswellendetektoren zumindest im Prinzip Apparaturen, die annähernd die Genauigkeit von  $10^{-28}$  besitzen. Die heutigen Gravitationswellendetektoren besitzen eine Genauigkeit in der relativen Abstandmessung der Arme von  $\Delta L/L \approx 10^{-22}$ . Die nächste LIGO Generation soll eine Auflösung von  $10^{-24}$  besitzen. Für ein periodisches Signal, welches man über ein Jahr lang beobachtet, kann man damit eine Genauigkeit von besser als  $10^{-27}$  erreichen. Diese Sensitivität kann auch für einen Test der modifizierten Dispersionsrelation (10) genutzt werden, wenn man zwei Laserstrahlen mit unterschiedlicher Frequenz interferieren lässt und das Ergebnis vergleicht. Natürlich gibt es bei diesem Zugang größte experimentelle Herausforderungen, wie z.B. die Frage wie optische Elemente sich bei verschiedenen Frequenzen verhalten. Trotzdem ist es wohl beachtlich, dass es mindestens ein Laborexperiment gibt, welches zumindest im Prinzip die Sensitivität besitzt, um mit der Planck-Skala belegte Effekte zu detektieren.

Nimmt man alles zusammen, dann ist es offensichtlich, dass es extrem wichtig ist zu versuchen alle Experimente zu verbessern um die Grundlage der Standardtheorie immer besseren Tests zu unterwerfen.

## 10 Die Suche nach QG Effekten

Da es bisher kein einziges Experiment gibt, welches im Widerspruch zu der gegenwärtigen Standard-Theorie steht, gibt es zwei Möglichkeiten solche Effekte zu finden: Entweder muss man die Experimente noch viel genauer machen, und/oder die durch die Quantengravitation induzierten Effekte manifestieren sich in extremen Situationen. Solche extremen Situationen sind durch besonders kleine oder große Werte der die Experimente oder Beobachtungen charakterisierenden Parameter beschrieben. Als Beispiel sind

- besonders hohe Energien,
- besonders tiefe Temperaturen,
- große Geschwindigkeiten,
- besonders kleine oder besonders große Abstände, etc.
- große Differenzen des Gravitationspotentials,
- lange Zeiten und
- neue Formen der Materie wie Antiatome

zu benennen. Dabei bezieht sich das "besonders groß", bzw. "besonders klein" auf den betrachteten Effekt. Wenn man z.B. Beispiel nach Abweichungen von der Newtonschen Gravitationskraft bei besonders kleinen oder besonders großen Abständen sucht, dann bedeutet dies Abstände, die kleiner als 1 mm sind, bzw. Abstände in der Größenordnung von mehreren astronomischen Einheiten. Für

die Newtonsche Gravitationskraft sind dies aber schon experimentell besonders schwer zugängliche Regime.

Bei anderen Effekten bedeuten kleine/große Abstände etwas ganz anderes: Wenn es z.B. um Eigenschaften der Propagation von Licht geht, dann versucht man die Abstände bis hin zu kosmologischen Distanzen groß zu machen. Der Grund ist, dass die Größe des gesuchten Effektes direkt mit dem Abstand skaliert, man ist um so sensitiver auf den gesuchten Effekt, je größer der Abstand ist.

Dass hohe Energien von Vorteil sind, ist offensichtlich, da bei verschiedenen Effekten, wie z.B. bei der Modifikation der Dispersionsrelation diese mit der Planck-Energie skalieren. Im Rahmen der Standard-Quantenelektrodynamik wechselwirkt diese hochenergetische Strahlung mit dem kosmischen Mikrowellenhintergrund und hat demzufolge eine Reichweite von nur 100 Mpc (dies nennt man den nach Greisen, Zatsepin und Kuzmin benannten GZK-cut-off [11]). Die nächste Quelle, von der man sich vorstellen kann, dass sie Strahlung solch hoher Energien erzeugen kann, ist aber 150 Mpc entfernt. Wir sollten also solche hochenergetische Strahlung überhaupt nicht sehen können. Obwohl experimentell noch nicht ganz ausdiskutiert, scheint man kosmische Strahlung mit Energien von mehr als  $10^{19}$  eV nachgewiesen zu haben (die Probleme bestehen in der Kalibrierung der Messgeräte, was bei derart hohen Energien eine höchst nichttriviale Sache ist). Das ist ein Widerspruch zu den Vorhersagen der Standard-Theorie. Diesen Widerspruch kann man z.B. dadurch auflösen, dass man die modifizierte Dispersionsrelation (10) bei der Berechnung der Wechselwirkung mit dem kosmischen Mikrowellenhintergrund zugrundelegt. Die modifizierte Dispersionsrelation ist aber nur eine von mehreren Erklärungsmodellen.

Tiefe Temperaturen, bzw. kleinste Energien, können z.B. dazu führen, dass man sensitiv auf Effekte ist, die von den Raum-Zeit-Fluktuationen induziert werden. So ist es offensichtlich, dass bei Vorhandensein solcher Fluktuationen alle Systeme, z.B. Quantensysteme wie Bose-Einstein-Kondensate, sich so verhalten, wie wenn sie sich in einem thermischen Reservoir befinden. Daher könnte sich die Quantengravitation in einer Temperaturbarriere äußern: es wäre prinzipiell nicht möglich, Systeme auf den absoluten Nullpunkt abzukühlen. Es gibt Projekte, bei denen versucht wird die Temperatur von Bose-Einstein-Kondensaten bei einer ungestörten Expansion im freien Fall um einige Größenordnungen tiefer abzukühlen als der bisherige Rekord von 500 pK. In einem entsprechenden, vom deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) unterstützten Projekt werden unter der Leitung von H. Dittus von der Universität Bremen und E. Rasel von der Universität Hannover Freifall-Experimente mit Bose-Einstein-Kondensaten in Zusammenarbeit mit mehreren deutschen Gruppen am Fallturm in Bremen vorbereitet. Das Fernziel ist es solche Experimente im Weltraum durchzuführen wo beliebig lange Zeiten zur ungestörten Evolution dieser Kondensate zur Verfügung stehen.

Damit hängt das Stichwort "lange Zeiten" zusammen. Damit ist gemeint, dass man versucht langzeitstabile Systeme zu präparieren. Raum-Zeit-Fluktuationen können sich als fundamentales Rauschen in Systemen äußern. Dieses Rauschen kann in "normalen" Situationen sehr klein sein. Ein Rauschen kann in der Regel auf eine Art Brownsche Bewegung zurückgeführt werden, was bedeutet, dass der Effekt des Rauschens bei großen Zeiten auch größer wird. Entgegen der Intuition mittelt sich das Rauschen bei langen Zeiten nicht heraus, sondern kann sich aufaddieren. D.h. bei Langzeitmessungen an stabilen Systemen kann man nach solch einem quantengravitationsinduzierten fundamentalen Rauschen besonders gut suchen. Solche Untersuchungen sind in der Tat schon an langzeitstabilen optischen Resonatoren durchgeführt worden [8]. Das in diesem System beobachtete Rauschen war so klein, dass damit schon ein bestimmtes mögliches Quantengravitationsszenario ausgeschlossen werden konnte.

Große Geschwindigkeiten benötigt man bei Tests der speziell relativistischen Zeitdilatation. Auf atomarere Ebene können hohe Geschwindigkeiten von einigen Prozent der Lichtgeschwindigkeit in

Speicherringen erreicht werden. Dabei ionisiert man die Atome, so dass man auf üblichem Wege die Ionen beschleunigen kann. Der Nachteil dabei ist, dass solch schnelle Ionen nur sehr schwierig mit hoher Genauigkeit im Fluge zu spektroskopieren sind. Eine Alternative wäre, Atomuhren als Ganzes auf eine hohe Geschwindigkeit zu bringen. Auf der Erde können makroskopische Geräte wie eben Atomuhren maximal auf Flugzeuggeschwindigkeit gebracht werden. In der Tat wurde in einem aufsehenerregenden Experiment Ende der 60iger Jahre von Hafele und Keating die relativistische Zeitdilatation dadurch nachgewiesen, dass sie Atomuhren an Bord von Linienflugzeugen um die Erde fliegen liessen. Das war deswegen aufsehenerregend, weil damit zum ersten Mal die Zeitdilatation explizit an makroskopischen Uhren direkt gezeigt wurde. Sonst wird dieser Effekt immer durch Doppler-Verschiebung von Spektrallinien nachgewiesen. Heutzutage wäre es auch möglich, Uhren in Satelliten oder auf der Internationalen Raumstation ISS mit weit höherer Geschwindigkeit fliegen zu lassen. Abschätzungen zeigten, dass mit solchen Experimenten im Weltraum die Genauigkeit solcher Zeitdilatationstests (und auch andere Tests relativistischer Effekte) um mehrere Größenordnungen genauer sein könnten als die besten bisherigen Tests.

Große Potentialdifferenzen sind von Vorteil bei der Suche nach Abweichungen von der Universalität der gravitativen Rotverschiebung, einem weiteren Effekt, der durch die Quantengravitation induziert werden kann.

Neue physikalische Systeme wie Antiatome ermöglichen eine ganz neue Klasse von Experimenten. Man kann mit diesen Antiatomen spektroskopische Experimente durchführen und damit das *CPT*-Theorem testen. Eine Verletzung des *CTP*-Theorems würde auch eine Verletzung der LI nach sich ziehen. Außerdem ist es hochinteressant zu überprüfen, ob für Antimaterie auch das Äquivalenzprinzip gilt. Da Antiatome neutral sind, ist das viel einfacher als mit geladenen Antiteilchen, mit denen man das bisher versucht hat.

Neben diesen generellen Strategien zur Suche nach möglichen quantengravitationsinduzierten Effekten darf natürlich nicht die Verbesserung bisheriger Versuche aus dem Auge verloren werden. So wurde in den letzten Jahren eine erhebliche Steigerung der Genauigkeit bei Michelson-Morley und Kennedy-Thorndike-Versuchen erreicht. Weitere Verbesserungen dieser Experimente sind z.B. in den Gruppen von S.Schiller an der Universität Düsseldorf und A. Peters an der Humboldt-Universität zu Berlin in Kürze zu erwarten.

Die Tests, die zur Überprüfung der Standardtheorie bzw. zur Suche nach neuen Effekten herangezogen werden, lassen sich in Labortests und astrophysikalische Beobachtungen unterteilen. In folgender Gegenüberstellung sieht man, dass beide Klassen von Tests ihre Vor- und Nachteile haben:

- Astrophysikalische Beobachtungen
  - + Höchste Energien, die bis zu  $10^{21}$  eV heranreichen. Die Planck-Energie liegt bei  $10^{28}$  eV.
  - Beobachtungen nicht immer wiederholbar.
  - Keine Kontrolle über Rand- und Anfangsbedingungen.
  - Keine eindeutige Interpretation.
- Labortest
  - Kleine Energien.
  - + Man kann systematisch die Anfangs- und Randbedingungen modulieren und dadurch einerseits die Messgenauigkeit erhöhen und andererseits dem Effekt auch mehr Information entlocken.
  - + Wiederholbarkeit der Experimente.

Der größte Vorteil astrophysikalischer Beobachtungen ist die unvorstellbar große Energie, die Teile des kosmischen Strahlung besitzen.

## 11 Zusammenfassung

Wegen der Inkompatibilität der Quantentheorie mit der Allgemeinen Relativitätstheorie muss es eine neue, übergeordnete Theorie geben, die notwendigerweise Grundlagen dieser Einzeltheorien verletzt. Ein Kandidat für eine solche Verletzung ist die Lorentz-Symmetrie. Es gibt keinen Grund anzunehmen, dass es eine solche Verletzung nicht geben sollte. Das kann alleine das Experiment entscheiden. Im Rahmen von Quantengravitationsansätzen kann die LI durch Mechanismen wie spontane Symmetriebrechung, Raum-Zeit-Fluktuationen oder eine anomale Dispersionsrelation verletzt werden. Es gibt viele experimentelle Ansätze für die Suche nach Effekten, die eine Signatur der Quantengravitation in sich tragen. Wir können also sehr gespannt darauf sein, ob sich vielleicht nicht doch in naher Zukunft mit einem dieser angedeuteten Experimente ein Effekt der Quantengravitation nachweisen läßt.

## Danksagung

Der Autor dankt G. Amelino-Camelia, H. Dittus, E. Göklü, H. Müller, G. Schäfer und S. Scheithauer für fruchtbare Diskussionen und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR für finanzielle Unterstützung.

## Literatur

- [1] C. Lämmerzahl. Special Relativity and Lorentz invariance. *Ann. Physik (Leipzig)*, 14:to be published, 2005.
- [2] G. Schäfer. Gravitation: Geometry and dynamics. *Ann. Physik*, 14:to be published, 2005.
- [3] C. Kiefer. *Quantum Gravity*. Oxford University Press, Oxford, 2004.
- [4] D. Giulini, C. Kiefer, and C. Lämmerzahl (editors), *Quantum Gravity – From Theory to Experimental Search*. Springer-Verlag, Berlin, 2003.
- [5] V.A. Kostelecký. The search for relativity violations. *Sci. Am.* 291(3):74, 2004.
- [6] G. Barton and K. Scharnhorst. QED between parallel mirrors – light signals faster than light, or amplification by vacuum. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 26:2037, 1993.
- [7] I. Antoniadis. Physics with large extra dimensions and non-Newtonian gravity at sub-mm distances. In [4], page 337. In
- [8] S. Schiller, C. Lämmerzahl, H. Müller, C. Braxmaier, S. Herrmann, and A. Peters. Experimental limits for low-frequency space-time fluctuations from ultrastable optical resonators. *Phys. Rev.*, D 69:027504, 2004.
- [9] T. Damour, F. Piazza, and G. Veneziano. Violations of the equivalence principle in a dilaton-runaway scenario. *Phys. Rev.*, D 66:046007, 2002.
- [10] M.J. Duff. A layman’s guide to M-theory. hep-th/9805177.
- [11] J.W. Cronin. Cosmic rays: The most energetic particles in the universe. *Rev. Mod. Phys.*, 71:165, 1999.