

Quantengravitation ohne zusätzliche Theorien

Vereinbarkeit von Schwarzschildmetrik und Quantenmechanik

René Friedrich

Der heutige Raumzeitbegriff wird von drei Annahmen geprägt, die im Widerspruch zur speziellen Relativitätstheorie und zur Schwarzschildmetrik stehen, und dies ist der Grund, warum eine Quantisierung der Raumzeit nicht funktionieren kann. Zum Ziel führt stattdessen die Beschränkung der Raumzeit auf ihre eigentliche Rolle, anhand von drei Erkenntnissen:

- 1. Die Raumzeit ist nicht stetig, insbesondere nicht in raumartiger Richtung, und daher nicht quantifizierbar.**
- 2. Für fundamentale Probleme der Physik zum Thema Zeit muss man auf den fundamentaleren Begriff der Eigenzeit abstellen, nicht jedoch auf die Koordinatenzeit der Raumzeit.**
- 3. Gravitation lässt sich von der Schwarzschildmetrik nicht nur in der gekrümmten Raumzeit darstellen, sondern auch als gravitative Zeitdilatation im absoluten, ungekrümmten Raum.**

Aus diesen drei Erkenntnissen ergeben sich die Merkmale der Quantengravitation. Das Ergebnis: Gravitation wirkt im absoluten Raum der Quantenmechanik als gravitative Zeitdilatation.

0. Einleitung

Wie tritt Gravitation in der Quantenmechanik in Erscheinung? Seit 80 Jahren wird über das Problem der Quantengravitation nachgedacht. Die Lösungsansätze sind widersprüchlich, und eine Klärung scheint nicht in Sicht. Tatsächlich ist die Lösung jedoch, zumindest was die Vereinbarkeit von Schwarzschildmetrik und Quantenmechanik betrifft, sehr einfach. Man könnte sogar sagen, es gibt gar kein Problem - es genügt, die vorhandenen Modellvorstellungen zum Begriff der Raumzeit an Erkenntnisse anzupassen, die sich direkt aus der speziellen Relativitätstheorie und der Schwarzschildmetrik ergeben:

1. Die Quantisierung der Raumzeit scheitert daran, dass die Raumzeit keine stetige Mannigfaltigkeit ist. Die Stetigkeit der Raumzeit ist eine Annahme, die mit der speziellen Relativitätstheorie nicht vereinbar ist, weil letztere nur Weltlinien betrachtet, nicht aber das Vakuum zwischen zeitartigen Weltlinien. Das Universum ist keine vierdimensionale Raumzeitmannigfaltigkeit, sondern, entsprechend den Grundsätzen der Quantenmechanik, eine dreidimensionale Mannigfaltigkeit des Raums.
2. Die Zeit war nach dem absoluten Newtonschen Konzept universell. In der Relativitätstheorie gibt es hingegen zwei Zeitkonzepte: Ein relatives, universelles Konzept der Raumzeitkoordinaten, und ein absolutes, teilchenbezogenes Konzept der Eigenzeit. Obwohl sich das absolute Konzept als das fundamentalere erweist, versucht man, fundamentale physikalische Probleme zum Thema Zeit mit dem relativen Zeitkonzept der Koordinatenzeit der Raumzeit zu lösen. Das kann nicht gelingen.
3. Der Raum ist in der Quantenmechanik absolut, und er wird nicht durch die Gravitation gekrümmt. Das Modell der durch Gravitation gekrümmten Raumzeit hat deshalb in der Quantengravitation keinen Platz. Gravitation lässt sich aber alternativ auch als bloße gravitative Zeitdilatation im ungekrümmten Raum darstellen. Und plötzlich passt alles zusammen.

1. Unmöglichkeit der Quantisierung der Raumzeit wegen fehlender Stetigkeit

Im Jahr 1908 hielt Minkowski einen bewegenden Vortrag über Raum und Zeit. Aus seinen nicht mit Nachweis versehenen, wohl eher als Veranschaulichung zu verstehenden Andeutungen¹ entwickelte sich in der Folge die Annahme einer stetigen vierdimensionalen Raumzeitmannigfaltigkeit.

Die vergeblichen Versuche der Quantisierung der Raumzeit (z.B. durch Blätterung (foliation)) beruhen auf dieser Annahme der Stetigkeit. Eine solche Annahme wird weder von der speziellen Relativitätstheorie noch von der Schwarzschildmetrik gefordert, im Gegenteil, aus der speziellen Relativitätstheorie lässt sich direkt ableiten, dass es keine stetige Raumzeit-Mannigfaltigkeit gibt.

1.1 Keine Stetigkeit im Vakuum zwischen Masseteilchen

Das Problem besteht darin, dass die spezielle Relativitätstheorie sich nicht mit Vakuum, sondern mit Weltlinien beschäftigt.

Die spezielle Relativitätstheorie wird repräsentiert durch:

- die beiden Postulate der speziellen Relativitätstheorie

- *In allen Inertialsystemen gelten die gleichen physikalischen Gesetze.*
- *Licht breitet sich vom Blickpunkt aller Inertialsysteme aus gesehen mit der Geschwindigkeit c aus.*

- die Gleichungen der Lorentztransformation

$$t' = \gamma(v) \left(t - \frac{vx}{c^2} \right) \quad x' = \gamma(v)(x - vt) \quad y' = y \quad z' = z$$

- die Eigenzeitgleichung

$$d\tau = \frac{1}{\gamma(v)} dt$$

Die beiden Postulate beziehen sich ihrem Wortlaut nach nur auf Inertialsysteme (Masseteilchen) und auf Prozesse, die mit der physikalischen Höchstgeschwindigkeit c ablaufen.

Die Lorentztransformation und die Eigenzeitgleichung, die sich beide direkt aus den beiden Postulaten der speziellen Relativitätstheorie herleiten lassen und Ausdruck dieser beiden Postulate sind, verlangen eine relative Geschwindigkeit v und damit das Erfordernis der Definierbarkeit einer relativen Geschwindigkeit.

Das folgende Beispiel zeigt, wie sich das Erfordernis der Definierbarkeit einer relativen Geschwindigkeit in einem Minkowski-Diagramm auswirkt:

¹ "Um nirgends eine gähnende Leere zu lassen, wollen wir uns vorstellen, daß aller Orten und zu jeder Zeit etwas Wahrnehmbares vorhanden ist. Um nicht Materie oder Elektrizität zu sagen, will ich für dieses Etwas das Wort Substanz brauchen."**[1]**

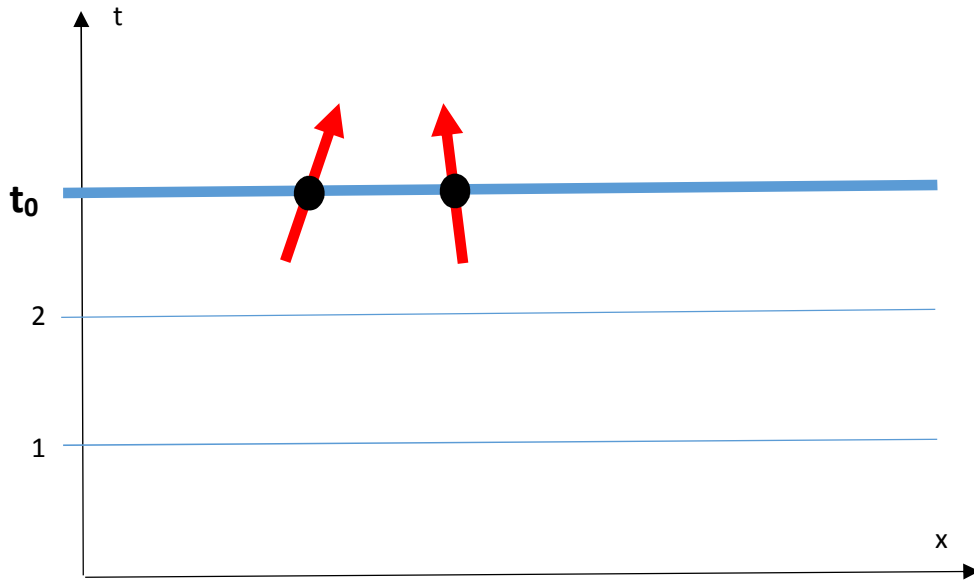


Abb. 1: Minkowskidiagramm mit stetiger Gleichzeitigkeitslinie $t = t_0$

Ein Beobachter beobachtet in seinem Koordinatensystem zwei Teilchen. Beide Teilchen liegen auf der Gleichzeitigkeitslinie $t=t_0$, und der Zwischenraum zwischen beiden Teilchen ist ausgefüllt mit Vakuum - aus der Sicht des Beobachters ergibt sich daraus eine stetige Gleichzeitigkeitslinie zwischen beiden Teilchen (die dicke waagerechte Linie). Raumzeit scheint stetig zu sein (Abb. 1).

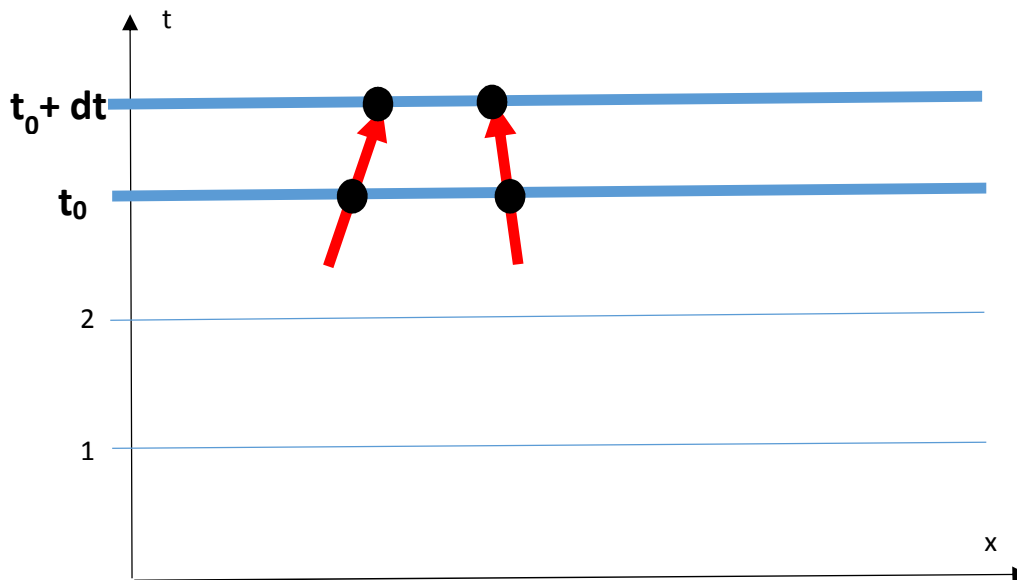


Abb. 2: Minkowskidiagramm mit stetiger Gleichzeitigkeitslinie $t = t_0 + dt$

Kurze Zeit später ergibt sich die Gleichzeitigkeitslinie $t = t_0 + dt$, die ebenfalls stetig zu sein scheint: Die beiden Teilchen haben, je nach ihrer relativen Bewegung zum Beobachter, ihre räumliche Position verändert (Abb. 2).

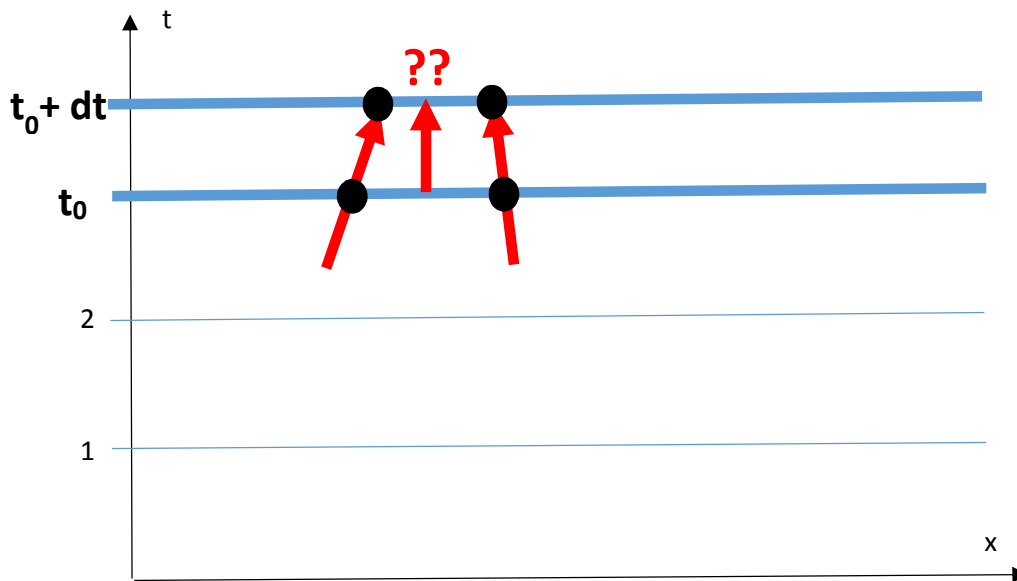


Abb. 3: Vakuum ist zeitlos

Doch der Schein trügt: Das Vakuum vorher und nachher lässt sich nicht zuordnen, weil keine Bewegung definierbar ist: Vakuum ist zeitlos. Würde man einfach einen bewegungslosen Stillstand des Vakuums annehmen, dann würde dies zu einer Art "Vakuum-Äther"-führen, der dem ersten Postulat der speziellen Relativitätstheorie widerspricht. Vakuum ist unbelegter Raum in den Raumzeitkoordinaten eines subjektiven Beobachters (Abb. 3).

Vakuum wird von der speziellen Relativitätstheorie gar nicht behandelt (dies bleibt der Quantenphysik und der Kosmologie vorbehalten), die Raumzeit besteht aus der Gesamtheit aller Weltlinien unter Ausschluss des Vakuums.

Daraus wird die eigentliche Funktion der Raumzeit deutlich: Es handelt sich bei der Raumzeit um ein vierdimensionales mathematisches System für den zeitlichen Abgleich (die Synchronisierung) der Weltlinien der Masseteilchen und der lichtartigen Phänomene mit Hilfe eines beliebigen Bezugssystems eines beliebigen Beobachters, und jeder Beobachter erhält die gleichen Teilchenereignisse (Berührung der Weltlinien von Masseteilchen mit anderen Weltlinien), egal welches Raumzeit-Koordinatensystem man verwendet.

Die gravitative Zeitdilatation der Schwarzschildmetrik ändert an den vorstehenden Schlussfolgerungen nichts, weil sie lediglich das von der Zeitdilatation der speziellen Relativitätstheorie bestimmte Verhältnis zwischen τ und t vergrößert (dilatiert). Dieser Vergrößerungsfaktor der gravitativen Zeitdilatation kann jedoch im Vakuum wegen dessen fehlender Zeitentwicklung nicht zur Anwendung kommen.

1.2 Keine Definition einer zeitlichen Entwicklung von Vakuum durch die lichtartige Ausbreitung von Feldern

Man könnte sich die Frage stellen, ob die lichtartige Ausbreitung von Feldern, die auch zwischen Masseteilchen im Vakuum stattfindet, eine zeitliche Entwicklung von Vakuum definieren könnte.

Dies ist jedoch nicht der Fall. Man müsste hierfür eine lichtartige zeitliche Entwicklung des Vakuums annehmen. Es ist jedoch möglich, dass mehrere Felder durch den gleichen betrachteten Vakuumpunkt

gehen. Zwei sich entgegengesetzt ausbreitende Felder hätten eine widersprüchliche lichtartige Zeitentwicklung des Vakuumpunkts zur Folge (Abb. 4):

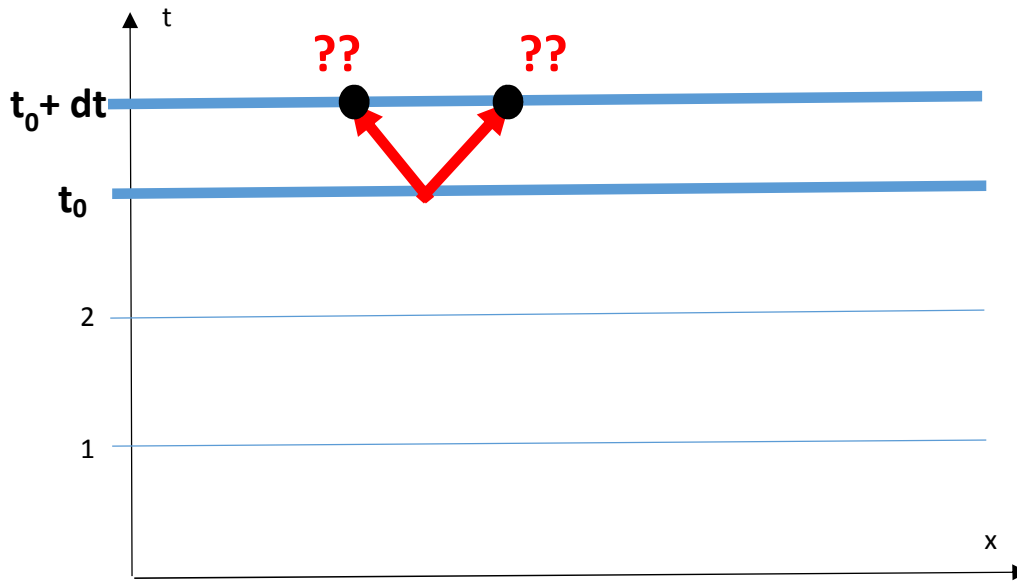


Abb. 4: Lichtartige Ausbreitung von Feldern im Vakuum

Ergebnis: Die vierdimensionale Raumzeit ist keine stetige Mannigfaltigkeit. Sie ist einerseits die Gesamtheit von Weltlinien (einschließlich der Teilchenereignisse). Andererseits ist sie ein relatives Koordinatensystem, indem die Gleichzeitigkeitsebenen jeweils stetig sind. Die Stetigkeit des Koordinatensystems hat jedoch, wie oben gezeigt, keine Entsprechung in der realen Welt.

An die Stelle der vierdimensionalen Raumzeit treten absolute Konzepte für Zeit und Raum:

- Das fundamentale Zeitkonzept der Eigenzeit der Teilchen (siehe unten Abschnitt 2)
- Die dreidimensionale Mannigfaltigkeit des absoluten Raums, wobei die gravitative Raumzeitkrümmung dem nicht entgegensteht (siehe unten Abschnitt 3).

Diese Konzepte sind vereinbar mit der Quantenmechanik und weisen den Weg zur Quantengravitation.

2. Die Eigenzeit als fundamentaler Zeitbegriff, mit dem doppelten Konzept Eigenzeit - Koordinatenzeit

2.1 Koordinatenzeit muss von dem fundamentalen Begriff der Eigenzeit abgeleitet werden

Ausgangspunkt dieser Betrachtung ist die Eigenzeitgleichung der speziellen Relativitätstheorie,

$$d\tau = \frac{1}{\gamma(v)} dt$$

ergänzt durch die Eigenzeitgleichung der gravitativen Zeitdilatation

$$d\tau = \sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} dt$$

die sich direkt aus der Schwarzschildmetrik herleiten lässt.

Die entscheidende Frage lautet: Welcher Zeitbegriff ist von einem axiomatischen Gesichtspunkt der fundamentalere Zeitbegriff, die Koordinatenzeit dt oder die Eigenzeit $d\tau$? Die Antwort auf diese Frage ist erstaunlich klar und ergibt sich aus der Definition der Eigenzeit:

"Die Zeit, die von einer Uhr gemessen wird, die einem bestimmten Objekt folgt".[2]

Diese Definition der Eigenzeit nimmt keinen Bezug auf die Raumzeit, sondern sie bezieht sich nur auf das Objekt, das Teilchen. Jedes Teilchen folgt unabhängig seiner eigenen Eigenzeitfrequenz, die von der lokalen Gravitation und von der Geschwindigkeit des Teilchens abhängt. Das Masseteilchen produziert Eigenzeit, die anschließend in der Form von Koordinatenzeit beobachtet werden kann:



Abb. 5: Eigenzeit als Produkt von Objekten

Ergebnis: Die Eigenzeit der einzelnen Teilchen erweist sich als **externes Fundament** des pseudo-riemannschen Koordinatensystems:

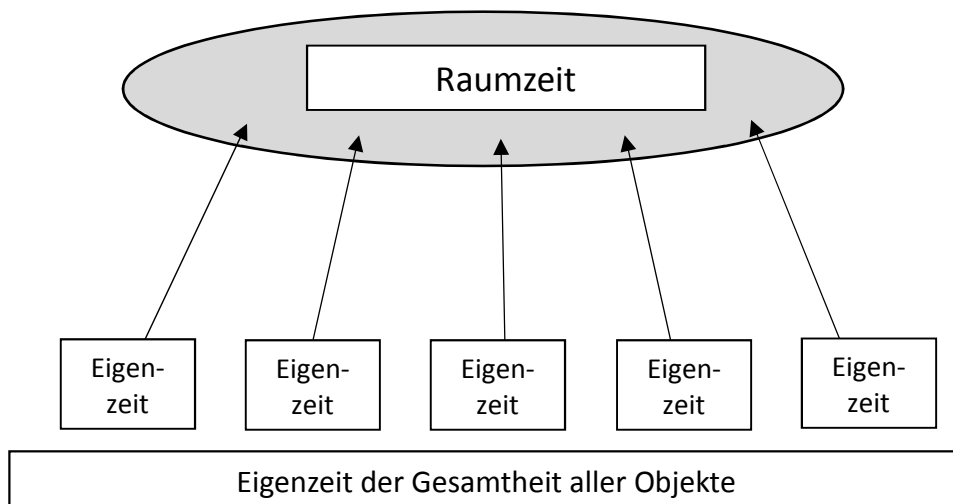


Abb. 6: Die Eigenzeit der Gesamtheit der Teilchen als externes Fundament der Raumzeit

Daraus folgt der fundamentale Charakter der Eigenzeit:

Weil die Eigenzeit der fundamentalere Zeitbegriff ist, muss bei fundamentalen Fragen der Physik über die Zeit der Eigenzeitbegriff herangezogen werden, nicht die Koordinatenzeit.

2.2 Regel der Zeitlosigkeit

Eine erste Konsequenz dieses Grundsatzes ist die Regel der Zeitlosigkeit des Universums. Dazu betrachten wir die Eigenzeit von drei wichtigen Bestandteilen des Universums:

1. Masseteilchen produzieren Eigenzeit
2. Die Eigenzeit lichtartiger Phänomene ist Null ($\tau = 0$, siehe unten 2.3),
3. Für das Vakuum zwischen Masseteilchen ist Eigenzeit nicht definiert (siehe oben Sektion 1).

Nur aus der Eigenzeit (einschließlich des Grenzfalles der Null-Eigenzeit lichtartiger Prozesse) lässt sich die Koordinatenzeit der Raumzeit ableiten. Alle Prozesse der Quantenmechanik, für die keine Eigenzeit ausdrücklich definiert ist, sind daher zeitlos.

2.3 Zeitsymmetrie lichtartiger Phänomene

Eine weitere wichtige Anwendung des Grundsatzes betrifft lichtartige Phänomene (wie z.B. Felder):

Phänomene, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, haben nach der Eigenzeitgleichung die Eigenzeit Null.[3][4][5] Wendet man die Erkenntnis an, dass für fundamentale Fragen nicht auf die Koordinatenzeit sondern auf die Eigenzeit abzustellen ist, gelangt man zur Zeitsymmetrie aller lichtartigen Phänomene. In der Quantenmechanik entfallen damit alle Probleme fehlender zeitlicher Reversibilität von lichtartigen Vorgängen.

2.4 Beschreibung der Eigenzeit als Zeitfrequenz des Objekts

Für Masseteilchen ergibt sich aus der Eigenzeit, dass jedes Teilchen nach seiner eigenen Zeitfrequenz lebt. Dies gilt auch für nichtrelativistische Vorgänge. Zwar handelt es sich hier um äußerst geringfügige Differenzen, aber diese Differenzen spiegeln genau die Struktur wieder, die von der speziellen Relativitätstheorie im Gegensatz zum Newtonschen Weltbild vorgegeben wird: Die Raumzeit besteht aus individuellen Weltlinien ohne raumartige Stetigkeit.

Beispiel: Ein Gefängnisinsasse altert schneller als ein Busfahrer:

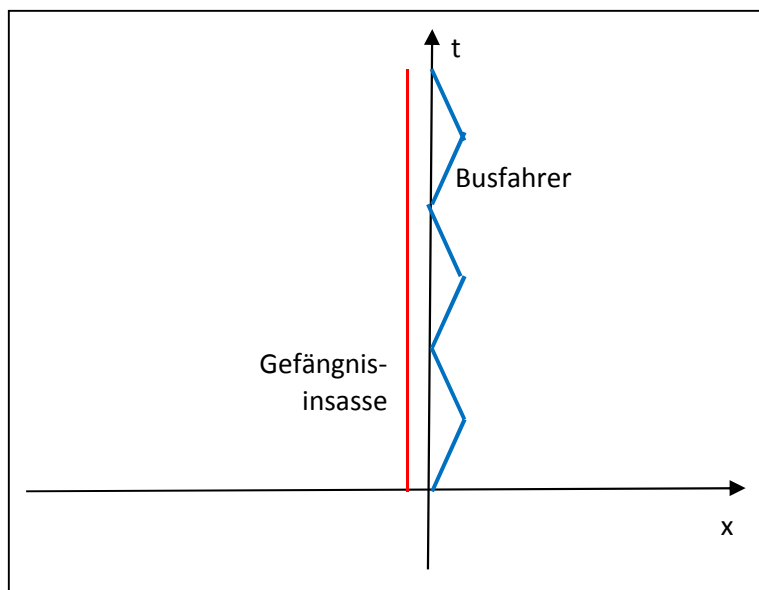


Abb. 7: Zwillingsparadoxon bei langsamen Geschwindigkeiten

Jedes Teilchen des Universums hat seinen eigenen "Pulsschlag" und lebt in seiner eigenen Zeit.

Wir beobachten Teilchen mit der Koordinatenzeit unseres Minkowski-Diagramms. Die Eigenzeit geht aus einem Minkowski-Diagramm nicht hervor. Wir können sie jedoch errechnen und wie nachstehend als „Pulsschlag“-Frequenz symbolisch als Zusatzinformation einzeichnen. Der Pulsschlag zeigt die Zeiteinheiten an, die für das Objekt vergehen.

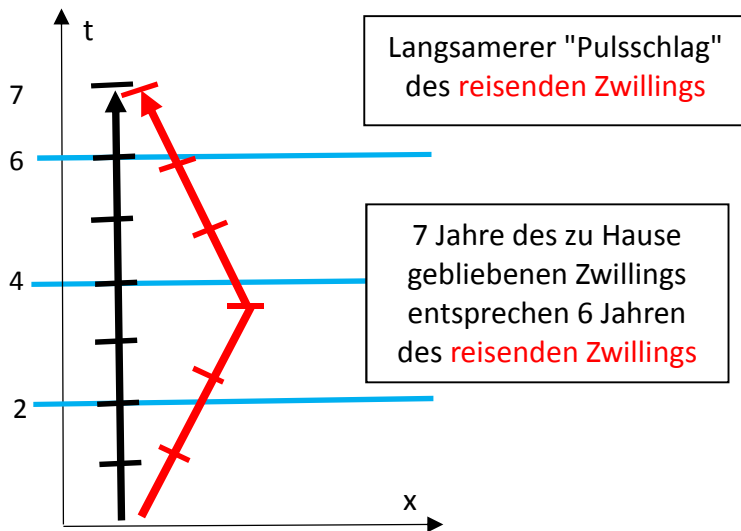


Abb. 8: Zwillingenparadoxon mit Eigenzeit-"Pulsschlag"

Mit Hilfe von dieser kombinierten Darstellung von Koordinatenzeit und Eigenzeit können wir nun die Teilchen des Universums schematisch darstellen:

Schnelle Teilchen und Teilchen, die hoher Gravitation ausgesetzt sind, haben hier einen langsameren Pulsschlag und altern langsamer.

Dabei ergänzen sich Koordinatenzeit und Eigenzeit funktional: Mit der Koordinatenzeit ist es möglich, mehrere Teilchen zusammen (und auch das gesamte sichtbare Universum) darzustellen. Die Eigenzeit hingegen informiert über die reale Alterungsfrequenz von jedem einzelnen Teilchen.

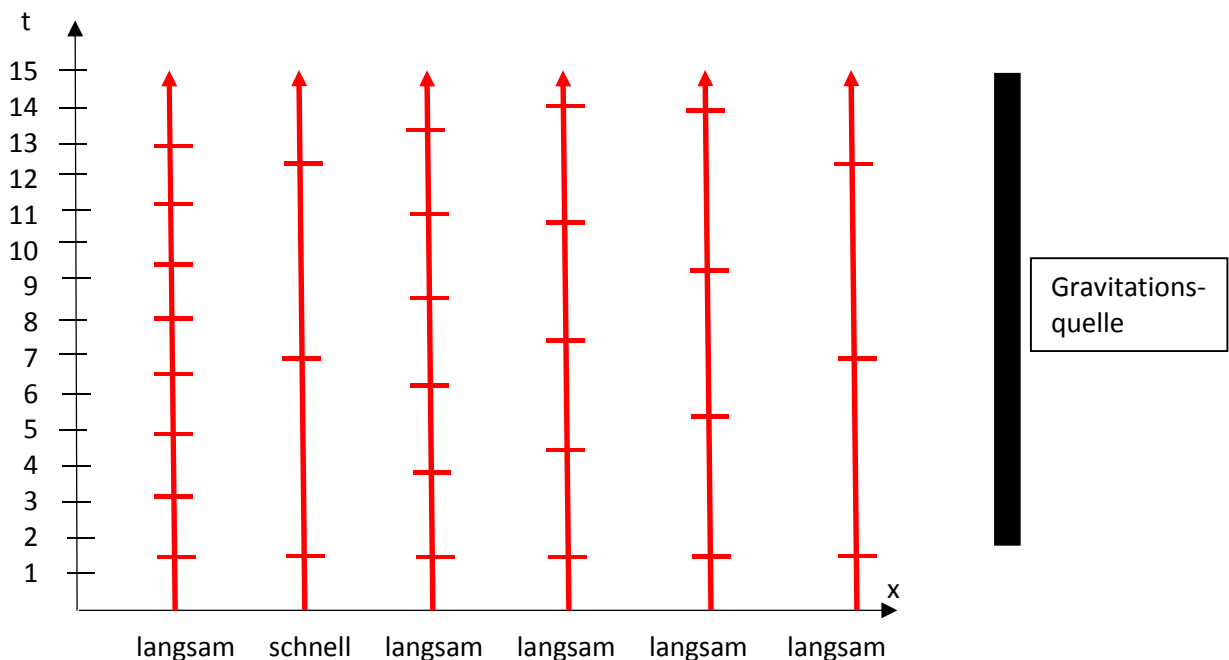


Abb. 9: Minkowski-Diagramm mit 5 langsamen und einem schnellen Teilchen, die mehr oder weniger weit entfernt von einer Gravitationsquelle sind, mit Einzeichnung der Eigenzeit-Frequenz der Teilchen

3. Gekrümmte Raumzeit im ungekrümmten Raum

Der oben in Abschnitt 1 dargelegte fehlende Mannigfaltigkeits-Charakter der Raumzeit (und auch die Quantenmechanik) verlangt die Existenz einer dreidimensionalen Raummannigfaltigkeit. Die gekrümmte Raumzeit der Schwarzschildmetrik scheint dagegen eine dreidimensionale Raummannigfaltigkeit auszuschließen.

Handelt es sich also um einen Irrtum, oder gibt es wirklich eine Möglichkeit, die Schwarzschildmetrik im flachen Raum zu beschreiben, der unabhängig von der Zeit ist?

Die Antwort ist überraschend klar und einfach. Hierzu betrachten wir zunächst die Schwarzschildmetrik der gekrümmten Raumzeit in einem Zweiteilchen-Universum:

$$ds^2 = -c^2 \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} + r^2 (d\theta + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

Die gravitative Zeitdilatation bezeichnen wir mit C, und die Gleichung der gravitativen Zeitdilatation der Uhr eines Teilchens im Gravitationsfeld bezogen auf die Uhr eines entfernten Beobachters lautet:

$$C = \frac{\tau}{t} = \sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 r}}$$

Wir setzen C in die obige Gleichung ein und erhalten eine veränderte Form der Schwarzschildmetrik:

$$ds^2 = -c^2 (C dt)^2 + \left(\frac{dr}{C}\right)^2 + r^2 (d\theta + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

und wir stellen diese Gleichung der Gleichung der flachen Minkowski-Raumzeit **[6]** gegenüber:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dr^2 + r^2 (d\theta + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

Es ergibt sich, dass die Krümmung, die die Gravitation darstellt, ausschließlich eine Funktion der Zeitdilatation ist:

dt wird zu $C dt$ und dr wird zu $\frac{dr}{C}$.

Gravitation lässt sich somit im flachen Raum als bloße Zeitdilatation darstellen.

Bei der Darstellung als gravitative Zeitdilatation im flachen Raum anstatt in der gekrümmten Raumzeit ändert sich die Beschreibung der Bewegung der Masseteilchen im Gravitationsfeld: In der gekrümmten Raumzeit wird die Bewegung durch die Krümmung der Raumzeit selbst veranlasst, in der Beschreibung im flachen Raum dagegen wird die Bewegung durch das Bestreben der Teilchen veranlasst, ihre eigene Zeitdilatation zu maximieren. Beide Sichtweisen sind äquivalent.

Das Modell der Gravitation als bloße Zeitdilatation lässt sich jedoch auch in der Quantenmechanik beschreiben, deren Zeitparameter klassisch ist. Dadurch wird der Weg zur Quantengravitation frei.

4. Die sieben Merkmale der Quantengravitation

Vorab ein einfaches Beispielschema mit den Merkmalen der herkömmlichen Quantenmechanik:

- Absoluter Raum
- Absolute Zeit (Laboruhr)
- Zwei Quantensysteme mit Masseteilchen
- Eine Gravitationsquelle, deren Auswirkungen auf die Quantenmechanik bislang unklar waren.

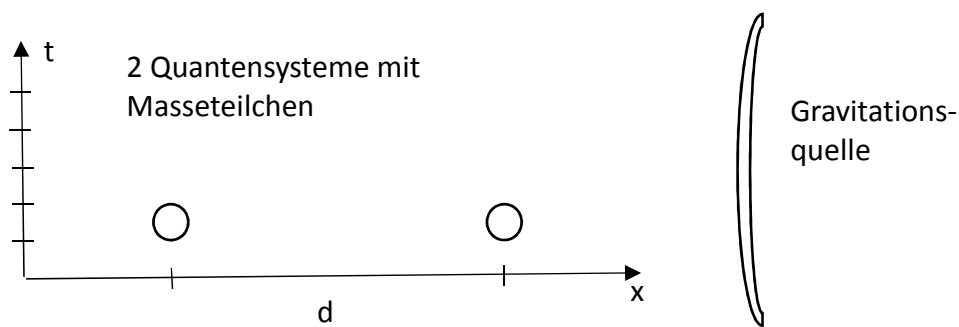


Abb. 10: Beispielschema aus der herkömmlichen Quantenmechanik

Folgendes sind die sieben grundlegenden Merkmale, die die Quantengravitation umfassend charakterisieren:

Merkmal 1/7: Der dreidimensionale Raum als universelle Mannigfaltigkeit

In Abschnitt 1 wurde gezeigt, dass es keine stetige vierdimensionale Mannigfaltigkeit gibt. Das Universum der Quantengravitation ist eine dreidimensionale Mannigfaltigkeit des Raums, die durch die Gravitation nicht gekrümmt wird.

Merkmal 2/7: Regel der Zeitlosigkeit

In Abschnitt 2 wurde gezeigt, dass für fundamentale Fragen der Physik der Begriff der Eigenzeit heranzuziehen ist. Die Eigenzeit ist eine besondere Eigenschaft von Teilchen. Zeit ist somit nicht universell, sondern auf Prozesse beschränkt, für die eine Eigenzeit ausdrücklich definiert ist. Alle anderen Prozesse der Quantenmechanik sind zeitlos.

Merkmal 3/7: Zeitsymmetrie lichtartiger Vorgänge

Die Eigenzeit der Ausbreitung von Feldern und von sonstigen lichtartigen Vorgängen ist Null, daher sind diese Vorgänge zeitsymmetrisch. Auch hier hilft der Grundsatz weiter, dass bei fundamentalen Fragen auf die Eigenzeit abgestellt werden muss, nicht auf die Koordinatenzeit.

Merkmal 4/7: Produktion der Eigenzeit durch Masseteilchen

Eigenzeit wird durch Masseteilchen produziert, und Koordinatenzeit leitet sich von der produzierten Eigenzeit und von der Null-Eigenzeit lichtartiger Phänomene ab.

Merkmal 5/7: Doppeltes Zeitkonzept

Das absolute Zeitkonzept der Quantenmechanik ist durch zwei einander ergänzende Zeitkonzepte zu ersetzen: a) die gemessene Koordinatenzeit (Laboruhr), die dem alten Zeitkonzept entspricht, und b) die Eigenzeit, die direkt allen betroffenen Teilchen und lichtartigen Phänomenen zuzuordnen ist.

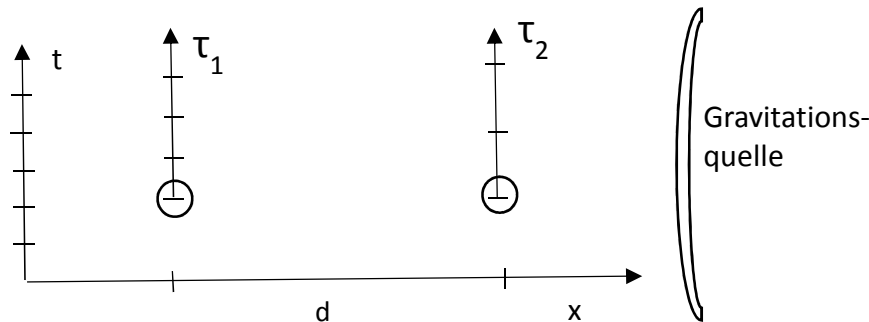


Abb. 11: Quantengravitation: Zwei Quantensysteme und eine Gravitationsquelle

Merkmal 6/7: Berechnung der Eigenzeit aus der gemessenen Koordinatenzeit

Statt der Quantisierung der Raumzeit muss Quantengravitation auf Teilchenebene stattfinden: Alle Quantensysteme müssen jeweils ihren eigenen Eigenzeitfrequenzen („Pulsschlag“) folgen, die aus der Koordinatenzeit der Laboruhr und Informationen über Geschwindigkeit und Gravitationsfeldstärke errechnet werden können.

Merkmal 7/7: Gravitation als das Bestreben, die eigene Zeitdilatation zu maximieren

Die Schwarzschildmetrik im ungekrümmten Raum der Quantenmechanik: Nach der Schwarzschildmetrik ist die als gekrümmte Raumzeit beschriebene Gravitation identisch mit der gravitativen Zeitdilatation im ungekrümmten Raum. Die Anziehungskraft der Gravitation im flachen Raum besteht im Bestreben der Teilchen im Gravitationsfeld, ihre eigene gravitative Zeitdilatation (bezogen auf die anderen Teilchen) zu maximieren.

5. Referenzen:

[1] Hermann Minkowski: Space and time, Bulletin of the Calcutta Mathematical Society, Volume 1, pp. 135-141

[2] Landau/ Lifshitz, The Classical Theory of Fields, 1951, § 1.3. Proper time, p.8

[3] Wolfgang Rindler, *Relativity, Special, General, Cosmological*, 2001/2006, 3.5 Light cones and intervals

[4] Sexl/ Urbantke: *Relativity, Groups, Particles*, Springer-Verlag Wien 1992/2001, 4.3 Photons: Doppler effect and Compton effect

[5] James B. Hartle: *Gravity*, Addison Wesley 2003, p.91

[6] Robert M. Wald, *General Relativity*, 1984, p.271