

Zeit als emergente Eigenschaft in der Quantenmechanik: Eine Verbindung zwischen Relativitätstheorie, Feinstrukturkonstante und Quantendynamik

Johann Pascher

22.03.2025

1 Einleitung

In der modernen Physik werden Zeit und Raum unterschiedlich behandelt. Während Raumkoordinaten in der Quantenmechanik durch Operatoren repräsentiert werden, erscheint die Zeit hauptsächlich als Parameter. Diese asymmetrische Behandlung wirft grundlegende Fragen über die Natur der Zeit auf. Diese Arbeit untersucht, inwiefern Zeit als eine emergente Eigenschaft verstanden werden kann, die mit fundamentalen Konstanten und der Masse des betrachteten Systems zusammenhängt.

Contents

1	Einleitung	1
2	Zeit in der speziellen Relativitätstheorie	1
2.1	Umformung der Energie-Masse-Äquivalenz	1
3	Verbindung zur Feinstrukturkonstante	2
3.1	Herleitung über elektromagnetische Konstanten	2
4	Zeit in der Quantenmechanik	2
4.1	Standardbehandlung der Zeit	2
4.2	Eine neue Perspektive: Intrinsische Zeit	2
5	Verknüpfung von Zeit, Masse und Feinstrukturkonstante	3
5.1	Eine vereinheitlichte Beziehung	3
5.2	Interpretation in natürlichen Einheiten	3
6	Konsequenzen für die Physik	3
6.1	Eine neue Perspektive auf die Zeit	3
6.2	Verbindung zur Zeitdilatation	4
7	Ein einheitliches Bild von Zeit, Masse und Wechselwirkung	4

8 Experimentelle Überprüfungsmöglichkeiten	4
9 Auswirkungen auf die instantane Kohärenz in der Quantenmechanik	4
9.1 Das Problem der instantanen Kohärenz	4
9.2 Masseabhängige Kohärenzzeiten	5
9.3 Mathematische Formulierung für Mehrteilchensysteme	5
9.4 Auswirkungen auf verschränkte Zustände	5
9.5 Modifizierte Dispersionsrelation	5
9.6 Neue Interpretation für EPR-Paradoxon und Bell'sche Ungleichungen	6
9.7 Konsistente Formulierung einer masseabhängigen Zeittheorie	6
9.8 Instantane Prozesse und minimale Zeitskalen	7
10 Schlussfolgerungen und Ausblick	7

2 Zeit in der speziellen Relativitätstheorie

Einstein's berühmte Formel $E = mc^2$ verbindet Energie und Masse durch die Lichtgeschwindigkeit. Diese Beziehung enthält keine explizite Zeitvariable. Um eine Verbindung zur Zeit herzustellen, müssen wir zusätzliche physikalische Beziehungen heranziehen.

2.1 Umformung der Energie-Masse-Äquivalenz

Ausgehend von $E = mc^2$ und der quantenmechanischen Beziehung zwischen Energie und Frequenz:

$$E = mc^2 \quad (1)$$

$$E = h\nu = \frac{h}{T} \quad (2)$$

wobei h das Planck'sche Wirkungsquantum, ν die Frequenz und T die Periodendauer ist. Durch Gleichsetzen erhalten wir:

$$mc^2 = \frac{h}{T} \quad (3)$$

$$T = \frac{h}{mc^2} \quad (4)$$

Diese Zeit T kann als eine charakteristische Zeitskala interpretiert werden, die mit einer Masse m assoziiert ist.

3 Verbindung zur Feinstrukturkonstante

Die Feinstrukturkonstante α ist eine dimensionslose physikalische Konstante, die die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung beschreibt:

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137.035999} \quad (5)$$

3.1 Herleitung über elektromagnetische Konstanten

Wie in früheren Arbeiten gezeigt, kann das Planck'sche Wirkungsquantum durch elektromagnetische Vakuumkonstanten ausgedrückt werden:

$$h = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} \quad (6)$$

Mit dieser Beziehung kann die charakteristische Zeit T umgeschrieben werden:

$$T = \frac{h}{mc^2} \quad (7)$$

$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} \cdot \frac{1}{mc^2} \quad (8)$$

Da $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}$, erhalten wir:

$$T = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} \cdot \frac{1}{m \cdot \frac{1}{\mu_0\varepsilon_0}} \quad (9)$$

$$= \frac{1}{2\pi mc^3} \quad (10)$$

4 Zeit in der Quantenmechanik

4.1 Standardbehandlung der Zeit

In der konventionellen Quantenmechanik erscheint die Zeit als Parameter in der Schrödingergleichung:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) = \hat{H} \Psi(x, t) \quad (11)$$

Im Gegensatz zu Raum- oder Impulskoordinaten existiert kein Zeitoperator. Die Zeit wird als kontinuierlicher Parameter behandelt, entlang dessen sich Quantenzustände entwickeln.

4.2 Eine neue Perspektive: Intrinsische Zeit

Betrachten wir die charakteristische Zeit $T = \frac{\hbar}{mc^2}$ als eine "intrinsische Zeit" eines Quantenobjekts. Diese Zeit hängt von der Masse des Objekts ab und könnte als die minimale Zeitskala interpretiert werden, auf der das Objekt quantenmechanische Veränderungen erfahren kann. Sie ergibt sich direkt aus der Äquivalenz von Energie und Masse sowie der quantenmechanischen Energie-Frequenz-Beziehung und könnte eine fundamentale untere Grenze für zeitliche Prozesse darstellen, wie später im Kontext der Instantaneität diskutiert wird.

Die Schrödingergleichung könnte modifiziert werden, um diese intrinsische Zeit zu berücksichtigen:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial(t/T)} \Psi = \hat{H} \Psi \quad (12)$$

Dies würde bedeuten, dass die Zeitentwicklung nicht mehr einheitlich für alle Objekte ist, sondern von deren Masse abhängt.

5 Verknüpfung von Zeit, Masse und Feinstrukturkonstante

5.1 Eine vereinheitlichte Beziehung

Mit der Beziehung $T = \frac{\hbar}{mc^2}$ und der Definition der Feinstrukturkonstante können wir eine direkte Verbindung herstellen:

$$T = \frac{\hbar}{mc^2} \quad (13)$$

$$= \frac{\hbar}{mc^2} \cdot \frac{4\pi\varepsilon_0\hbar c}{e^2} \cdot \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} \quad (14)$$

$$= \frac{\hbar^2 \cdot 4\pi\varepsilon_0 c}{mc^2 \cdot e^2} \cdot \alpha \quad (15)$$

Dies zeigt, dass die intrinsische Zeit T proportional zur Feinstrukturkonstante α ist.

5.2 Interpretation in natürlichen Einheiten

In einem natürlichen Einheitensystem, in dem $c = \hbar = 1$ gesetzt wird, vereinfacht sich diese Beziehung zu:

$$T = \frac{\alpha}{m} \cdot \frac{4\pi\varepsilon_0}{e^2} \quad (16)$$

Und wenn wir zusätzlich $\alpha = 1$ setzen, wie im Hauptdokument diskutiert, erhalten wir:

$$T = \frac{1}{m} \cdot \frac{4\pi\varepsilon_0}{e^2} \quad (17)$$

In einem vollständig natürlichen System, in dem auch $e = 1$ und $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi}$ gesetzt werden, wird die Beziehung sogar noch einfacher:

$$T = \frac{1}{m} \quad (18)$$

Diese elegante Beziehung zeigt, dass in einem solchen theoretischen Rahmen die intrinsische Zeit eines Objekts einfach der Kehrwert seiner Masse ist.

6 Konsequenzen für die Physik

6.1 Eine neue Perspektive auf die Zeit

Die Idee, dass Zeit eine emergente Eigenschaft sein könnte, die von der Masse und den fundamentalen Wechselwirkungskonstanten abhängt, hat tiefgreifende Implikationen:

- Die konventionelle Behandlung der Zeit als unabhängiger Parameter könnte eine Näherung sein, die für makroskopische Objekte gut funktioniert.
- Auf fundamentaler Ebene könnte Zeit eine abgeleitete Größe sein, nicht eine grundlegende.
- Die "Geschwindigkeit" der Zeitentwicklung könnte für verschiedene Quantenobjekte unterschiedlich sein, abhängig von ihrer Masse.

6.2 Verbindung zur Zeitdilatation

Interessanterweise erinnert diese Perspektive an die relativistische Zeitdilatation, allerdings aus einem völlig anderen theoretischen Rahmen. Während die Relativitätstheorie vorhersagt, dass bewegte Uhren langsamer laufen, deutet unser Ansatz darauf hin, dass massivere Quantenobjekte eine "schnellere" intrinsische Zeitentwicklung haben könnten.

7 Ein einheitliches Bild von Zeit, Masse und Wechselwirkung

Die hier vorgestellte Umformung verbindet drei fundamentale Aspekte der Physik:

- Die relativistische Energie-Masse-Beziehung ($E = mc^2$)
- Die quantenmechanische Energie-Frequenz-Beziehung ($E = h\nu$)
- Die elektromagnetische Wechselwirkungsstärke (Feinstrukturkonstante α)

Dies deutet auf einen tieferen Zusammenhang zwischen diesen scheinbar unterschiedlichen Aspekten der Realität hin und könnte als Schritt in Richtung einer umfassenderen Theorie betrachtet werden.

8 Experimentelle Überprüfungsmöglichkeiten

Die Idee einer masseabhängigen intrinsischen Zeit könnte experimentelle Konsequenzen haben:

- Unterschiede in der Kohärenzzeit von Quantensystemen unterschiedlicher Masse
- Masseabhängige Phasenverschiebungen in Quanteninterferenzexperimenten
- Spezifische Signaturen in der Spektroskopie von Teilchen unterschiedlicher Masse

9 Auswirkungen auf die instantane Kohärenz in der Quantenmechanik

9.1 Das Problem der instantanen Kohärenz

Die konventionelle Quantenmechanik geht von der Annahme aus, dass Quantenüberlagerungen und -korrelationen sich instantan über das gesamte System erstrecken. Dies wird besonders deutlich bei verschränkten Zuständen, wo Messungen an einem Teilchen sofortige Auswirkungen auf den Zustand eines anderen, räumlich entfernten Teilchens haben können.

In einem Bild mit masseabhängiger intrinsischer Zeit $T = \frac{h}{mc^2}$ müssen wir diese Annahme überdenken.

9.2 Masseabhängige Kohärenzzeiten

Wenn die intrinsische Zeit T einer Masse m umgekehrt proportional ist, dann haben schwerere Teilchen kürzere intrinsische Zeitskalen. Dies könnte bedeuten, dass Kohärenzphänomene für schwerere Quantenobjekte schneller ablaufen, relativ zu ihrer eigenen intrinsischen Zeitskala.

Mathematisch könnten wir dies durch eine modifizierte Dekohärenzrate ausdrücken:

$$\Gamma_{\text{dek}} = \Gamma_0 \cdot \frac{mc^2}{\hbar} \quad (19)$$

wobei Γ_0 die konventionelle Dekohärenzrate ist. Dies würde bedeuten, dass schwerere Systeme in ihrer intrinsischen Zeitskala langsamer dekohärieren, aber in einer externen Laborzeit schneller.

9.3 Mathematische Formulierung für Mehrteilchensysteme

Für ein System mit zwei Teilchen unterschiedlicher Masse (m_1 und m_2) würde die gemeinsame Wellenfunktion $\Psi(x_1, x_2, t)$ zwei unterschiedliche intrinsische Zeitskalen haben. Die modifizierte Schrödinger-Gleichung für dieses System könnte wie folgt formuliert werden:

$$i(m_1 + m_2)c^2 \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x_1, x_2, t) = \hat{H} \Psi(x_1, x_2, t) \quad (20)$$

Dies impliziert, dass die Zeitentwicklung von der Gesamtmasse des Systems abhängt, was eine natürliche Verallgemeinerung der intrinsischen Zeit für Mehrteilchensysteme darstellt.

9.4 Auswirkungen auf verschränkte Zustände

Für verschränkte Zustände mit Teilchen unterschiedlicher Masse, beispielsweise:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_{m_1} \otimes |1\rangle_{m_2} + |1\rangle_{m_1} \otimes |0\rangle_{m_2}) \quad (21)$$

würde die Zeitentwicklung für die beiden Teilchenkomponenten unterschiedlich sein:

$$|\Psi(t)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0(t/T_1)\rangle_{m_1} \otimes |1(t/T_2)\rangle_{m_2} + |1(t/T_1)\rangle_{m_1} \otimes |0(t/T_2)\rangle_{m_2}) \quad (22)$$

mit $T_1 = \frac{\hbar}{m_1 c^2}$ und $T_2 = \frac{\hbar}{m_2 c^2}$. Die Kohärenz ist jedoch durch die minimale Zeitskala $T = \frac{\hbar}{mc^2}$ begrenzt, die aus der Energie-Zeit-Unschärfe folgt, wie später diskutiert.

9.5 Modifizierte Dispersionsrelation

In der Standard-Quantenmechanik gilt für eine freie Teilchenwelle die Dispersionsrelation:

$$\hbar\omega = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \quad \Rightarrow \quad \omega = \frac{\hbar k^2}{2m} \quad (23)$$

Diese Beziehung beschreibt die Frequenz einer Materiewelle als Funktion der Masse m und des Wellenvektors k . Mit der Einführung der intrinsischen Zeit $T = \frac{\hbar}{mc^2}$ als charakteristische Zeitskala eines Quantenobjekts müssen wir untersuchen, wie sich dies auf die Zeitentwicklung der Wellenfunktion auswirkt.

Betrachten wir eine ebene Welle der Form $\Psi \sim e^{i(kx - \omega t)}$. Wenn die Zeitentwicklung relativ zur intrinsischen Zeit T skaliert wird, schreiben wir die Wellenfunktion als:

$$\Psi \sim e^{i(kx - \omega t/T)} \quad (24)$$

Hier wird die Zeit t durch T normiert, was die effektive Frequenz ω_{eff} modifiziert. Die Phase der Wellenfunktion lautet nun:

$$kx - \omega \frac{t}{T} = kx - \omega \frac{mc^2}{\hbar} t \quad (25)$$

Daraus folgt, dass die effektive Frequenz im Verhältnis zur intrinsischen Zeitskala gegeben ist durch:

$$\omega_{\text{eff}} = \omega \cdot T = \omega \cdot \frac{\hbar}{mc^2} \quad (26)$$

Setzen wir die Standard-Frequenz $\omega = \frac{\hbar k^2}{2m}$ ein:

$$\omega_{\text{eff}} = \frac{\hbar k^2}{2m} \cdot \frac{\hbar}{mc^2} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^2 c^2} \quad (27)$$

Diese modifizierte Dispersionsrelation bleibt masseabhängig, im Gegensatz zu einer masseunabhängigen Form, die in früheren Überlegungen als Artefakt erschien. Die Abhängigkeit von m^2 im Nenner zeigt, dass schwerere Teilchen eine langsamere effektive Frequenz besitzen, was mit der Interpretation von T als intrinsischer Zeitskala konsistent ist.

Interessanterweise unterscheidet sich diese Beziehung deutlich von der Standard-Quantenmechanik, wo $\omega \propto \frac{1}{m}$ gilt. Die neue Form $\omega_{\text{eff}} \propto \frac{1}{m^2}$ könnte experimentelle Unterschiede in der Propagation von Materiewellen hervorrufen, insbesondere bei Teilchen unterschiedlicher Masse. Dies könnte als Test für die masseabhängige Zeittheorie dienen.

9.6 Neue Interpretation für EPR-Paradoxon und Bell'sche Ungleichungen

Unsere masseabhängige Zeittheorie könnte neue Interpretationsmöglichkeiten für das EPR-Paradoxon und die Bell'schen Ungleichungen bieten. Wenn Zeit eine emergente, masseabhängige Eigenschaft ist, wird die Frage aufgeworfen, ob "instantan" ein wohldefinierter Begriff auf der fundamentalen Quantenebene ist.

Ein verschränktes System könnte in einem solchen Bild als ein zusammengesetztes Objekt gesehen werden, dessen intrinsische Zeitskala durch eine Kombination der Massen seiner Komponenten bestimmt wird. Dies könnte die scheinbar nicht-lokale "spukhafte Fernwirkung" in einem neuen Licht erscheinen lassen.

9.7 Konsistente Formulierung einer masseabhängigen Zeittheorie

Um eine vollständig konsistente Theorie zu entwickeln, könnten wir den Hamilton-Operator neu interpretieren:

$$\hat{H}' = \frac{mc^2}{\hbar} \hat{H} \quad (28)$$

Damit würde die modifizierte Schrödinger-Gleichung zu:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = \hat{H}' \Psi \quad (29)$$

Dies führt zur ursprünglichen Form zurück, aber mit einer neuen Interpretation: Die Zeit entwickelt sich für verschiedene Quantenobjekte mit unterschiedlichen "Geschwindigkeiten", abhängig von ihrer Masse, während die relativen Energieniveaus und Übergänge erhalten bleiben.

9.8 Instantane Prozesse und minimale Zeitskalen

Ein oft übersehenes Problem bei der Interpretation der Quantenmechanik ist die Annahme absoluter Instantaneität. Die charakteristische Zeitskala eines Teilchens $T = \frac{\hbar}{mc^2}$ legt jedoch eine fundamentale minimale Zeitskala fest. Dies bedeutet, dass selbst Prozesse, die als "instantan" betrachtet werden, mindestens eine Zeit in der Größenordnung von T benötigen.

Betrachten wir die Energie-Zeit-Unschärferelation:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad (30)$$

Wenn $\Delta E \sim mc^2$ gilt, folgt:

$$\Delta t \gtrsim \frac{\hbar}{mc^2} = T \quad (31)$$

Dies impliziert, dass keine Information in exakt null Zeit übertragen werden kann – es gibt eine fundamentale untere Grenze für jegliche Quantenwechselwirkung, die direkt aus den bestehenden Prinzipien folgt.

10 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Umformung der Einstein'schen Energie-Masse-Äquivalenz, um Zeit als Funktion von Masse, Lichtgeschwindigkeit und Planck'schem Wirkungsquantum auszudrücken, eröffnet neue konzeptionelle Perspektiven. Die weitere Verbindung mit der Feinstrukturkonstante zeigt, wie fundamentale Wechselwirkungen mit der Zeitentwicklung quantenmechanischer Systeme zusammenhängen könnten.

Die hier vorgestellte masseabhängige Zeittheorie stellt fundamentale Annahmen der Quantenmechanik infrage, insbesondere die Vorstellung einer einheitlichen, universellen Zeit und der instantanen Kohärenz über räumliche Entfernungen. Die intrinsische Zeit $T = \frac{\hbar}{mc^2}$, abgeleitet aus $E = mc^2$ und $E = h\nu$, dient als minimale Zeitskala, die Instantaneität einschränkt, wie durch die Energie-Zeit-Unschärfe bestätigt. Dies verbindet Relativitätstheorie, Quantenmechanik und die Feinstrukturkonstante auf natürliche Weise und bietet einen neuen Ansatz zur Vereinheitlichung dieser Theorien.

Diese Ideen sind spekulativ und erfordern weitere theoretische Ausarbeitung sowie experimentelle Überprüfung. Sie bieten jedoch einen interessanten Ausgangspunkt für Diskussionen über die Natur der Zeit in der Quantenphysik und könnten möglicherweise zu neuen Einsichten in die Verbindung zwischen Quantenmechanik und Relativitätstheorie führen.

Besonders vielversprechend erscheint die Möglichkeit, experimentelle Tests zu entwickeln, die zwischen der konventionellen Behandlung der Zeit und unserem masseabhängigen Ansatz unterscheiden können. Die vorhergesagten Unterschiede in Kohärenzzeiten, Dispersionsrelationen und der Dynamik verschränkter Systeme mit unterschiedlichen Massen könnten experimentell überprüfbare Signaturen liefern.

References

- [1] Einstein, A. (1905). Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Annalen der Physik*, 323(13), 639-641.
- [2] Planck, M. (1901). Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum. *Annalen der Physik*, 309(3), 553-563.
- [3] Schrödinger, E. (1926). An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules. *Physical Review*, 28(6), 1049-1070.
- [4] Sommerfeld, A. (1916). Zur Quantentheorie der Spektrallinien. *Annalen der Physik*, 356(17), 1-94.
- [5] Feynman, R. P. (1985). QED: The Strange Theory of Light and Matter. Princeton University Press.
- [6] Rovelli, C. (2018). The Order of Time. Riverhead Books.
- [7] Pascher, J. (2025). Fundamentale Konstanten und deren Herleitung aus natürlichen Einheiten.
- [8] Bell, J. S. (1964). On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. *Physics*, 1(3), 195-200.
- [9] Aspect, A., Dalibard, J., & Roger, G. (1982). Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers. *Physical Review Letters*, 49(25), 1804-1807.
- [10] Zeh, H. D. (1970). On the interpretation of measurement in quantum theory. *Foundations of Physics*, 1(1), 69-76.