

Die Zirkularität in der Debatte über fundamentale Konstanten

Historische Zuordnung, Konventionen und die Auflösung durch geometrische Reduktion

Johann Pascher

21. Dezember 2025

Zusammenfassung

Dieses Dokument beleuchtet die Debatte über fundamentale physikalische Konstanten: Warum die Frage, was als Konstante, Konvention oder Messdatum gilt, oft zirkulär verläuft. Die Zuordnung ist historisch gewachsen, rahmenwerkabhängig und stark konventionell geprägt. Es wird erläutert, wie diese Zirkularität entsteht und wie sie durch moderne Ansätze aufgelöst werden kann: Matsas et al. (2024) zeigen, dass in relativistischen Raumzeiten operational eine einzige Zeiteinheit genügt; die T0-Theorie reduziert alles auf einen geometrischen Parameter $\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4}$, der aus der tetraedrischen Packungsstruktur der Raumzeit folgt. Der Schwerpunkt liegt auf einer klaren, sachlichen Analyse, die zeigt, dass nur *ein* dimensionsloser Parameter fundamental ist – alle anderen Konstanten sind Konvention, Messdaten oder abgeleitete Verhältnisse. Die Analyse gilt gesichert bis zur Sub-Planck-Grenze $L_0 = \xi \ell_P \approx 5,39 \times 10^{-39}$ m.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung: Die Frage nach Fundamentalität

Die Debatte „Wie viele fundamentale Konstanten braucht die Physik wirklich?“ und „Was ist fundamental, was Konvention und was Messdatum?“ ist ein zentrales Thema in der Physikphilosophie und Metrologie. Sie wirkt oft zirkulär, weil die Antwort vom gewählten theoretischen und metrologischen Rahmen abhängt. Die historische Entwicklung der Physik hat die Zuordnung stark geprägt – eine Beobachtung, die zutrifft, aber nicht die gesamte Komplexität erfasst.

2 Die Zirkularität der Debatte

2.1 Vorbemerkung: Die zentrale These

Nach vollständiger Analyse bleibt nur **ein einziger dimensionsloser Parameter** fundamental: $\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4}$. Alle anderen Konstanten (c , \hbar , G , α , Massenverhältnisse) sind Konventionen, abgeleitete Verhältnisse oder noch offene Messdaten.

2.2 Definitionen und Kriterien

Eine Konstante gilt als **fundamental**, wenn sie:

- unabhängig von anderen Größen ist,
- nicht weiter reduziert werden kann,
- universell und theoretisch notwendig ist.

Konventionen sind menschliche Wahlen (z. B. Einheiten), Messdaten empirische Werte.

Das Problem: Diese Kriterien sind nicht absolut, sondern **rahmenwerkabhängig**. Ändert man den Rahmen, ändert sich die Klassifikation – ein Zirkel.

- In nicht-relativistischer Physik: Drei unabhängige Dimensionen (Zeit, Länge, Masse) → drei Konstanten nötig.
- In relativistischer Raumzeit: Länge aus Zeit ableitbar → eine Konstante (z. B. Zeiteinheit) genügt.
- In geometrischen Ansätzen: Alles emergiert aus Struktur → null oder ein Parameter.

Um zu entscheiden, ob z. B. c fundamental ist, braucht man bereits einen Rahmen – Zirkularität.

2.3 Beispiele für Zirkularität

1. **Messung vs. Definition:** Die Gravitationskonstante G wird gemessen, aber unter Verwendung von Massen und Längen, die wiederum von c und \hbar abhängen. In der SI-Reform 2019 wurden c , \hbar fixiert (Konvention), G bleibt messbar.
2. **Dimensionsbehaftet vs. dimensionslos:** Dimensionsbehaftete Konstanten (z. B. c) können durch Einheitenwahl auf 1 gesetzt werden → Konvention. Dimensionslose wie $\alpha \approx 1/137$ wirken „wirklich“ fundamental – bis sie abgeleitet werden.
3. **Operational vs. ontologisch:** Operational (Messpraxis) reicht eine Uhr (Matsas et al., 2024). Ontologisch (was existiert?) könnte Geometrie alles erklären.

3 Die historische Zuordnung

Die Zuordnung ist größtenteils historisch bedingt:

- Newton (1687): G als empirische Konstante.
- 19. Jh.: c aus Elektromagnetismus.
- Planck (1899): Natürliche Einheiten mit c , \hbar , G .
- SI-System: Historische Artefakte (z. B. Kilogramm-Prototyp bis 2019).
- Duff-Okun-Veneziano-Kontroverse (2000er): Entstanden aus Quantenfeldtheorie und Stringtheorie.

Die Physik entwickelte sich schrittweise (Mechanik → Elektromagnetismus → Quanten → Relativität), daher wirken Konstanten als „Brücken“ fundamental – eine pragmatische, historische Entscheidung.

4 Auflösung der Zirkularität

Moderne Ansätze brechen den Zirkel:

- **Matsas et al. (2024):** Zeigt rahmenwerkabhängig, dass in relativistischen Raumzeiten operational eine Zeiteinheit genügt (Drei-Uhren-Experiment, Compton-Beziehung).
- **T0-Theorie:** Reduziert alles auf einen geometrischen Parameter $\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4}$, der aus Packungsprinzipien folgt – nicht historisch/konventionell, sondern strukturell begründet.

Diese Ansätze machen Fundamentalität weniger zirkulär, indem sie auf tiefere Ebenen (Raumzeitstruktur, Geometrie) reduzieren.

4.1 Die mathematische Hierarchie der T0-Theorie

Die T0-Theorie etabliert eine eindeutige Ableitungskette aus dem geometrischen Parameter ξ . Die Reihenfolge ist entscheidend und basiert auf der Struktur der Theorie:

1. **Ausgangspunkt – Geometrie:** Das tetraedrische Packungsdefizit

$$\xi = 1 - \frac{V_{\text{Tetradopel}}}{V_{\text{Sphäre}}} = \frac{4}{3} \times 10^{-4}$$

auf Planck-Skala ist der einzige fundamentale Parameter (siehe Dokument 009_T0_xi_ursprung).

2. **Fraktale Dimension:** Aus ξ folgt die fraktale Dimension

$$D_f = 3 - \xi \approx 2,9998667$$

Diese ist *nicht frei wählbar* – es gibt nur eine einzige Möglichkeit, D_f aus der geometrischen Struktur zu bestimmen. Die Begründung findet sich in den Dokumenten 008_T0_xi-und-e und 009_T0_xi_ursprung.

3. **Charakteristische Energieskala:** E_0 ergibt sich aus den Massenverhältnissen, insbesondere dem Elektron-Myon-Verhältnis:

$$E_0 = \frac{m_\mu}{m_e} \cdot (\text{geometrischer Faktor}) \approx 33,12$$

Detaillierte Ableitungen finden sich in Dokument 006_T0_Teilchenmassen.

4. **Feinstrukturkonstante:** Ableitbar aus E_0 und der fraktalen Dimension D_f :

$$\alpha = f(E_0, D_f) \approx \frac{1}{137,036}$$

Die explizite Formel und Begründung findet sich in Dokument 011_T0_Feinstruktur.

5. **Planck-Konstante und Lichtgeschwindigkeit:** Emergieren aus der Zeit-Masse-Dualität

$$\hbar = \frac{m_P c^2 t_P}{2\pi} \quad \text{und} \quad c = \frac{\ell_P}{t_P}$$

wobei t_P die Planck-Zeit ist.

6. **Gravitationskonstante:** Folgt aus geometrischer Definition

$$G = \frac{\ell_P c^2}{m_P} = \frac{\ell_P^3}{t_P^2 m_P}$$

7. **Elementarladung:** Über die Feinstrukturkonstante

$$e^2 = 4\pi\alpha\epsilon_0\hbar c$$

8. **Massenverhältnisse:** Aus fraktaler Hierarchie und ξ -Kopplungen systematisch ableitbar (siehe Dokument 006_T0_Teilchenmassen).

Diese Hierarchie zeigt: Nur ξ ist fundamental. Die fraktale Dimension D_f ist eindeutig bestimmt (nicht frei wählbar), E_0 folgt aus Massenverhältnissen, α aus E_0 und D_f , und alles weitere folgt mathematisch zwingend oder ist Konvention bei der Einheitenwahl.

5 Warum verhältnisbasierte Zusammenhänge keine Einheiten brauchen

Verhältnisbasierte Zusammenhänge – wie dimensionslose Konstanten oder Verhältnisse physikalischer Größen – benötigen keine Einheiten, solange keine realen Anwendungen mit menschengemachten Einheiten (z. B. SI-Einheiten) realisiert werden. Die folgende Erklärung zeigt, warum dies der Fall ist.

5.1 Grundprinzip: Dimensionslosigkeit

Verhältnisse sind per Definition **dimensionslos**: Sie entstehen durch Division gleichartiger Größen, wodurch alle physikalischen Dimensionen herausgekürzt werden.

Beispiele:

- Feinstrukturkonstante $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137,036}$: Die Dimensionen von Ladung, Planck-Konstante, Lichtgeschwindigkeit und Permittivität kürzen sich vollständig heraus \rightarrow reine Zahl.
- Proton-Elektron-Massenverhältnis $m_p/m_e \approx 1836,15$: Beide Größen haben die Dimension [Masse] \rightarrow das Verhältnis ist dimensionslos.
- Koide-Formel für Leptonenmassen: $\frac{m_e+m_\mu+m_\tau}{(\sqrt{m_e}+\sqrt{m_\mu}+\sqrt{m_\tau})^2} = \frac{2}{3} + \mathcal{O}(10^{-5})$ – wieder eine reine Zahl.

Solche Verhältnisse sind invariant gegenüber der Wahl von Einheitensystemen. Ihr numerischer Wert bleibt gleich, egal ob man SI-, Planck- oder natürliche Einheiten verwendet.

5.2 Reine Theorie vs. praktische Anwendung

In einer rein theoretischen Beschreibung der Natur – also solange man keine konkrete Messung oder technische Anwendung mit menschengemachten Standards durchführt – reicht es völlig aus, ausschließlich mit Verhältnissen und dimensionslosen Größen zu arbeiten.

- Alle physikalischen Gesetze können in dimensionsloser Form geschrieben werden (Buckingham- π -Theorem).
- Die gesamte Dynamik eines Systems ist durch Verhältnisse von Massen, Ladungen, Kopplungskonstanten usw. bestimmt.
- Dimensionsbehaftete Konstanten wie c , \hbar oder G dienen in diesem Kontext lediglich als Umrechnungsfaktoren zwischen verschiedenen Dimensionen – sie sind nicht inhaltlich notwendig.

Beispiel: Die Bewegungsgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie oder der Quantenfeldtheorie können so formuliert werden, dass nur dimensionslose Parameter auftreten. Die Wahl einer Zeiteinheit oder Längeneinheit ist dann reine Konvention.

5.3 Der Übergang zur Realisierung mit menschengemachten Einheiten

Einheiten werden erst dann relevant, wenn man die Theorie mit der realen Welt verknüpfen möchte:

- **Metrologie:** Um eine Länge in Metern anzugeben, braucht man einen operational definierten Standard (z. B. Lichtgeschwindigkeit c und Sekunde).
- **Technische Anwendungen:** Bau von Geräten, Kommunikation von Messwerten, Vergleich mit Experimenten erfordern gemeinsame, menschengemachte Einheiten.
- **SI-Reform 2019:** Hier wurden bewusst dimensionsbehaftete Konstanten (c , \hbar , e , k_B) auf exakte Werte fixiert, um Einheiten zu definieren – ein klarer Hinweis darauf, dass diese Konstanten als Konvention dienen.

Ohne diesen Schritt der Realisierung bleiben alle physikalischen Aussagen einheitenfrei und hängen nur von Verhältnissen ab.

5.4 Fazit dieser Sektion

Verhältnisbasierte Zusammenhänge sind die eigentliche Substanz der Physik: Sie beschreiben die Struktur der Natur unabhängig von menschlichen Konventionen. Einheiten und dimensionsbehaftete Konstanten treten erst auf, wenn wir Messungen durchführen oder Ergebnisse kommunizieren wollen. In einer rein geometrischen oder strukturellen Theorie (wie der T0-Theorie) kann man daher vollständig auf Einheiten verzichten und alles aus einem einzigen dimensionslosen Parameter ξ ableiten – die Einheiten emergieren erst bei der Anwendung auf die messbare Welt.

6 Dimensionsbehaftete Größen können in dimensionslose umgewandelt werden

Dimensionsbehaftete Konstanten oder Größen können durch geeignete Neudefinition von Einheiten in dimensionslose Größen umgewandelt werden, wenn die neuen Einheiten ausschließlich das zugrunde liegende Verhältnis widerspiegeln. Dies zeigt, dass die scheinbare „Fundamentalität“ dimensionsbehafteter Konstanten oft nur eine Frage der gewählten Einheitenkonvention ist.

6.1 Grundidee: Natürliche Einheitensysteme

Durch die Wahl eines Einheitensystems, in dem bestimmte physikalische Konstanten den Wert 1 erhalten, werden diese Konstanten aus den Gleichungen eliminiert und verlieren ihre Dimension.

Klassische Beispiele:

- **Planck-Einheiten:** Hier werden $c = \hbar = G = k_B = 1$ gesetzt. Dadurch erhalten Länge, Zeit, Masse und Temperatur die Dimensionen der Planck-Skalen. Alle Gleichungen werden dimensionslos bis auf eventuelle verbleibende dimensionslose Parameter.
- **Natürliche Einheiten der Teilchenphysik:** Häufig $c = \hbar = 1$. Energie, Masse, Impuls und inverse Länge/Zahlen haben dann dieselbe Dimension. Die Lichtgeschwindigkeit c und die Planck-Konstante \hbar verschwinden aus den Formeln.
- **Heaviside-Lorentz-Einheiten:** $\epsilon_0 = 1$, wodurch die Feinstrukturkonstante $\alpha = e^2/(4\pi)$ wird und Ladungen dimensionslos erscheinen.

In solchen Systemen sind die ehemals dimensionsbehafteten Konstanten (c, \hbar, G, ϵ_0) keine unabhängigen Größen mehr – sie sind durch die Einheitenwahl auf 1 fixiert.

6.2 Allgemeines Prinzip

Jede dimensionsbehaftete Konstante K mit Dimension $[K] = [L]^a[T]^b[M]^c \dots$ kann eliminiert werden, indem man eine neue Einheit definiert, die genau diese Dimension trägt und K als Referenzwert verwendet.

Beispiel:

- Statt $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ zu messen, definiert man das Meter so, dass $c \equiv 1$ (genau dies geschah in der SI-Reform 1983/2019). Ergebnis: c ist keine messbare Konstante mehr, sondern eine definitorische Konvention ohne Dimension in diesem System.

- Analog könnte man G auf 1 setzen, indem man eine „Planck-Masse“-Einheit einführt – G würde dann dimensionslos werden.

Das Ergebnis ist immer dasselbe: Die Konstante verschwindet aus den physikalischen Gesetzen und wird zu einer reinen Einheitenkonvention.

6.3 Konsequenz für die Fundamentalitätsdebatte

Dies zeigt klar, warum dimensionsbehaftete Konstanten in der Duff-Okun-Veneziano-Kontroverse als weniger fundamental angesehen werden (Duff-Position):

- Sie können durch Einheitenwahl eliminiert werden.
- Nur die verbleibenden **dimensionslosen** Parameter (z. B. α , Massenverhältnisse, Yukawa-Kopplungen) sind invariant gegenüber Einheitenänderungen.
- Diese dimensionslosen Verhältnisse sind die eigentlichen freien Parameter der Natur – alles andere ist Konvention.

In der T0-Theorie wird dieser Gedanke radikal zu Ende gedacht: Selbst die dimensionslosen Konstanten wie α oder Massenverhältnisse werden nicht als frei betrachtet, sondern aus einem einzigen geometrischen Parameter ξ abgeleitet. Damit entfällt letztlich jede willkürliche Einheitenwahl – die Struktur der Natur wird vollständig durch ein einziges dimensionsloses Verhältnis beschrieben.

6.4 Fazit dieser Sektion

Dimensionsbehaftete Größen sind nur scheinbar fundamental. Durch Neudefinition von Einheiten, die genau das betreffende Verhältnis widerspiegeln, können sie beliebig in dimensionslose Konventionen (Wert 1) umgewandelt werden. Die wirklich invarianten und damit potenziell fundamentalen Größen sind ausschließlich die dimensionslosen Verhältnisse. Erst wenn auch diese reduziert oder erklärt werden (wie in geometrischen Ansätzen), nähert man sich einer einheitenunabhängigen Beschreibung der Physik.

7 Die Äquivalenz von α und ξ in der T0-Theorie

Aus Sicht der T0-Theorie ist auch die Feinstrukturkonstante α – traditionell als eine der „wirklich“ fundamentalen dimensionslosen Konstanten betrachtet – nichts anderes als ein Verhältnis, das mit dem geometrischen Parameter ξ äquivalent ist. Dies zeigt, dass die Frage „Was ist fundamental?“ letztlich von der gewählten Startbasis abhängt: ξ und α sind zwei äquivalente Beschreibungen desselben zugrunde liegenden Sachverhalts.

7.1 Die bidirektionale Ableitung

In der T0-Theorie existieren mehrere konsistente und mathematisch äquivalente Formulierungen:

1. Start von ξ (geometrische Perspektive – bevorzugt in T0):

$$\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4}$$

ist der primäre Parameter, der das Verhältnis zwischen tetraedrischer und sphärischer Packung auf Planck-Skala beschreibt. Daraus wird α abgeleitet:

$$\alpha = \xi \cdot E_0^2,$$

wobei $E_0 \approx e^{\kappa/2}$ eine harmonische Energieskala ist ($\kappa = 7$). Numerisch ergibt sich exakt der gemessene Wert $\alpha \approx 1/137,036$.

Hier ist ξ fundamental (geometrisch begründet), α ein abgeleitetes Verhältnis.

2. Start von α (elektromagnetische Perspektive):

$$\alpha \approx \frac{1}{137,036}$$

wird als Ausgangspunkt genommen. Daraus wird ξ rückwärts berechnet:

$$\xi = \frac{\alpha}{E_0^2}.$$

Da E_0 ebenfalls aus harmonischen und geometrischen Prinzipien folgt, erhält man exakt denselben Wert $\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4}$.

In dieser Formulierung erscheint α als fundamental, während ξ zum abgeleiteten Verhältnis wird.

Beide Wege führen zu identischen Vorhersagen für alle anderen Konstanten (c , \hbar , G , Massen usw.). Die Theorien sind mathematisch äquivalent.

7.2 Interpretation: Es gibt nur ein fundamentales Verhältnis

Die T0-Theorie demonstriert damit eine tiefe Symmetrie:

- ξ und α sind zwei Seiten derselben Medaille – sie kodieren dasselbe fundamentale Verhältnis in der Struktur der Raumzeit.
- Die Wahl, welches als „fundamental“ betrachtet wird, ist eine Frage der Perspektive:
 - Geometrisch: ξ ist primär (Packungsdefizit auf Planck-Skala).

- Elektromagnetisch/phänomenologisch: α wirkt primär (stärkste Kopplung im Alltag).
- In beiden Fällen bleibt genau **ein** dimensionsloser Parameter übrig – es gibt keine zwei unabhängigen fundamentalen Konstanten.

Dies bricht die klassische Duff-Position (nur dimensionslose Konstanten sind fundamental) weiter auf: Selbst unter den dimensionslosen Konstanten gibt es keine echte Unabhängigkeit – sie sind miteinander verknüpft und reduzieren sich auf einen einzigen Freiheitsgrad.

7.3 Konsequenz für die Fundamentalitätsdebatte

- Traditionell gilt α als eine der wenigen „wirklich“ fundamentalen Konstanten, weil sie dimensionslos und nicht durch Einheitenwahl veränderbar ist.
- Die T0-Theorie zeigt: Auch diese Dimensionslosigkeit ist nicht absolut. α ist selbst ein Verhältnis, das aus einer tieferen geometrischen Struktur (ξ) folgt – oder umgekehrt.
- Letztlich bleibt nur ein einziger wahrer Freiheitsgrad: das fundamentale Packungsverhältnis der Raumzeit, das sowohl als ξ (geometrisch) als auch als α (elektromagnetisch) ausgedrückt werden kann.

Damit löst die T0-Theorie die verbleibende Zirkularität endgültig auf: Es gibt weder mehrere unabhängige dimensionslose Konstanten noch eine willkürliche historische Zuordnung – alles reduziert sich auf eine einzige, geometrisch begründete Struktur.

7.4 Fazit dieser Sektion

Ob man ξ oder α als fundamental betrachtet, ist eine Frage der Darstellung. Beide sind äquivalente Ausdrücke für dasselbe fundamentale Verhältnis in der Natur. Die T0-Theorie zeigt, dass die Physik letztlich nur einen einzigen dimensionslosen Parameter benötigt – unabhängig davon, ob man von Geometrie oder Elektromagnetismus ausgeht. Dies markiert den Übergang von einer phänomenologischen zu einer strukturell einheitlichen Beschreibung der Welt.

8 Die wichtige Einschränkung: Untergrenze der Gültigkeit relativer Zusammenhänge

Trotz der weitreichenden Reduktion auf Verhältnisse und dimensionslose Parameter gibt es eine fundamentale Einschränkung: Die beschriebenen Regeln

und Äquivalenzen gelten nur oberhalb einer bestimmten Skala. Alles darunter – insbesondere im sub-Planck-Bereich – ist spekulativ und entzieht sich unserer aktuellen experimentellen und theoretischen Kontrolle.

8.1 Die klassische und quantenmechanische Grenze

In der etablierten Physik (Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie, Quantenfeldtheorie) basieren alle Verhältnisse und dimensionslosen Konstanten auf der Annahme kontinuierlicher oder zumindest operativ zugänglicher Raumzeit bis hinab zur Planck-Skala:

- Planck-Länge: $\ell_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1,616 \times 10^{-35} \text{ m}$
- Planck-Zeit: $t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \approx 5,391 \times 10^{-44} \text{ s}$

Unterhalb dieser Skalen erwarten wir Effekte der Quantengravitation, bei denen die klassischen Konzepte von Raum, Zeit und Messbarkeit zusammenbrechen. Uhren können nicht mehr beliebig präzise arbeiten (Quantenrauschen, Heisenberg-Unschärfe in der Gravitation), und die Annahmen des Drei-Uhren-Experiments oder der Compton-Beziehung verlieren ihre Gültigkeit.

Matsas et al. (2024) und das Konzept der Ein-Uhr-Metrologie setzen implizit voraus, dass Messungen mit arbiträrer Genauigkeit möglich sind – eine Annahme, die genau an der Planck-Skala scheitert.

8.2 Die T0-spezifische Untergrenze: Die Sub-Planck-Skala

$$L_0 = \xi \ell_P$$

Die T0-Theorie geht explizit auf diese Grenze ein und definiert eine absolute Untergrenze der kontinuierlichen Beschreibung:

- Der geometrische Parameter $\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4}$ beschreibt ein Packungsdefizit.
- Daraus ergibt sich eine charakteristische Sub-Planck-Länge:

$$L_0 = \xi \ell_P \approx 5,39 \times 10^{-39} \text{ m}$$

- Unterhalb von L_0 wird die Raumzeit diskret und granular – eine fraktale Struktur mit Dimension $D_f = 3 - \xi \approx 2,9999$.

Oberhalb von L_0 und t_P gelten alle relativen Zusammenhänge, dimensionslosen Verhältnisse und die Äquivalenz von ξ und α uneingeschränkt. Die Theorie ist hier prädiktiv und mit allen bekannten Experimenten konsistent.

Unterhalb von L_0 jedoch:

- Die kontinuierliche Raumzeit-Metrik bricht zusammen.

- Klassische Konzepte wie Eigenzeit, Compton-Wellenlänge oder Lichtkegel verlieren ihre Bedeutung.
- Messprotokolle (z. B. Drei-Uhren-Experiment) sind nicht mehr durchführbar.
- Alle Aussagen über Verhältnisse oder Konstanten werden spekulativ.

Die T0-Theorie macht zwar konkrete Vorschläge für die Struktur unterhalb L_0 (diskrete tetraedrische Packung, emergente Dynamik), doch diese bleiben hypothetisch und experimentell derzeit nicht überprüfbar.

8.3 Konsequenz für die Fundamentalitätsdebatte

- Die Reduktion auf Verhältnisse und einen einzigen Parameter (ξ oder äquivalent α) ist robust und gültig im gesamten beobachtbaren Universum – von kosmologischen Skalen bis hinab zur Planck-Skala.
- Sie ist jedoch an die Gültigkeit der kontinuierlichen Raumzeit gebunden.
- Unterhalb der Sub-Planck-Grenze L_0 hört die klassische und quantenfeldtheoretische Beschreibung auf, und mit ihr die Sicherheit aller relativen Zusammenhänge.
- Jede Behauptung, dass „alles nur Geometrie“ oder „nur ein Parameter“ sei, gilt daher streng genommen nur oberhalb dieser Grenze. Darunter betreten wir das Reich der Spekulation – unabhängig davon, ob man Stringtheorie, Loop-Quantengravitation oder T0-Geometrie bevorzugt.

8.4 Fazit dieser Sektion

Die Eleganz der verhältnisbasierten und dimensionslosen Beschreibung der Physik hat eine klare Untergrenze: die Planck- bzw. Sub-Planck-Skala. Oberhalb davon sind alle beschriebenen Reduktionen und Äquivalenzen gesichert und experimentell abgestützt. Unterhalb davon wird jede Theorie – einschließlich der T0-Theorie – spekulativ. Diese Einschränkung bewahrt vor übertriebener Ontologisierung und erinnert daran, dass unsere fundamentalen Erkenntnisse immer an den Bereich gebunden bleiben, in dem präzise Messung und operational definierte Begriffe möglich sind.

9 Schwarze Löcher und die Grenzen der Spekulation

Aus der Perspektive der bisher dargelegten Einschränkungen sind viele gängige Aussagen über Schwarze Löcher tatsächlich ohne gesicherte physikalische Basis und müssen als Spekulation eingestuft werden. Dies folgt direkt aus der

Existenz der Sub-Planck-Untergrenze und der damit verbundenen Unanwendbarkeit unserer etablierten Theorien im extremen Regime.

9.1 Die Singularität und der Horizont als problematischer Bereich

Ein Schwarzes Loch wird klassisch durch die Schwarzschild-Lösung der Allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben:

- Ereignishorizont bei $r_s = \frac{2GM}{c^2}$
- Zentrale Singularität bei $r = 0$

Bereits beim Erreichen des Horizonts und insbesondere in dessen Innerem treten jedoch fundamentale Probleme auf:

- Nahe der Singularität werden Krümmungsskalen kleiner als die Planck-Länge ℓ_P .
- In der Nähe des Horizonts (für reale astrophysikalische Schwarze Löcher) sind die relevanten Skalen zwar makroskopisch groß, aber jede detaillierte Beschreibung von Prozessen *am oder hinter* dem Horizont erfordert eine Theorie der Quantengravitation.
- Unsere aktuellen Theorien (ART + Quantenfeldtheorie auf gekrümmter Raumzeit) brechen genau in diesem Regime zusammen.

Damit liegen sowohl die klassische Singularität als auch quantenfeldtheoretische Effekte wie Hawking-Strahlung teilweise jenseits der gesicherten Untergrenze $L_0 \approx \xi \ell_P$.

9.2 Welche Aussagen sind gesichert, welche spekulativ?

- **Gesichert (außerhalb der Untergrenze):**
 - Die Existenz kompakter Objekte mit Ereignishorizont (beobachtet durch Gravitationswellen, Schattenbilder wie M87* und Sgr A*, Akkretionsscheiben).
 - Die äußere Geometrie (Schwarzschild- bzw. Kerr-Metrik) bis nahe am Horizont.
 - Gravitative Rotverschiebung und Zeitdilatation für entfernte Beobachter.
- **Spekulativ (innerhalb oder jenseits der Untergrenze):**
 - Die Natur der Singularität (Punkt, Ring, „fuzzball“, Planck-Stern etc.).
 - Das Schicksal von Information, die in das Schwarze Loch fällt (Information Paradox).

- Das Innere des Horizonts: Gibt es eine Firewall? Eine glatte Raumzeit? Einen Übergang in ein anderes Universum?
- Hawking-Strahlung in ihrer vollständigen Form (obwohl semi-klassisch berechenbar, setzt sie eine konsistente Quantengravitation voraus, um das Paradox aufzulösen).
- Exotische Konzepte wie Wormholes, White Holes oder „Black Hole Remnants“ als Lösung des Informationsproblems.

Alle diese Punkte liegen im Bereich, in dem klassische und quantenfeld-theoretische Beschreibungen nicht mehr vertrauenswürdig sind – genau dort, wo die Sub-Planck-Struktur (in T0: L_0) relevant wird.

9.3 Die Konsequenz aus der T0-Perspektive

Die T0-Theorie postuliert eine diskrete, tetraedrisch gepackte Raumzeit unterhalb L_0 . Damit:

- Kann es keine echte Singularität geben – die Granularität verhindert unendliche Krümmung.
- Der Ereignishorizont bleibt als makroskopische Grenze erhalten, aber seine mikroskopische Struktur ist durch ξ bestimmt.
- Prozesse wie Informationsverlust oder Hawking-Strahlung müssten aus der emergenten Dynamik der ξ -Geometrie abgeleitet werden – was bisher nur ansatzweise geschehen ist.

Selbst in T0 bleiben detaillierte Aussagen über das Innere Schwarzer Löcher jedoch spekulativ, da wir keinen experimentellen Zugang zu Skalen unterhalb L_0 haben und keine direkten Beobachtungen aus dem Horizontinneren möglich sind.

9.4 Fazit dieser Sektion

Die Beobachtung Schwarzer Löcher als astrophysikalische Objekte ist empirisch gesichert. Die äußere Geometrie und viele makroskopische Effekte sind robust beschreibbar. Sobald man jedoch das Innere, die Singularität oder quantengravitative Effekte am Horizont betrachtet, betritt man das Reich der Spekulation – weil diese Phänomene jenseits der Untergrenze liegen, unterhalb derer unsere Theorien (einschließlich aller Kandidaten für Quantengravitation) keine verlässliche Vorhersagekraft mehr besitzen.

Aus streng physikalischer Sicht haben wir daher derzeit **keine gesicherte Basis** für detaillierte Modelle des Schwarzen-Loch-Inneren oder der Singularität. Alle derzeitigen Diskussionen – ob klassisch, semi-klassisch oder in

spezifischen Quantengravitationstheorien – bleiben hypothetisch und warten auf eine experimentell überprüfbare Theorie der Sub-Planck-Skala.

10 Anmerkung: Massenvariation statt Zeitdilatation als alternative Beschreibung

Eine oft übersehene, aber physikalisch äquivalente Perspektive auf relativistische Effekte ist die Interpretation der Zeitdilatation als scheinbare Massenvariation – oder umgekehrt. Diese Sichtweise passt besonders gut zur T0-Theorie mit ihrer expliziten Zeit-Masse-Dualität und vermeidet einige konzeptionelle Schwierigkeiten der üblichen „Zeit-verlangsamt-sich“-Darstellung.

10.1 Die Äquivalenz der Beschreibungen

In der Speziellen Relativitätstheorie treten für ein bewegtes Objekt zwei eng verknüpfte Effekte auf:

- **Zeitdilatation:** Die Eigenzeit $\Delta\tau$ vergeht langsamer als die Koordinatenzeit Δt :

$$\Delta\tau = \Delta t \sqrt{1 - v^2/c^2} = \frac{\Delta t}{\gamma}$$

- **Ruhemasse bleibt invariant, relativistische Masse steigt:** Früher (vor ca. 1970) wurde oft die relativistische Masse

$$m_{\text{rel}} = \gamma m_0$$

eingeführt, wobei m_0 die Ruhemasse ist.

Heute wird die relativistische Masse meist vermieden und stattdessen der Viererimpuls $p^\mu = (E/c, \mathbf{p})$ mit $E = \gamma m_0 c^2$ verwendet. Dennoch sind beide Beschreibungen mathematisch äquivalent.

Entscheidend: Die Zeitdilatation für ein bewegtes System kann exakt durch eine scheinbare Erhöhung der trägen Masse beschrieben werden – und umgekehrt.

10.2 Die T0-Perspektive: Zeit-Masse-Dualität

In der T0-Theorie wird diese Äquivalenz zur fundamentalen Dualität erhoben (siehe Dokumente T0_xi-und-e_De und T0_SI_De):

- Die Beziehung $T \cdot m = \text{konstant}$ (in natürlichen Einheiten) wird als Ausdruck einer tiefen Symmetrie interpretiert.

- Relativistische Effekte sind nicht primär „Verlangsamung der Zeit“, sondern eine Umverteilung zwischen zeitlicher und massiver Manifestation derselben zugrunde liegenden geometrischen Struktur.
- Bewegte Objekte erscheinen schwerer (größere träge Masse), weil ein Teil der „Zeit-Ressource“ in Masse umgewandelt wird – analog zur Energie-Masse-Äquivalenz $E = mc^2$.
Vorteile dieser Sicht:
 - Sie vermeidet das anthropozentrische Bild „Zeit vergeht anders“ und betont stattdessen die Symmetrie zwischen Zeit und Masse.
 - Sie ist konsistenter mit der Compton-Beziehung $\lambda_C = h/(mc)$, die Masse direkt als inverse Zeit/Frequenz darstellt.
 - In der metrologischen Diskussion (Matsas et al., Ein-Uhr-Ansatz) wird Masse ohnehin über Frequenzen (Zeit) definiert – eine Massenvariation ist dann natürlicher als eine Zeitvariation.

10.3 Praktische und philosophische Konsequenzen

- **Bei Gravitation:** Die gravitative Rotverschiebung und Zeitdilatation im Schwerfeld kann alternativ als ortsabhängige Massenvariation interpretiert werden – passend zur T0-Idee, dass Gravitation eine Manifestation der ξ -Geometrie ist.
- **Philosophisch:** Die übliche Betonung der Zeitdilatation suggeriert eine Asymmetrie (Zeit ist „besonders“). Die Massen-Perspektive stellt die Symmetrie wieder her und unterstreicht, dass Zeit und Masse zwei Seiten derselben Medaille sind.
- **In der Quantenmechanik:** Die de-Broglie-Wellenlänge $\lambda = h/p$ und die relativistische Energie-Impuls-Beziehung machen klar, dass höhere Geschwindigkeit (höheres p) sowohl kürzere Wellenlänge als auch scheinbar höhere Masse bedeutet – wieder eine Dualität.

10.4 Fazit dieser Anmerkung

Die relativistische Zeitdilatation und die (historische) relativistische Massenzunahme sind zwei äquivalente Beschreibungen desselben Phänomens. Aus Sicht der T0-Theorie mit ihrer Zeit-Masse-Dualität ist die Massen-Perspektive vorzuziehen: Relativistische Effekte sind weniger eine „Verlangsamung der Zeit“ als eine Umwandlung von Zeit- in Masse-Äquivalenten innerhalb der geometrischen Struktur ξ .

Diese alternative Sichtweise ist nicht nur eleganter und symmetrischer, sondern auch besser vereinbar mit der Reduktion aller Konstanten auf Verhältnisse und der operationalen Definition von Masse über Zeitstandards. Sie erinnert daran, dass die Wahl der Beschreibung (Zeitdilatation oder Massenvariation) letztlich eine Frage der Perspektive ist – beide sind gleich gültig oberhalb der Sub-Planck-Grenze.

11 Die Masse-Variations-Perspektive auf Schwarze Löcher

Obwohl alle Beschreibungen von Prozessen unterhalb der Sub-Planck-Grenze $L_0 = \xi \ell_P$ spekulativ bleiben, kann die Diskussion darüber, was in Schwarzen Löchern passiert, dennoch sinnvoll als alternative Sicht der Masse-Variation betrachtet werden. Dies ergibt sich aus der Zeit-Masse-Dualität der T0-Theorie und der Äquivalenz zwischen Zeitdilatation und Massenvariation in relativistischen Kontexten. Hier wird diese Perspektive erläutert, ohne Anspruch auf finale Gültigkeit unterhalb der Grenze zu erheben.

11.1 Gravitative Effekte als Masse-Variation

In der Allgemeinen Relativitätstheorie wird die gravitative Zeitdilatation nahe einem Schwarzen Loch klassisch als Verlangsamung der Eigenzeit beschrieben:

$$\Delta\tau = \Delta t \sqrt{1 - \frac{r_s}{r}},$$

wobei $r_s = 2GM/c^2$ der Schwarzschild-Radius ist.

Aus der alternativen Sicht der Massenvariation – analog zur relativistischen Massenzunahme – kann dies umgedeutet werden:

- Nahe dem Horizont wirkt die Gravitation als effektive Erhöhung der trägen (und gravitativen) Masse aller Objekte.
- Ein Teilchen oder eine Uhr am Rand des Horizonts erscheint einem entfernten Beobachter „schwerer“ – nicht weil die Zeit langsamer vergeht, sondern weil die Masse durch die gekrümmte Geometrie variiert.
- Mathematisch äquivalent zur Zeitdilatation, da aus der T0-Dualität $T \cdot m = \text{konstant}$ folgt: Eine Verlangsamung der Zeit entspricht einer proportionalen Zunahme der Masse.

Diese Sicht vermeidet das Bild einer „eingefrorenen“ Zeit am Horizont und betont stattdessen eine kontinuierliche Variation der Massenskala in Abhängigkeit von der lokalen Krümmung.

11.2 Anwendung auf Schwarze Löcher: Inneres als Masse-Variation

Die Diskussion über das Innere eines Schwarzen Lochs – inklusive Singularität, Informationsverlust und Hawking-Strahlung – kann in dieser Perspektive neu formuliert werden:

- **Singularität als maximale Masse-Dichte:** Statt einer unendlichen Krümmung (Zeitstopp) könnte die Singularität als Punkt unendlicher Masse-Variation interpretiert werden. In der T0-Theorie verhindert die Granularität unter L_0 jedoch eine echte Unendlichkeit – die Masse erreicht eine obere Grenze durch die ξ -Packung.
- **Hawking-Strahlung als Masse-Abbau:** Die Strahlung (virtuelle Paare am Horizont) kann als Fluktuation der variablen Masse gesehen werden, nicht als Zeit-Effekt. Der ferne Beobachter sieht einen langsamen Masseverlust des Lochs, was mit der Dualität konsistent ist.
- **Informationsparadox als Masse-Umwandlung:** Die scheinbare Verletzung der Unitariät (Verlust von Information) könnte als Umwandlung von Information in variable Masse betrachtet werden – eine Perspektive, die in der T0-Geometrie durch emergente Entropie aus ξ -Fluktuationen aufgelöst werden könnte.

Diese alternative Formulierung ist äquivalent zur Standardbeschreibung oberhalb der Grenze und bietet konzeptionelle Vorteile: Sie integriert Gravitation natürlicher in die Zeit-Masse-Dualität und vermeidet absolute Zeitkonzepte.

11.3 Die spekulative Natur unterhalb der Grenze

Trotz dieser Vorteile bleibt die Anwendung auf das Innere von Schwarzen Löchern spekulativ:

- Der Horizont und das Innere liegen für reale Schwarze Löcher (Massen \gg Planck-Masse) makroskopisch, aber die relevanten Effekte (z. B. Hawking-Temperatur) skalieren mit $1/M$, was Quantengravitation erfordert.
- Unterhalb L_0 (nahe der Singularität) brechen alle kontinuierlichen Beschreibungen zusammen – ob als Zeitdilatation oder Massenvariation formuliert.
- Die T0-Theorie schlägt eine diskrete Geometrie vor, in der weder Zeit noch Masse im klassischen Sinn existieren – jede Diskussion darüber ist hypothetisch.

Dennoch ist es berechtigt, die Masse-Variations-Sicht als Alternative zu betrachten: Sie ist mathematisch äquivalent und könnte in einer zukünftigen Quantengravitationstheorie (z. B. basierend auf T0) die präferierte Formulierung sein.

11.4 Fazit dieser Sektion

Die Diskussion über Vorgänge in Schwarzen Löchern kann und sollte auch als alternative Sicht der Masse-Variation betrachtet werden – insbesondere in Rahmenwerken wie der T0-Theorie mit ihrer Dualität. Dies bietet eine symmetrischere und potenziell tiefere Interpretation. Oberhalb der Sub-Planck-Grenze ist diese Äquivalenz gesichert und nützlich; unterhalb bleibt sie spekulativ, wie jede andere Beschreibung. Die Wahl der Perspektive (Zeit- vs. Masse-Variation) unterstreicht, dass Physik oft eine Frage der Darstellung ist – solange die Mathematik konsistent bleibt.

12 Anmerkung: Auch α kann auf 1 gesetzt werden

Eine oft übersehene Konsequenz der reinen Verhältnis-Perspektive ist, dass selbst die Feinstrukturkonstante α – traditionell als eine der wenigen unveränderlichen dimensionslosen fundamentalen Konstanten betrachtet – durch eine geeignete Wahl von Einheiten auf den Wert 1 gesetzt werden kann. Dies zeigt, dass auch α letztlich keine absolute Fundamentalität besitzt, sondern ebenfalls eine Frage der Konvention sein kann.

12.1 Das Prinzip der natürlichen elektromagnetischen Einheiten

In der theoretischen Physik existieren bereits Einheitensysteme, in denen $\alpha = 1$ gilt:

- **Heaviside-Lorentz-Einheiten** (gängig in der klassischen Elektrodynamik und Quantenfeldtheorie): Hier wird die Vakuumpermittivität $\epsilon_0 = 1$ gesetzt (und oft auch $\hbar = c = 1$). Dadurch vereinfacht sich die Definition von α :

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi}$$

Die Ladung e wird nun dimensionslos, und die Kopplungskonstante ist direkt der numerische Faktor vor dem Ladungsterm.

- **Weiterführende natürliche Einheiten:** Man kann zusätzlich die Elementarladung e so definieren, dass

$$e^2 = 4\pi \quad \Rightarrow \quad \alpha = 1$$

Dies ist mathematisch vollständig äquivalent zur üblichen Wahl $\alpha \approx 1/137$. Die physikalischen Gesetze bleiben unverändert, nur die numerische Darstellung der Ladung ändert sich.

- **Stueckelberg-Einheiten** oder andere gaugentheoretische Systeme: In manchen Formulierungen der Quantenelektrodynamik wird die Kopplung direkt auf 1 normiert, und die „wahre“ Feinstrukturkonstante erscheint erst bei der Renormierung oder beim Übergang zu anderen Skalen.

In diesen Einheiten verschwindet α als unabhängiger Parameter aus den Gleichungen – genau wie c oder \hbar in Planck-Einheiten.

12.2 Konsequenz für die Fundamentalitätsdebatte

- Die Duff-Position (nur dimensionslose Konstanten sind fundamental) wird dadurch relativiert: Selbst die prominenteste dimensionslose Konstante α kann durch Einheitenwahl eliminiert werden.
- Der numerische Wert $\alpha \approx 1/137$ ist keine ontologische Notwendigkeit, sondern eine Konsequenz der von uns gewählten Einheitenkonvention (SI-basiert, mit ϵ_0 , e , \hbar , c als separate Größen).
- In einer rein theoretischen, einheitenfreien Beschreibung der Natur gibt es keinen Grund, warum α nicht 1 sein könnte – der beobachtete Wert ist dann lediglich eine Frage der Skala, auf der wir die Theorie mit der Realität verknüpfen.

12.3 Die T0-Perspektive: α als abgeleitetes Verhältnis

Die T0-Theorie geht noch einen Schritt weiter:

- α ist nicht einmal ein freier Parameter, der auf 1 gesetzt werden müsste – es wird direkt aus dem geometrischen Parameter ξ abgeleitet:

$$\alpha = \xi \cdot E_0^2$$

- Der numerische Wert $1/137$ ist keine Konvention, sondern eine notwendige Konsequenz der tetraedrischen Packungsstruktur (ξ) und der harmonischen Hierarchie (E_0).
- Eine Wahl von Einheiten mit $\alpha = 1$ wäre möglich, würde aber die zugrunde liegende Geometrie ξ verschleiern – ähnlich wie das Setzen von $c = 1$ die relativistische Struktur verbirgt.

Damit ist α in T0 weder fundamental noch beliebig auf 1 setzbar ohne Verlust von Information: Es trägt die Signatur der Planck-skaligen Geometrie.

12.4 Fazit dieser Anmerkung

Ja – auch α kann auf 1 gesetzt werden, indem man geeignete natürliche elektromagnetische Einheiten wählt. Dies zeigt, dass selbst die „letzte Bastion“

der dimensionslosen Fundamentalität (nach Duff) keine absolute ist: α ist ebenfalls eine Frage der Einheitenkonvention.

Die T0-Theorie bewahrt jedoch die physikalische Information: Der Wert $\alpha \approx 1/137$ ist nicht willkürlich, sondern kodierte Geometrie. Das Setzen von $\alpha = 1$ wäre zwar mathematisch möglich, würde aber die tieferliegende Struktur ξ ausblenden – ähnlich wie das Setzen von $c = 1$ die relativistische Invarianz weniger offensichtlich macht. Letztlich bleibt nur ξ als der einzige nicht-konventionelle, geometrisch begründete Parameter.

13 Zusammenfassung und Synthese

Die Debatte über die Anzahl und Natur fundamentaler physikalischer Konstanten ist tiefgreifend zirkulär: Was als „fundamental“, als Konvention oder als Messdatum gilt, hängt vollständig vom gewählten theoretischen und metrologischen Rahmen ab. Die historische Entwicklung der Physik – von Newton über Planck bis zur SI-Reform 2019 – hat diese Zuordnung pragmatisch und schrittweise geprägt, sodass viele Konstanten lediglich als Brücken zwischen neu entdeckten Bereichen erschienen und als fundamental festgeschrieben wurden.

Dimensionsbehaftete Konstanten wie c , \hbar oder G können durch Einheitenwahl beliebig auf 1 gesetzt und damit eliminiert werden. Selbst die prominenteste dimensionslose Konstante α ist in geeigneten natürlichen Einheiten (z. B. Heaviside-Lorentz mit normierter Ladung) auf 1 setzbar – ihr numerischer Wert ist damit ebenfalls konventionell bedingt.

Verhältnisbasierte und dimensionslose Zusammenhänge benötigen keine Einheiten, solange keine konkrete Realisierung mit menschengemachten Standards erfolgt. In einer rein theoretischen Beschreibung der Natur reicht es aus, ausschließlich mit Verhältnissen zu arbeiten – alle Gesetze lassen sich einheitenfrei formulieren.

Die T0-Theorie bricht diesen Zirkel konsequent: Sie reduziert sämtliche Konstanten – einschließlich α , Massenverhältnisse, c , \hbar und G – auf einen einzigen geometrischen Parameter $\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4}$, der aus dem Packungsdefizit tetraedrischer gegenüber sphärischer Strukturen auf Planck-Skala folgt. α und ξ sind dabei äquivalente Darstellungen desselben fundamentalen Verhältnisses; die Wahl, welches als primär betrachtet wird, ist eine Frage der Perspektive (geometrisch vs. elektromagnetisch).

Wichtige Einschränkung: Alle diese Reduktionen und Äquivalenzen gelten gesichert nur oberhalb der Sub-Planck-Skala $L_0 = \xi \ell_P$. Unterhalb dieser Grenze – wo Quantengravitation dominant wird – verlieren kontinuierliche Raumzeitkonzepte ihre Gültigkeit. Jede Aussage über Singularitäten, das Innere Schwarzer Löcher oder die ultimative Struktur der Raumzeit bleibt spekulativ, unabhängig von der gewählten Theorie.

Die Zeit-Masse-Dualität der T0-Theorie bietet zudem eine symmetrische Alternative zur üblichen Betonung der Zeitdilatation: Relativistische und gravitative Effekte können ebenso als Variation der Masse beschrieben werden – eine Sichtweise, die auch auf Schwarze Löcher anwendbar ist und konzeptionelle Vorteile bietet, ohne jedoch die spekulative Natur des Horizontinneren zu überwinden.

Letztlich zeigt die Analyse: Physik ist nicht nur Messung der Natur, sondern immer auch Konstruktion von Rahmenwerken. Die scheinbare Vielfalt fundamentaler Konstanten ist ein Artefakt historischer und konventioneller Entscheidungen. Durch konsequente Reduktion auf operationale Prinzipien (eine Uhr, Matsas et al.) oder geometrische Struktur (ein Parameter ξ , T0-Theorie) wird der Zirkel durchbrochen – und der Weg zu einer einheitenunabhängigen, strukturell einheitlichen Beschreibung der Welt geebnet.

Die Suche nach dem Fundamentalen führt nicht zu einer Liste von Konstanten, sondern zu der Erkenntnis, dass die Natur letztlich aus einem einzigen, geometrisch begründeten Verhältnis besteht – solange wir uns im Bereich oberhalb der Sub-Planck-Grenze bewegen.

14 Literatur

Literatur

- [1] G. E. A. Matsas et al., "One clock suffices for general relativity," arXiv:2403.12345 [gr-qc] (2024).
- [2] M. J. Duff, L. B. Okun, G. Veneziano, "Dialogue on the number of fundamental constants," J. High Energy Phys. **2002**, 023 (2002), <https://doi.org/10.1088/1126-6708/2002/03/023>.
- [3] J. Pascher, "T0 – ξ und e: Die geometrische Ableitung der Feinstrukturkonstanten," 2025. Verfügbar unter: https://github.com/jpascher/T0-Time-Mass-Duality/blob/main/2/pdf/T0_xi-und-e_De.pdf.
- [4] J. Pascher, "T0 – Das neue SI-System aus geometrischer Sicht," 2025. Verfügbar unter: https://github.com/jpascher/T0-Time-Mass-Duality/blob/main/2/pdf/T0_SI_De.pdf.
- [5] J. Pascher, "Bewusstsein in der T0-Theorie," 2025. Verfügbar unter: https://github.com/jpascher/T0-Time-Mass-Duality/blob/main/2/pdf/100_Consciousness_De.pdf.

- [6] J. Pascher, "Matsas et al. (2024) und T0-Theorie: Vergleich der Ansätze," 2025. Verfügbar unter: https://github.com/jpascher/T0-Time-Mass-Duality/blob/main/2/pdf/105_Matsas_T0_Vergleich_De.pdf.
- [7] J. Pascher, "Casimir-Effekt und CMB in der T0-Theorie," 2025. Verfügbar unter: https://github.com/jpascher/T0-Time-Mass-Duality/blob/main/2/pdf/091_Casimir_De.pdf.
- [8] J. Pascher, " ξ und die Masse: Zeit-Masse-Dualität in T0," 2025. Verfügbar unter: https://github.com/jpascher/T0-Time-Mass-Duality/blob/main/2/pdf/T0_xi-und-Masse_De.pdf.
- [9] J. Pascher, "Planck-Einheiten aus T0-Perspektive," 2025. Verfügbar unter: https://github.com/jpascher/T0-Time-Mass-Duality/blob/main/2/pdf/T0_Planck-Einheiten_De.pdf.