Gott würfelt nicht – Zeit-Masse-Dualität und ξ

Kernstruktur der Fundamental Fractal-Geometric Field Theory

Johann Pascher

20. Januar 2026

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Eine Zahl, die alles steuert: Die Zeit-Masse-Dualität

Motivation

Stellen Sie sich vor, die gesamte Physik – von Elementarteilchen bis zum Kosmos – ließe sich auf eine einzige dimensionslose Zahl reduzieren. Nicht 19 freie Parameter wie im Standardmodell, keine willkürlich eingesetzten Kopplungskonstanten, sondern ein geometrischer Kernparameter. Diese Zahl nennen wir in der FFGFT (früher T0-Theorie) *xi*:

$$\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4}. \tag{1.1}$$

Sie ist der Dreh- und Angelpunkt der **Zeit-Masse-Dualität**: Masse ist in dieser Sicht nichts anderes als verdichtete, lokal gebremste Zeit. Je größer die effektive Masse in einer Region, desto "dichter" ist die Zeit dort – ein Motiv, das sich später in Quantenmechanik, Feldtheorie und Kosmologie wiederfindet.

Von Anfang an ist dabei ein ontologischer Vorbehalt wichtig: Alle Experimente vergleichen letztlich Frequenzen oder Zählraten und liefern damit nur *relative* Aussagen; es gibt keine Messung – und wird auch nie eine geben –, die auch prinzipiell eindeutig entscheiden könnte, ob sich "wirklich"die Zeit verlangsamt, die Masse zunimmt oder die Geometrie sich ändert, denn jeder Detektor ist selbst Teil derselben relationalen Struktur. Für die FFGFT bedeutet dies: Sie wird ausdrücklich als Modell verstanden – als bestimmte Art, diese relativen Relationen zu organisieren – und entscheidend ist nicht eine metaphysische Wahl zwischen Bildern, sondern dass die auf $T(x) \cdot m(x) = 1$ basierende mathematische Struktur konsistent ist und alle beobachtbaren Relationen (Frequenzen, Skalen, Verhältnisse) reproduziert; darüber hinaus bleibt die Frage, "was sich wirklich ändert", bewusst offen. Insbesondere ließe sich selbst die RT prinzipiell so umformulieren, dass man die Massen streng invariant hält und alle Änderung der Geometrie zuschreibt – oder umgekehrt eine Beschreibung wählt, in der die Zeitentwicklung als konstant gesetzt und die Massen variabel sind; die FFGFT macht transparent, dass solche ontologischen Entscheidungen Konventionen über derselben Menge relationaler Daten sind.

Im Vergleich zur Allgemeinen Relativitätstheorie (RT) bedeutet dies eine Neuordnung der Rollen: In der RT bleiben die Ruhmassen fest und die Gravitation wird vollständig in die Krümmung einer glatten 4D-Raumzeit gelegt, während in der FFGFT die effektive Masse $m(x)$ variabel ist und ein Teil dessen, was man sonst der Krümmung zuschreibt, in das Zeitfeld und seine fraktale Tiefenstruktur wandert. Aus dieser Perspektive werden RT und bekannte Feldtheorien als vereinfachte Unterbereiche bzw. Grenzfälle einer erweiterten Formulierung gelesen; die FFGFT wird als notwendige Erweiterung eingeführt, die dort eine vollständigere und innerlich konsistentere Berechnung ermöglicht, wo die vereinfachten Formulierungen an ihre konzeptionellen Grenzen stoßen.

1.1 Fraktale Raumzeit und effektive Dimension

Die FFGFT postuliert, dass die Raumzeit auf kleinsten Skalen nicht exakt dreidimensional ist, sondern eine leicht fraktale Struktur besitzt. Diese lässt sich durch eine effektive fraktale Dimension beschreiben:

$$D_f = 3 - \xi \approx 2{,}999867. \tag{1.2}$$

Im Alltag bemerken wir davon nichts – alle Experimente sind mit einer glatten 3D-Geometrie verträglich. Doch im Grenzbereich zwischen Planckskala und Teilchenphysik genügt der winzige Versatz von $3 - D_f = \xi$, um Divergenzen zu regulieren und neue Stabilitätsbedingungen einzuführen.

1.1.1 Eine geometrische Analogie

Als ergänzende Analogie kann man an ein stark gefaltetes Medium denken: Nicht das Volumen ändert sich, sondern die interne Struktur gewinnt an Faltungen und Verzweigungen. In ähnlichem Sinne beschreibt die FFGFT einen Raum, dessen feine fraktale Tiefe im Laufe der Entwicklung zunimmt, während der makroskopische Raum im Mittel stabil bleibt. Diese Analogie bleibt zweitrangig gegenüber der präzisen geometrischen Formulierung, hilft aber, die Rolle von ξ als Maß für zusätzliche Struktur zu veranschaulichen.

Wichtiger Hinweis (Kosmologie): Die Standard-Interpretation der kosmologischen Rotverschiebung als Folge einer expandierenden Raumzeit wird in der FFGFT durch ein alternatives Bild ersetzt, in dem fraktale Tiefenstruktur und effektive Skalen eine zentrale Rolle spielen. Dieser Aspekt ist noch

Gegenstand aktiver Forschung; zugleich deuten mehrere unabhängige Beobachtungen darauf hin, dass die gängige Deutung als rein kinematische Expansion unvollständig ist und eine fraktale Tiefenstruktur eine zentrale Rolle spielt.

1.2 Von xi zu physikalischen Skalen

Die Stärke von ξ zeigt sich darin, dass sich aus ihr charakteristische Energieskalen ableiten lassen. Eine besonders wichtige ist die emergente Skala E_0, die zwischen Elektron- und Myonmasse liegt und für die elektromagnetische Struktur zentral ist.

In den technischen Kapiteln der FFGFT lässt sich zeigen, dass sich mit

$$\alpha = \xi \left(\frac{E_0}{1\,\text{MeV}} \right)^2 \tag{1.3}$$

die Feinstrukturkonstante reproduzieren lässt, also

$$\frac{1}{\alpha} \approx 137{,}036. \tag{1.4}$$

In diesem neuen Narrativband werden wir Schritt für Schritt den Weg gehen

$$\xi \;\Rightarrow\; \text{Massen und Verhältnisse} \;\Rightarrow\; \alpha \tag{1.5}$$

$$\Rightarrow\; \text{QM/QFT-Gleichungen} \;\Rightarrow\; \text{Kosmos} \tag{1.6}$$

und dabei immer wieder zur Zeit-Masse-Dualität als intuitivem Leitbild zurückkehren.

Im nächsten Kapitel beginnen wir mit den konkreten Massen und Massenverhältnissen, die sich aus ξ ergeben, und bereiten damit den Boden für die Entschlüsselung von $1/137$.

Kapitel 2

Von xi zu Massen, Verhältnissen und der Zahl 137

In diesem Kapitel machen wir die erste ernsthafte Probe auf die Zeit-Masse-Dualität: Führt die einzelne Zahl ξ wirklich zu den beobachteten Leptonenmassen und zur berühmten Zahl $1/137$? Wir gehen schrittweise vor und halten die technischen Details schlank, verweisen aber dort, wo nötig, auf die entsprechenden Fachkapitel.

2.1 Leptonenmassen als erste Probe

Die FFGFT beschreibt die Leptonenmassen nicht als freie Eingaben, sondern als Funktionen einer geometrischen Skala E_0 und des Parameters ξ. In natürlicher Normierung (ohne Einheiten) treten zunächst dimensionslose Massen $m^{(\text{nat})}$ auf, die sich aus einer fraktalen Quantenfunktion $f(n, l, s)$ ergeben. Für das Elektron, Myon und Tauon lautet dies schematisch:

$$m_e^{(\text{nat})} = \frac{1}{\xi \cdot f(1, 0, 1/2)}, \tag{2.1}$$

$$m_\mu^{(\text{nat})} = \frac{1}{\xi \cdot f(2, 1, 1/2)}, \tag{2.2}$$

$$m_\tau^{(\text{nat})} = \frac{1}{\xi \cdot f(3, 2, 1/2)}. \tag{2.3}$$

Die konkrete Form von $f(n, l, s)$ ist Gegenstand der technischen Ableitung; wichtig für das Narrativ ist hier nur:

- Alle drei Massen hängen *nur* von ξ und ganzzahligen Quantenzahlen ab.
- Es gibt eine eindeutige geometrische Zuordnung, keine frei justierbaren Parameter pro Teilchen.

Um den Kontakt zur gemessenen Physik herzustellen, wird ein gemeinsamer Skalenfaktor so gewählt, dass

$$m_e \approx 0{,}511\,\text{MeV}\,, \tag{2.4}$$
$$m_\mu \approx 105{,}7\,\text{MeV}\,, \tag{2.5}$$
$$m_\tau \approx 1776{,}9\,\text{MeV} \tag{2.6}$$

herauskommen. Die Details dieses Fits bleiben in den Fachkapiteln; hier zählt die Aussage: **Mit einem einzigen geometrischen Parameter ξ wird das dreistufige Leptonenspektrum reproduzierbar.**

2.2 Massenverhältnisse und die emergente Skala E_0

Statt auf die absoluten Zahlen zu starren, lohnt es sich, die Verhältnisse zu betrachten. Zwischen Elektron und Myon, sowie zwischen Myon und Tauon, ergeben sich charakteristische Faktoren, die sich aus der Struktur von $f(n,l,s)$ erklären lassen.

Aus dieser Hierarchie lässt sich eine *emergente* Energieskala E_0 ableiten, die ungefähr in der Mitte zwischen Elektron- und Myonmasse liegt:

$$E_0 \approx 7{,}4\,\text{MeV}. \tag{2.7}$$

Narrativ gesprochen ist E_0 die Energie, bei der sich die durch ξ bestimmte Geometrie und die elektromagnetische Kopplung besonders “wohl fühlen” – eine Art Treffpunkt der Skalen. Diese Skala taucht nicht als freier Parameter auf, sondern *fällt aus der Leptonen-Hierarchie heraus*.

2.3 Die Feinstrukturkonstante aus xi

An dieser Stelle kommt eine der zentralen Beziehungen der FFGFT ins Spiel:

$$\alpha = \xi \left(\frac{E_0}{1\,\text{MeV}}\right)^2. \tag{2.8}$$

Setzt man hier das aus den Massenverhältnissen gewonnene E_0 ein, ergibt sich

$$\alpha \approx \frac{1}{137{,}036} \tag{2.9}$$

und damit

$$\frac{1}{\alpha} \approx 137{,}036, \tag{2.10}$$

im Einklang mit den präzisen CODATA-Werten der Feinstrukturkonstante.

Wichtiger Vorsichtsvermerk

Die obige Beziehung ist in der FFGFT *keine* freie Fit-Formel, sondern folgt aus der Kombination von

- der fraktalen Dimension $D_f = 3 - \xi$,
- der daraus folgenden Skalenhierarchie der Leptonenmassen und
- der Identifikation von E_0 als geometrisch-emergenter Energieskala.

Die genaue numerische Übereinstimmung mit dem gemessenen Wert von $1/\alpha$ ist bemerkenswert und stützt die Sicht, dass hier kein bloßer numerischer Zufall vorliegt, sondern eine geometrisch motivierte Struktur; dennoch bleiben experimentelle und theoretische Unsicherheiten zu beachten:

- **Experimentelle Seite:** Die Feinstrukturkonstante wird extrem präzise gemessen; kleine Verschiebungen durch neue Auswertungen sind möglich.
- **Theoretische Seite:** Höherordnungs-Korrekturen (z.B. aus Quantenfeldtheorie und fraktaler Feinstruktur) können die effektive Kopplung geringfügig verändern.

In diesem Narrativband steht daher nicht der Anspruch im Vordergrund, mit wenigen Zeilen alle Details der Hochpräzisionsphysik erschöpfend zu erklären. Wichtiger ist die konzeptionelle Botschaft: **Aus der einzigen Zahl ξ lassen sich sowohl die Leptonenmassen als auch die elektromagnetische Kopplungsstärke konsistent ableiten.** Ausführliche Ableitungen und numerische Studien dazu finden sich in den technischen T0-Dokumenten zu Leptonenmassen und Feinstrukturkonstante [Pascher(2025a), Pascher(2025b)].

In den folgenden Kapiteln wenden wir diese Sicht auf die Gleichungen der Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie an – beginnend mit der Schrödingergleichung und ihrer deterministischen Interpretation in der Zeit-Masse-Dualität.

Kapitel 3

Zeit-Masse-Dualität in Quantenmechanik und Feldtheorie

In den bisherigen Kapiteln stand die Geometrie im Vordergrund: die Zahl ξ, die fraktale Dimension D_f und die daraus folgenden Skalen. Nun wenden wir diese Struktur auf die vertrauten Gleichungen der Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie an.

3.1 Schrödingergleichung als effektive Beschreibung

In der Standardformulierung beschreibt die zeitabhängige Schrödingergleichung

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t}\psi(t,\vec{x}) = \hat{H}\,\psi(t,\vec{x}) \tag{3.1}$$

die Entwicklung einer Wellenfunktion ψ unter einem Hamiltonoperator $\hat{H}$. Diese Gleichung ist bereits deterministisch: Aus einem gegebenen Anfangszustand folgt eindeutig die Zukunft. Die scheinbare Zufälligkeit betritt die Theorie erst durch das Messpostulat und die Interpretation von $|\psi|^2$ als Wahrscheinlichkeitsdichte.

Im Rahmen der Zeit-Masse-Dualität wird die Schrödingergleichung als effektive Beschreibung einer tieferliegenden, geometrischen Dynamik verstanden. Vereinfacht gesagt beschreibt ψ nicht ein mysteriöses "Feld der Möglichkeiten", sondern eine statistische Projektion der zugrunde liegenden fraktalen Zeitstruktur. Die Parameter im Hamiltonoperator – insbesondere Massen und Kopplungsstärken – sind in der FFGFT nicht fundamental, sondern durch ξ und die daraus folgenden Skalen bestimmt.

3.2 Von Schrödinger zu Dirac

Für relativistische Teilchen mit Spin ist die Schrödingergleichung nicht ausreichend. Dort tritt die Dirac-Gleichung auf:

$$(i\,\gamma^\mu \partial_\mu - m)\,\psi = 0, \tag{3.2}$$

mit den Dirac-Matrizen γ^μ und der Masse m. In der FFGFT wird m nicht als Eingabeparameter betrachtet, sondern als abgeleitete Größe aus der Zeit-Masse-Dualität und der fraktalen Struktur (wie in den Leptonenbeispielen zuvor).

Damit ändert sich auch die Lesart der Dirac-Gleichung: Sie ist nicht die fundamentale Gleichung, sondern eine effektive Feldgleichung auf einem Hintergrund, dessen Geometrie bereits durch ξ festgelegt ist. In der vollständigen FFGFT/T0-Formulierung wird die Dirac-Struktur generell vereinfacht: Anstelle des vollen 4×4-Matrizenapparats tritt eine äquivalente skalare Felddynamik der Massenvariation, auf deren Basis sowohl eine erweiterte Schrödingergleichung als auch eine universelle Lagrange-Funktion formuliert werden. In diesem Kapitel zeigen wir nur die gewohnte Dirac-Form als effektiven Einstieg, während die wirklich fundamentale Beschreibung durch die vereinfachte Dirac-Dynamik und die universelle Lagrange-Funktion der T0-Theorie gegeben wird. Die bekannten Eigenschaften – Spin, Antimaterie, Z-Kitterbewegung – bleiben erhalten, erhalten aber eine geometrische Deutung im Rahmen der fraktalen Raumzeit.

3.3 Lagrangedichte und Rolle von ξ

In den Bändern 1 bis 3 wurde die Lagrangedichte der FFGFT Schritt für Schritt aufgebaut. Schematisch lässt sie sich als Erweiterung der Einstein-Hilbert-Wirkung schreiben, ergänzt um fraktale Anteile und materielle Felder. Für ein einfaches Dirac-Feld in gekrümmter Raumzeit lautet die Standard-Lagrangedichte

$$\mathcal{L}_{\text{Dirac}} = \bar{\psi}(i\,\gamma^\mu \nabla_\mu - m)\psi. \tag{3.3}$$

In der FFGFT wird m durch ξ und die zugrunde liegende fraktale Struktur fixiert, und zusätzliche Terme in der Lagrangedichte kodieren die Beiträge des fraktalen Vakuums. Der genaue Aufbau dieser Terme wurde in den technischen Kapiteln entwickelt; für das Narrativ genügt hier die Kernaussage, dass ξ als globaler Organisationsparameter in allen Sektoren der Lagrangedichte auftritt.

3.4 Ausblick: Quantencomputer und Grundfunktionen

Wenn Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie im Kern geometrisch durch ξ organisiert sind, liegt es nahe zu fragen, wie sich diese Struktur in Quanteninformation und Quantencomputern widerspiegelt; die zuvor eingeführten fraktalen Grundfunktionen und Moden lassen sich dabei als natürliche Basis für Quantenregister und logische Operationen verstehen. Auf dieser Grundlage kann der Zusammenhang zwischen den zugrunde liegenden Feldgleichungen, der Zeit-Masse-Dualität und konkreten Quantenchip-Architekturen herausgearbeitet werden, so dass klar wird, wie geometrische und informationstheoretische Aspekte ineinandergreifen.

Kapitel 4

Quanteninformation und Grundfunktionen in der Zeit-Masse-Dualität

In diesem Kapitel wird die Verbindung zwischen der geometrischen Struktur der FFGFT und der Quanteninformationstheorie beschrieben. Der Fokus liegt nicht auf technischen Schaltplänen, sondern auf der Frage, wie sich Qubits, Überlagerung und Verschränkung aus der Zeit-Masse-Dualität heraus verstehen lassen.

4.1 Qubits als effektive Freiheitsgrade

In der üblichen Formulierung ist ein Qubit ein Zustandsvektor in einem zweidimensionalen Hilbertraum:

$$|\psi\rangle = \alpha\,|0\rangle + \beta\,|1\rangle\,, \quad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1. \tag{4.1}$$

In der FFGFT wird dieser Hilbertraum nicht als abstrakter mathematischer Raum ohne Hintergrund verstanden, sondern als effektive Beschreibung bestimmter fraktaler Moden der Zeit-Masse-Dualität. Die beiden Basiszustände $|0\rangle$ und $|1\rangle$ stehen dann für zwei stabilisierte Konfigurationen einer zugrunde liegenden geometrischen Struktur (z.B. zwei lokal verschiedene Phasen des Feldes), während die Koeffizienten α und β die Verteilung der Aktivierung in dieser Struktur wiedergeben.

Diese Interpretation ändert an der formalen Verwendung der Qubit-Algebra nichts; sie macht nur explizit, dass die Parameter letztlich durch ξ und die daraus folgenden Skalen festgelegt sind.

4.2 Überlagerung und Interferenz

Der Kern vieler Quantenalgorithmen ist die kontrollierte Nutzung von Überlagerung und Interferenz. In der üblichen Sprache spricht man davon, dass ein Qubit gleichzeitig "0" und "1" ist und dass sich diese Anteile konstruktiv oder destruktiv überlagern.

Im Rahmen der Zeit-Masse-Dualität lässt sich dies als Interferenz von fraktalen Zeitpfaden deuten: Die zugrunde liegende geometrische Dynamik ist deterministisch, aber aus Sicht des effektiven Zustands $|\psi\rangle$ erscheinen mehrere Beiträge, die sich in der Messung als Wahrscheinlichkeiten manifestieren. Die bekannten Interferenzphänomene – etwa am Doppelspalt – bleiben vollständig erhalten, erhalten aber eine zusätzliche Interpretationsebene: Sie spiegeln die Struktur der fraktalen Pfaddynamik wider.

4.3 Verschränkung und Nichtlokalität

Mehrteilchenzustände wie

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \tag{4.2}$$

werden in der Standardquantenmechanik als verschränkt beschrieben: Der Gesamtzustand ist nicht als Produkt einzelner Qubit-Zustände schreibbar.

In der FFGFT ist dies ein Hinweis darauf, dass die zugrunde liegende fraktale Struktur die beteiligten Freiheitsgrade gemeinsam organisiert. Die Korrelationen entstehen nicht durch nachträgliche "Kommunikation" zwischen Teilchen, sondern sind in der gemeinsamen Geometrie der Zeit-Masse-Dualität bereits vorhanden.

Diese Sicht steht im Einklang mit den Ergebnissen der Bände 1–3, in denen Bell-Experimente, RSA-Protokolle und deterministische Deutungen der Quantenmechanik diskutiert wurden. Im vorliegenden Narrativ werden diese Themen nicht neu hergeleitet, sondern auf die Rolle von ξ und der fraktalen Struktur zurückgeführt.

4.4 Grundfunktionen als natürliche Rechenbasis

In früheren Kapiteln der FFGFT wurden spezielle fraktale Grundfunktionen $G_n(t)$ eingeführt, die als Eigenfunktionen des zugrunde liegenden Zeitfeld-Operators fungieren und die spektrale Struktur der Zeit-Masse-Dualität beschreiben. Für Quanteninformationsanwendungen bieten sie sich als natürliche

Rechenbasis an: Statt willkürlich gewählter Basiszustände nutzt man direkt Zustände der Form

$$|n\rangle \sim G_n(t), \tag{4.3}$$

die die Besetzung der n-ten Grundfunktion repräsentieren.

Konzeptionell bedeutet dies:

- Ein Qubit oder Register wird nicht abstrakt definiert, sondern als Besetzungsstruktur bestimmter Grundfunktionen.
- Gatteroperationen entsprechen gezielten geometrischen Transformationen, die diese Moden mischen (z.B. effektive Rotationen im Zustandsraum).

Diese konkrete Ausführung solcher Operationen (etwa auf einem photonischen Chip) bleibt hier im Hintergrund. Wesentlich ist, dass die FFGFT eine konsistente Brücke zwischen geometrischer Feldtheorie und Quanteninformation bietet, ohne an der etablierten formalen Struktur der Quantencomputertheorie etwas zu ändern.

4.5 Elementare Gatter und fraktale Dynamik

Einfache Ein-Qubit-Gatter lassen sich als gezielte Umverteilungen der Besetzung zwischen zwei Grundfunktionen verstehen. Mathematisch kann man eine Rotation im zweidimensionalen Zustandsraum beispielsweise durch

$$U(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) & -\sin(\theta/2) \\ \sin(\theta/2) & \cos(\theta/2) \end{pmatrix} \tag{4.4}$$

beschreiben.

In der Zeit-Masse-Dualität entspricht eine solche Rotation einer kontrollierten Änderung der relativen Gewichtung zweier fraktaler Moden bei festem durch ξ vorgegebenem Energiespektrum. Die formale Darstellung bleibt identisch zur üblichen Quanteninformationstheorie, erhält aber eine geometrische Interpretation: Winkelparameter wie θ spiegeln konkrete Eigenschaften der zugrunde liegenden Struktur wider, etwa Laufzeiten oder effektive Kopplungsstärken.

Ein kontrolliertes Zweiqubit-Gatter, etwa ein kontrolliertes Phasengatter, kann in dieser Sichtweise als gezielte Korrelation zweier Sätze von Grundfunktionen aufgefasst werden. Statt einer abstrakten Steuerung eines Kontrollqubits wirkt die zugrunde liegende fraktale Geometrie so, dass bestimmte kombinierte Besetzungen bevorzugt oder unterdrückt werden.

4.6 Skalen, Rauschen und Robustheit

Die durch ξ bestimmten Skalen legen nicht nur Massen und Energien fest, sondern auch natürliche Zeitskalen, auf denen kohärente Quantdynamik stattfinden kann. Für Quantenprozessoren bedeutet dies, dass es bevorzugte Betriebsbereiche gibt, in denen die Wechselwirkung mit der Umgebung die fraktale Struktur nur geringfügig stört.

Rauschen und Dekohärenz lassen sich in dieser Perspektive als Störungen der feinen Zeit-Masse-Struktur deuten, die dazu führen, dass sich die effektive Beschreibung durch Qubits von der tatsächlichen geometrischen Dynamik entfernt. Eine sorgfältige Wahl von Materialien, Frequenzen und Kopplungsstärken kann als Versuch verstanden werden, diese Störungen so zu minimieren, dass die durch ξ vorgegebenen Skalen möglichst gut ausgenutzt werden.

4.7 Faktorisierung, Shor-Algorithmus und Simulationen

Ein prominentes Beispiel für die Leistungsfähigkeit von Quantencomputern ist die Faktorisierung großer Zahlen, wie sie im Shor-Algorithmus genutzt wird. Formal basiert dieser Algorithmus auf periodischen Strukturen in modularen Exponentialfunktionen und nutzt Überlagerung und Interferenz, um Perioden effizient zu finden.

In der FFGFT lassen sich diese Strukturen als spezielle Konfigurationen der fraktalen Grundfunktionen verstehen. Ein prototypischer Schritt im Shor-Algorithmus ist die Abbildung

$$|x\rangle\,|0\rangle \longmapsto |x\rangle\,|f(x)\rangle\,, \quad f(x) = a^x \text{ mod } N, \tag{4.5}$$

gefolgt von einer Quanten-Fourier-Transformation auf dem ersten Register, um die Periode r von $f(x)$ zu extrahieren.

Die Simulationen zum Shor-Algorithmus zeigen, dass sich die erwarteten Interferenzmuster und Erfolgschancen reproduzieren lassen, wenn man die logischen Zustände als Besetzungen geeigneter fraktaler Moden interpretiert.

Narrativ gesprochen bedeutet dies:

- Faktorisierung wird nicht als "magische" Beschleunigung verstanden, sondern als Ausnutzung geometrisch organisierter Interferenz in der Zeit-Masse-Struktur.
- Die gleichen Grundfunktionen, die in der Feldtheorie auftauchen, bilden auch die Basis für die Simulationen von Shor-ähnlichen Algorithmen.
- Weitere Quantenalgorithmen (z.B. Such- und Optimierungsverfahren) lassen sich in dieser Sprache als unterschiedliche Nutzungen derselben fraktalen Geometrie formulieren.

Eigene Kapitel können diese Aspekte vertiefen, etwa durch detaillierte Besprechungen konkreter Schaltfolgen oder numerischer Simulationen. In diesem Überblick genügt die Feststellung, dass die Zeit-Masse-Dualität einen konsistenten Hintergrund liefert, auf dem auch komplexe Algorithmen wie Shor geometrisch verstanden werden können.

Kapitel 5

Fraktale Dimension und Regularisierung

In den vorhergehenden Kapiteln wurde die Zeit-Masse-Dualität *phänomenologisch* genutzt: Die Zahl ξ organisiert Massen, Verhältnisse und Kopplungen. In diesem Kapitel wird die fraktale Dimension D_f etwas näher beleuchtet und gezeigt, warum bereits ein winziger Versatz von der klassischen Dreidimensionalität physikalisch wirksam werden kann.

5.1 Warum eine fraktale Dimension?

Klassische Feldtheorien arbeiten in glatten Räumen mit ganzzahliger Dimension. Die Erfahrung mit Quantenfeldtheorien zeigt jedoch, dass auf sehr kleinen Skalen Divergenzen auftreten, die nur mit zusätzlichen Regularisierungsschritten beherrschbar sind.

Die FFGFT wählt einen anderen Ansatz: Statt eine Hilfsregularisierung einzuführen, wird die effektive Raumdimension selbst leicht verschoben,

$$D_f = 3 - \xi, \tag{5.1}$$

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

Physikalisch bleibt der Raum für alle direkten Messungen dreidimensional; der Unterschied zeigt sich nur in der Art, wie Integrale über sehr hohe Impulse oder sehr kleine Längen konvergieren. Der winzige Bruchteil ξ wirkt wie eine eingebaute Regularisierung der Feldtheorie.

5.2 Skalenabhängigkeit und Zeit-Masse-Dualität

Die fraktale Dimension ist nicht als starre Eigenschaft eines "stückweit zerfressenen" Raumes zu verstehen, sondern als effektive Beschreibung der

Skalenabhängigkeit. Je weiter man in die Tiefe der Zeit-Masse-Struktur hinabgeht, desto deutlicher macht sich die Abweichung von exakt drei Dimensionen bemerkbar.

In der Zeit-Masse-Dualität spiegelt sich dies in der Zuordnung von Masse zu lokaler "Dichte" der Zeit wider. Größere effektive Masse bedeutet, dass die fraktale Struktur an dieser Stelle dichter gefaltet ist; die Zeit verläuft dort im Mittel langsamer. Die leichte Absenkung von D_f gegenüber 3 ist ein globales Maß für diese Faltungsdichte.

5.3 Verbindung zu Massen und Kopplungen

Aus der Sicht der FFGFT sind Massen und Kopplungen keine unabhängigen Größen, sondern abgeleitete Parameter der fraktalen Geometrie. Die Leptonenmassen und die Feinstrukturkonstante wurden bereits als Funktionen von ξ und einer emergenten Skala E_0 diskutiert.

Im Hintergrund steht die Beobachtung, dass Integrale, die in exakt dreidimensionalen Theorien divergieren würden, bei $D_f = 3 - \xi$ gerade so weit abgeschwächt werden, dass wohldefinierte Beiträge entstehen. Diese Beiträge lassen sich als effektive Selbstenergien und Kopplungskorrekturen interpretieren, die durch die fraktale Struktur festgelegt sind.

In früheren T0-Texten taucht daneben eine scheinbar abweichende Zahl $D_f \approx 2{,}94$ auf. Sie beschreibt jedoch keine andere Raumdimension, sondern eine *effektive* Dimension D_f^{eff} für bestimmte Renormierungsschritte, bei denen Loop-Integrale wie $(\lambda_C/\ell_P)^{D_f-2}$ skaliert werden und nur die Kombination $D_f - 2 \approx 0{,}94$ zählt. Fundamental bleibt im Xi-Narrativ die Geometrie mit $D_f = 3 - \xi$; $D_f^{\text{eff}} \approx 2{,}94$ ist ein abgeleiteter kritischer Exponent für ausgewählte Prozesse, der aus dieser Geometrie folgt. Diese Unterscheidung deckt sich mit unabhängigen Ansätzen zur fraktalen Quantengravitation, in denen die spektrale Dimension im UV gegen $d_s \approx 2$ fließt und so Renormierbarkeit ermöglicht [Modesto(2008), Modesto(2009), Calcagni(2010), Calcagni(2010b), Hořava(2009), Thürigen(2015)].

Narrativ formuliert bedeutet das:

- ξ quantifiziert, wie stark die Raumzeit auf kleinsten Skalen gefaltet ist.
- Diese Faltung reguliert die sonst divergierenden Quantenfluktuationen.
- Massen und Kopplungsstärken ergeben sich als Antwort des Feldes auf diese regulierte fraktale Struktur.

5.4 Casimir-Effekt als Laborbestätigung

Ein besonders wichtiger Test der fraktalen Vakuumstruktur ist der Casimir-Effekt. Zwischen leitenden Platten wird eine Kraft gemessen, die sich in der Standardtheorie aus der $1/d^4$-Abhängigkeit der Vakuumenergiedichte ergibt und seit Jahrzehnten hochpräzise bestätigt ist.

In der FFGFT werden diese Messungen mit der durch ξ bestimmten Skalenhierarchie verknüpft. Ausgehend von der CMB-Energiedichte ρ_{CMB} und einer charakteristischen Vakuum-Längenskala L_ξ um $100\,\mu\text{m}$ lässt sich zeigen, dass eine Beziehung der Form

$$\rho_{\text{CMB}} = \frac{\xi\,\hbar c}{L_\xi^4} \tag{5.2}$$

zu einer modifizierten Casimir-Formel führt, die exakt wieder die etablierte Standardformel

$$|\rho_{\text{Casimir}}(d)| = \frac{\pi^2\hbar c}{240\,d^4} \tag{5.3}$$

reproduziert.

Damit werden zwei auf den ersten Blick sehr verschiedene Phänomene – CMB und Casimir-Effekt – als unterschiedliche Manifestationen derselben fraktalen Vakuumstruktur verständlich. Die vorhandenen Casimir-Messungen liefern somit eine direkte Laborbestätigung dafür, dass die durch ξ organisierte Tiefenstruktur des Raumes physikalisch real ist.

5.5 Ausblick auf Kosmologie und CMB

Die gleiche fraktale Dimension, die in der Teilchenphysik für Regularisierung sorgt, spielt in der Kosmologie eine Rolle bei der Deutung großskaliger Strukturen. Wenn die effektive Tiefe des Raumes im Laufe der kosmischen Entwicklung zunimmt, ändern sich auch die Wahrnehmung von Entfernungen, Zeiten und Energiedichten.

In späteren Kapiteln wird beschrieben, wie die CMB-Temperatur, Rotverschiebungen und andere kosmologische Größen in diesem Rahmen neu gedeutet werden können. Dabei wird deutlich gemacht, dass diese Interpretation nicht beliebig ist, sondern durch mehrere Beobachtungen gestützt wird, zugleich aber weiterhin sorgfältig an den kosmologischen Daten getestet werden muss.

Kapitel 6

Einheiten, Skalen und Konstanten aus ξ

In der bisherigen Darstellung stand ξ als Organisationsparameter für Massen, Verhältnisse und die Feinstrukturkonstante im Mittelpunkt. In diesem Kapitel wird skizziert, wie sich aus derselben Struktur auch die *Einheiten* und zentralen Naturkonstanten ableiten lassen und warum in der FFGFT keine frei gewählten UV-Cutoffs benötigt werden.

6.1 Natürliche Skalen aus der Zeit-Masse-Dualität

Die Zeit-Masse-Dualität legt nahe, von Anfang an mit natürlichen Skalen zu arbeiten, die durch ξ festgelegt sind. Statt Masse, Länge und Zeit völlig unabhängig zu definieren, werden sie über die fraktale Dimension $D_f = 3 - \xi$ und charakteristische Skalen wie E_0, L_0 und L_ξ miteinander verknüpft.

Wesentliche Bausteine sind:

- eine Energieskala E_0 im MeV-Bereich, die aus der Leptonen-Hierarchie folgt,
- eine minimale Längenskala $L_0 = \xi L_P$ im Sub-Planck-Bereich,
- eine emergente Vakuum-Längenskala L_ξ im Bereich von etwa $100\,$µm, die Casimir- und CMB-Effekte verbindet.

Aus diesen Größen lassen sich konsistente Systeme natürlicher Einheiten aufbauen, in denen z.B. $c = \hbar = 1$ gesetzt wird und Zeit, Länge und Energie direkt durch die fraktale Struktur verknüpft sind.

6.2 Dimensionen, D_f und effektive Einheiten

Die leichte Abweichung der effektiven Dimension D_f von 3 hat direkte Konsequenzen für die Skalierung von Größen. Volumina, Flächen und Phasenräume wachsen geringfügig anders als in exakt dreidimensionalen Modellen, was sich im UV-Verhalten der Theorien niederschlägt.

In der FFGFT werden effektive Einheiten so gewählt, dass diese fraktale Skalierung von Anfang an mitberücksichtigt wird:

- Längen werden relativ zu L_0 und L_ξ gemessen,
- Energien relativ zu E_0 und den daraus abgeleiteten Skalen,
- Zeitabstände über die Zeit-Masse-Dualität direkt mit lokalen Massendichten und Faltungsgraden der Struktur verknüpft.

Dadurch verschwinden viele der scheinbar willkürlichen Parameter, die in klassischen Einheiten-Systemen auftreten, und machen Platz für eine Geometrisierung der Einheiten selbst.

6.3 Gravitationskonstante als emergente Kopplung

In der Standardphysik erscheint die Gravitationskonstante G als fundamentale Konstante, die direkt in die Feldgleichungen und Lagrangedichten eingebaut wird. Ihre Dimension wird durch das gewählte Einheitensystem festgelegt, und in vielen Ansätzen zur Quantengravitation versucht man, G analog zu anderen Kopplungen zu renormieren.

In der FFGFT wird ein anderer Weg eingeschlagen. Ausgehend von einer Zeitfeld-Dynamik und der fraktalen Raumzeitstruktur wird Gravitation als emergente Wirkung der Zeit-Masse-Dualität verstanden. Die Planck-Länge

$$L_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \tag{6.1}$$

wird nicht als Ausgangspunkt genommen, sondern selbst als abgeleitete Skala, die aus ξ und der Geometrie der Zeit-Masse-Struktur folgt.

Konzeptionell bedeutet dies:

- G fungiert als effektive Kopplungskonstante, die die Reaktion der makroskopischen Raumzeit auf die fraktale Tiefenstruktur beschreibt.
- Die numerische Größe von G lässt sich aus der Kombination von ξ, L_0, L_ξ und den zugehörigen Energiedichten ableiten.
- Gravitation wird nicht über eine beliebig angesetzte Lagrangedichte hineinrepariert, sondern ergibt sich aus der zugrunde liegenden Zeitfeld-Geometrie.

Damit verschiebt sich der Status von G: Von einer "ursprünglich gesetzten" Konstanten hin zu einer Größe, die denselben geometrischen Ursprung hat wie die Leptonenmassen und die Feinstrukturkonstante.

6.4 Zusammenhang mit Lagrangedichte und Feldgleichungen

In den technischen Kapiteln der FFGFT wurde gezeigt, wie sich aus der fraktalen Zeitfeld-Dynamik eine effektive Lagrangedichte für Materie- und Feldfreiheitsgrade ergibt. Statt von vornherein eine Einstein-Hilbert-Wirkung mit fester Gravitationskonstante zu postulieren, wird die Kopplung an die Geometrie aus der Struktur des Zeitfeldes heraus konstruiert.

Aus narrativer Sicht genügt hier die Kernaussage; detaillierte Tabellen und Systematisierungen zu natürlichen Einheiten, SI-Umrechnungen und dem Status von c und α finden sich in den T0-Einheitenarbeiten [Pascher(2025c), Pascher(2025d)]:

- Die gleichen Parameter ξ, E_0, L_0 und L_ξ, die Massen, Kopplungen und CMB/Casimir-Effekte organisieren, bestimmen auch die effektive Gravitationskopplung.
- Einheitensysteme lassen sich so wählen, dass diese Zusammenhänge transparent werden und keine künstlichen Unendlichkeiten im UV-Bereich auftreten.

Auf diese Weise entsteht ein Bild, in dem alle zentralen Konstanten und Einheiten – von α und den Leptonenmassen bis hin zu G und kosmologischen Skalen – als Ausdruck einer einzigen, durch ξ gesteuerten Zeit-Masse-Geometrie erscheinen.

Kapitel 7

Gravitation und Gravitationskonstante aus ξ

Im Hauptnarrativ der FFGFT taucht die Gravitationskonstante G bereits als *emergente* Größe auf: Sie wird nicht einfach postuliert, sondern folgt aus derselben fraktalen Zeit–Masse-Struktur, die Massen, Kopplungen und kosmische Skalen organisiert. Dieses Kapitel gibt eine fokussierte Xi-Darstellung, wie G aus ξ hervorgeht, warum der Faktor ξ^2 entscheidend ist und was dies für die Schwäche der Gravitation und die Stabilität des Universums bedeutet.

7.1 Von Planck-Einheiten zur fraktalen Geometrie

In der konventionellen Physik werden die Planck-Einheiten aus c, $\hbar$ und G konstruiert:

$$L_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}, \qquad m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}, \qquad t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}. \tag{7.1}$$

Die Logik läuft dabei meist in eine Richtung: Man *nimmt an*, dass c, $\hbar$ und G fundamental sind, und kombiniert sie dann, um charakteristische Skalen für Länge, Masse und Zeit zu erhalten. Im FFGFT-/Xi-Bild wird diese Logik umgedreht:

- das zentrale Objekt ist die fraktale Zeit–Masse-Geometrie, organisiert durch den kleinen Parameter ξ;
- aus dieser Geometrie entstehen natürliche Skalen wie E_0, $L_0 = \xi L_P$ und L_ξ;
- G wird *aus* diesen Skalen abgelesen, anstatt von vornherein eingesetzt zu werden.

Die Frage lautet also nicht „wie bauen wir Einheiten aus G?", sondern „wie taucht G als effektive Kopplung auf, wenn Materie und Geometrie beide Ausdruck ein und derselben fraktalen Struktur sind?".

7.2 Herleitung von G aus ξ

In der technischen Herleitung setzt man bei der Dynamik des Zeitfeldes und seiner Kopplung an die Vakuumdichte an. Auf Xi-Niveau genügt es, die zentrale Relation aus dem Hauptnarrativ in Erinnerung zu rufen:

$$G = \frac{c^3 l_P^2}{\hbar} \cdot \xi^2. \tag{7.2}$$

Dabei bezeichnet l_P die (konventionell definierte) Planck-Länge. Die neue Zutat ist der Faktor ξ^2 davor. Ohne diesen Faktor wäre die naheliegende Vermutung einfach $G_{\text{naiv}} \sim c^3 l_P^2/\hbar$. Die FFGFT korrigiert diese Vermutung, indem sie den fraktalen Parameter einführt:

$$G = G_{\text{naiv}} \cdot \xi^2. \tag{7.3}$$

Numerisch bedeutet dies bei $\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4}$, dass G gegenüber dem naiven Planck-Wert um fast acht Größenordnungen unterdrückt ist. Diese Unterdrückung ist *keine* willkürliche Feineinstellung, sondern ein direkter Ausdruck der fraktalen Tiefenstruktur der Raumzeit.

7.3 Warum Gravitation so schwach ist

Aus rein dimensionaler Sicht gibt es keinen Grund, warum die Gravitation so schwach sein sollte, wie sie ist. Die gravitative Kopplung zweier Protonen

$$\alpha_G = \frac{G m_p^2}{\hbar c} \approx 10^{-38}, \tag{7.4}$$

ist winzig im Vergleich zur elektromagnetischen Feinstrukturkonstante $\alpha \approx 1/137$. Alltagssprachlich: Gravitation ist gegenüber der Elektrodynamik um etwa achtunddreißig Größenordnungen schwächer.

Im FFGFT-Rahmen wird diese enorme Hierarchie dem Faktor ξ^2 zugeschrieben. Setzt man in obigem Ausdruck formal $\xi = 1$, so wird die Gravitation stärker um den Faktor

$$\left(\frac{1}{\xi}\right)^2 \sim 5{,}6 \times 10^7. \tag{7.5}$$

Ein Universum mit einem derart großen G würde sich dramatisch anders verhalten:

- Galaxien würden deutlich schneller kollabieren,
- stabile Sterne und Planetensysteme wären extrem unwahrscheinlich,
- kleine Inhomogenitäten würden so rasch wachsen, dass keine langlebigen, komplexen Strukturen entstehen könnten.

Aus Xi-Sicht ist die Schwäche der Gravitation daher kein separates Rätsel, sondern eine direkte Folge der Kleinheit von ξ. Der gleiche Parameter, der Leptonenmassen und die CMB-Skala organisiert, steuert auch die effektive Stärke von G.

7.4 Beziehung zum Zeitfeld

Ein zentrales Motiv des Xi-Narrativs ist, dass Zeit kein vorgegebenes Hintergrundobjekt ist, sondern eine abgeleitete Struktur. Infinitesimale Intervalle $d\tau$ folgen aus der Phasenentwicklung $d\theta$ eines Vakuumfeldes, skaliert mit Dichte und ξ. In dieser Sicht beschreiben Krümmung und Gravitation, wie sich die Phasenstruktur des Vakuums über Skalen hinweg organisiert.

Das Auftauchen von G aus ξ lässt sich genau so lesen:

- die Kombination $c^3 l_P^2/\hbar$ kodiert, wie schnell Störungen propagieren können und wie Quantenfluktuationen auf die Geometrie zurückwirken,
- der Faktor ξ^2 misst, wie tief das Vakuum gefaltet ist, d.h. wie viel zusätzlicher "Raum" für Struktur jenseits eines rein dreidimensionalen Bildes vorhanden ist,
- das Produkt beider setzt die Stärke, mit der das Zeitfeld auf Materie- und Energiedichten reagiert.

Gravitation ist damit eine *effektive* Beschreibung dafür, wie sich das fraktale Zeitfeld selbst organisiert. In Bereichen, in denen sich die Faltungstiefe kaum ändert, sind Einsteins Feldgleichungen mit einem nahezu konstanten G eine ausgezeichnete Näherung. Wo sich die Faltungstiefe deutlich ändert, kann der effektive Wert von G prinzipiell skalenabhängig werden.

7.5 Vergleich mit der Wahl $G = 1$

In natürlichen Einheiten ist es üblich, $G = 1$ zu setzen, um Formeln zu vereinfachen. Aus Xi-Sicht entspricht dies dem Verstecken wichtiger geometrischer Information:

- mit $G = 1$ normiert man die explizite Sensitivität auf ξ^2 weg,
- die Unterscheidung zwischen Bereichen, in denen Gravitation effektiv schwächer oder stärker ist, wird weniger transparent,
- der Zusammenhang zwischen Gravitationskopplung und den Skalen E_0, L_0 und L_ξ ist nicht mehr auf einen Blick erkennbar.

Für grobe Größenordnungsabschätzungen mag dies zulässig sein. Für das FFGFT-Programm – das gerade darauf zielt, Konstanten wie G in wenigen geometrischen Parametern auszudrücken – ist es jedoch entscheidend, G

explizit zu belassen. Nur so lässt sich sehen, wie sich eine Änderung von ξ durch das gesamte Netz der Skalen hindurch fortpflanzen würde.

7.6 Ausblick

Dieses Kapitel hebt eine Kernbotschaft hervor: Im FFGFT-/Xi-Rahmen ist die Gravitationskonstante keine unabhängige Eingangsgröße, sondern Teil desselben fraktalen Musters, das Massenskalen, Kopplungen und kosmologische Observablen vereinheitlicht. Die Formel

$$G = \frac{c^3 l_P^2}{\hbar} \cdot \xi^2 \tag{7.6}$$

Sie fasst zusammen, wie die Tiefenstruktur der Raumzeit, kodiert in ξ, die scheinbare Schwäche der Gravitation bestimmt.

Kapitel 8

Singularitäten und natürlicher UV-Cutoff

In vielen Standardmodellen der Physik treten formale Unendlichkeiten auf: Divergierende Integrale in der Quantenfeldtheorie, Singularitäten in schwarzen Löchern oder ein punktförmiger Anfang des Universums. Üblicherweise werden diese Probleme durch Hilfsverfahren wie Renormierung, künstliche UV-Cutoffs oder spezielle Anfangsbedingungen entschärft. Die Zeit-Masse-Dualität und die fraktale Raumzeitstruktur der FFGFT schlagen einen anderen Weg ein: Die zugrunde liegende Geometrie ist so organisiert, dass echte physikalische Unendlichkeiten gar nicht erst entstehen.

8.1 Mathematische Singularitäten als Artefakte

Singularitäten entstehen in der Regel dann, wenn eine Theorie außerhalb ihres Gültigkeitsbereichs extrapoliert wird. Ein klassisches Beispiel ist die Punktladung in der Elektrodynamik, deren Feldenergie formal divergiert, wenn man den Abstand exakt auf Null setzt. Auch in der Allgemeinen Relativitätstheorie treten bei der Beschreibung schwarzer Löcher und im Standard-Big-Bang-Modell Divergenzen der Krümmung auf.

Die FFGFT interpretiert diese Singularitäten als Hinweis darauf, dass die Annahme einer exakt glatten, kontinuierlichen Raumzeit bis zu beliebig kleinen Skalen unphysikalisch ist. Sobald man die fraktale Dimension

$$D_f = 3 - \xi \tag{8.1}$$

und eine minimale effektive Längenskala berücksichtigt, verschwinden die formalen Unendlichkeiten und werden durch große, aber endliche Beiträge ersetzt.

8.2 Fraktale Dimension und UV-Verhalten

Wie im vorherigen Kapitel erläutert, führt die Absenkung von D_f gegenüber 3 dazu, dass Integrale, die in exakt dreidimensionalen Theorien divergieren würden, abgeschwächt werden. Auf sehr kleinen Skalen wirkt die fraktale Struktur wie ein eingebauter UV-Cutoff:

- Volumenelemente wachsen etwas anders als in der glatten 3D-Geometrie.
- Effektive Phasenräume für hochenergetische Moden werden reduziert.
- Selbstenergien und Schleifenbeiträge bleiben endlich und werden durch ξ und die zugehörigen Skalen fixiert.

In dieser Sicht ist ein UV-Cutoff keine frei gewählte Rechengröße, sondern Ausdruck der realen geometrischen Struktur der Raumzeit. Die Theorie selbst kennt keine unendlichen Energiedichten, sondern nur die Grenze ihrer effektiven Beschreibung auf Skalen unterhalb der durch ξ bestimmten Längen.

8.3 Minimale Längenskalen und Zeit-Masse-Struktur

Die FFGFT arbeitet mit einer Hierarchie von Längenskalen: von sehr kleinen, fraktal organisierten Tiefenstrukturen bis hin zu makroskopischen Bereichen, in denen die Raumzeit praktisch glatt erscheint. Auf den tiefsten Ebenen gibt es eine minimale effektive Längenskala, unterhalb derer es keinen Sinn mehr ergibt, von klassischen Punkten zu sprechen.

Narrativ gesprochen bedeutet das:

- Die Zeit-Masse-Struktur besitzt eine endliche Faltungsdichte; sie kann dichter, aber nicht unendlich dicht werden.
- Regionen großer effektiver Masse entsprechen stark gefalteter Zeit, nicht einem "Loch" mit unendlicher Krümmung.
- Auch im frühen Universum wird eine extrem dichte, aber endliche Anfangskonfiguration beschrieben, keine mathematische Singularität.

Damit wird der Begriff der Singularität durch eine geometrisch organisierte Sättigung ersetzt: Wo klassische Theorien unendliche Größen vorhersagen, beschreibt die FFGFT Bereiche, in denen die fraktale Struktur ihre maximale Dichte erreicht.

8.4 Konsequenzen für schwarze Löcher und den Urknall

Für schwarze Löcher bedeutet dies, dass der innere Bereich nicht als Punkt mit unendlicher Krümmung verstanden wird, sondern als Zone, in der die Zeit-Masse-Struktur maximal gefaltet ist. Die klassische Horizontstruktur bleibt als effektive Grenze für Beobachter erhalten, aber im Inneren verhindert die fraktale Geometrie das Auftreten unendlicher Energiedichten.

Ähnlich wird der Anfang des Universums nicht als unendliche Dichte beschrieben, sondern als Übergangsphase, in der sich die fraktale Tiefenstruktur der Raumzeit von einem nahezu homogenen Zustand zu der heutigen, hierarchisch organisierten Struktur entwickelt. Skalen wie die CMB-Temperatur und charakteristische Hubble-Größen erscheinen in diesem Bild als Folge dieser Entwicklung, nicht als Folge einer mathematischen Singularität.

Insgesamt ersetzt die Zeit-Masse-Dualität die Vorstellung physikalischer Unendlichkeiten durch eine konsistente, durch ξ gesteuerte Geometrie mit natürlichem UV-Cutoff. Dies schließt an die bereits diskutierten Zusammenhänge zwischen ξ, Massen, Kopplungen, Casimir-Effekt und Kosmologie an und verbindet mikroskopische und kosmologische Skalen in einem gemeinsamen Rahmen.

Kapitel 9

Kosmologie, Rotverschiebung und CMB in der Zeit-Masse-Dualität

In den vorangegangenen Kapiteln stand die mikroskopische Seite der Zeit-Masse-Dualität im Mittelpunkt: Massen, Kopplungen und Quantenphänomene. In diesem Kapitel wird skizziert, wie sich dieselbe Struktur auf großskalige Phänomene der Kosmologie auswirkt: Rotverschiebung, kosmische Hintergrundstrahlung und effektive Größen wie die Hubble-Skala.

9.1 Rotverschiebung ohne expandierenden Raum

Die Standardkosmologie deutet die kosmologische Rotverschiebung hauptsächlich als Folge einer expandierenden Raumzeit. Die Wellenlänge eines Photons wird mit dem kosmischen Skalenfaktor mitgedehnt; Entfernungen wachsen mit der Zeit.

Im Rahmen der Zeit-Masse-Dualität wird ein anderes Bild vorgeschlagen. Die beobachtete Rotverschiebung wird hier im Wesentlichen als Folge einer sich verändernden fraktalen Tiefenstruktur des Raumes verstanden:

- Die effektive Tiefe der Zeit-Masse-Struktur nimmt im Laufe der kosmischen Entwicklung zu.
- Licht, das durch Regionen mit unterschiedlicher fraktaler Tiefe läuft, erfährt dabei systematische Verschiebungen seiner Frequenz.
- Der beobachtete Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Entfernung spiegelt somit vor allem Unterschiede in der Tiefenstruktur wider, nicht zwangsläufig ein "Auseinanderfliegen" des Raumes.

Mehrere unabhängige Beobachtungen – etwa Spannungen in der Bestimmung der Hubble-Konstanten und bestimmte großskalige Strukturen – legen nahe, dass die reine Expansionsdeutung unvollständig ist. Die FFGFT bietet hier eine konsistente Alternative, in der die Rotverschiebung als Tiefen-Effekt der Zeit-Masse-Dualität verstanden wird.

9.2 CMB-Temperatur und charakteristische Skalen

Die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (CMB) besitzt heute eine Temperatur von rund $2{,}73\,\mathrm{K}$. In der Standarddeutung ist dies die abgekühlte Reststrahlung eines früheren, viel heißeren Zustands des Universums.

In der Zeit-Masse-Dualität wird die CMB-Temperatur als makroskopische Manifestation der durch ξ bestimmten Skalenstruktur interpretiert. Vereinfacht gesagt sitzt die CMB auf einer energetischen Skala, die aus den gleichen fraktalen Mechanismen hervorgeht, die auch die Leptonenmassen und die Feinstrukturkonstante organisieren.

Narrativ formuliert:

- Die Zahl ξ fixiert eine Hierarchie von Energieskalen im Vakuum.
- Diese Hierarchie bestimmt die typische Energie der Hintergrundphotonen, die wir als CMB messen.
- Die beobachtete Temperatur ist somit kein Zufallsprodukt, sondern Ausdruck derselben geometrischen Ordnung, die auch im Bereich der Teilchenphysik greift.

9.3 Effektive Hubble-Skala und Entfernungen

Auch Größen wie der sogenannte Hubble-Radius lassen sich in der FFGFT neu lesen. Anstatt einer fest eingebauten Expansionsrate beschreibt die effektive Hubble-Skala hier eine Kombination aus fraktaler Tiefenentwicklung und lichtlaufzeitbedingten Effekten.

Licht, das von weit entfernten Objekten stammt, durchläuft Regionen mit unterschiedlicher Zeit-Masse-Struktur. Die daraus entstehenden Verzögerungen und Frequenzverschiebungen führen zu denselben beobachtbaren Zusammenhängen wie in einem expandierenden Modell, werden aber als geometrische Tiefenwirkung gedeutet.

9.4 Beobachtungen

Die fraktale Kosmologie der FFGFT steht nicht im Widerspruch zu den präzisen Messungen der CMB-Anisotropien, der Supernova-Daten und der großskaligen Strukturbildung, bietet aber eine andere Interpretation ihrer Ursachen. Mehrere Befunde – etwa Spannungen zwischen verschiedenen Hubble-Bestimmungen oder Hinweise auf skalenabhängige Effekte – lassen sich in diesem Rahmen natürlich einordnen; eine detaillierte Diskussion und der Vergleich mit Standardmodell-Kosmologie finden sich in den T0-Dokumenten zur geometrischen Kosmologie [Pascher(2025e)].

Die bisherigen Ergebnisse sprechen dafür, dass die gängigen Interpretationen an entscheidenden Stellen unvollständig sind und eine fraktale Tiefenstruktur eine zentrale Rolle spielt.

9.5 Ausblick und weiterführende Texte

Die hier dargestellte Zeit-Masse-Dualität bildet einen konzentrierten Kern der FFGFT. Für eine breitere Einbettung in sieben grundlegende Rätsel der Physik sowie für die ausführliche geometrische Gehirn-Analogie stehen zwei ergänzende Darstellungen zur Verfügung: ein Band, der die sieben Rätsel systematisch diskutiert, und ein Band, der das kosmische "Gehirn" als anschauliche Metapher für die fraktale Tiefenstruktur der Raumzeit entfaltet. Beide Texte greifen dieselben Parameter und Strukturen auf, vertiefen aber jeweils unterschiedliche Aspekte und können zusammen mit der vorliegenden Darstellung als zusammenhängendes Ganzes gelesen werden.

Kapitel 10

Präzisionstests und Beobachtungen

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die zentralen Bausteine der Zeit-Masse-Dualität vorgestellt: die Zahl ξ, die fraktale Dimension $D_f = 3 - \xi$, die Leptonenmassen, die Feinstrukturkonstante, fraktale Vakuumskalen und ihre Rolle in Quantenmechanik, Quantenfeldern und Kosmologie. In diesem Kapitel werden ausgewählte Beobachtungen und Rechnungen zusammengestellt, die als erste Prüfsteine für dieses Bild dienen.

Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Frage, *wo* die Theorie bereits eine bemerkenswerte Quantitätsnähe erreicht und *wo* bewusste Vorsicht angebracht ist, weil Rechnungen oder Datenlage noch nicht abschließend geklärt sind.

10.1 Leptonen und Feinstrukturkonstante

Ein erster, besonders klarer Test betrifft die Leptonenmassen und die Feinstrukturkonstante. Ausgehend von der Hierarchie der Leptonenmassen ergibt sich eine emergente Skala

$$E_0 \approx 7{,}4\,\text{MeV}, \tag{10.1}$$

und aus der in Kapitel 2 diskutierten Beziehung

$$\alpha = \xi \left(\frac{E_0}{1\,\text{MeV}} \right)^2 \tag{10.2}$$

folgt numerisch

$$\frac{1}{\alpha} \approx 137{,}036, \tag{10.3}$$

in sehr guter Übereinstimmung mit den präzisen CODATA-Werten.

Narrativ gesprochen: Hier zeigt sich, dass die Kombination aus ξ, fraktaler Dimension und Massenhierarchie nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ getragen wird. Gleichzeitig bleiben experimentelle und theoretische

Unsicherheiten zu berücksichtigen, etwa durch neue Messungen oder höherordentliche Korrekturen; dieses Zusammenspiel wird laufend aktualisiert und ist kein abgeschlossener Punkt.

10.2 Anomale magnetische Momente und Muon-$g-2$

Die anomalen magnetischen Momente von Elektron und Myon gehören zu den präzisesten Testfeldern der modernen Physik. Die Diskussion um das Muon-$g-2$ zeigt, dass selbst kleine Unterschiede zwischen Theorie und Experiment intensive Debatten auslösen können.

Im Rahmen der FFGFT lässt sich die Struktur dieser Korrekturen geometrisch einordnen: Schleifenbeiträge und Vakuumpolarisation werden durch die fraktale Dimension reguliert und erhalten feste Skalenbezüge. Gleichzeitig wird hier bewusst Zurückhaltung geübt: Die genaue Höhe der Abweichung hängt von vielen Details der Standardrechnungen und neuen Datenauswertungen ab.

An dieser Stelle ist es wichtiger, den prinzipiellen Mechanismus zu verstehen – nämlich dass dieselbe Geometrie, die Leptonenmassen und Kopplungen organisiert, auch in präzisen Schleifenkorrekturen sichtbar wird – als frühzeitig weitreichende Schlüsse aus einzelnen Zahlen zu ziehen.

10.3 Casimir-Effekt und Laborvakuum

Der Casimir-Effekt liefert eine direkte Laborprobe für Vakuumkräfte im Mikrometerbereich. In Kapitel 5 wurde gezeigt, dass sich mit einer durch ξ bestimmten Vakuumskala L_ξ im Bereich von etwa $100\,\mu$m eine Beziehung der Form

$$\rho_{\text{CMB}} = \frac{\xi\,\hbar c}{L_\xi^4} \tag{10.4}$$

so formulieren lässt, dass die modifizierte Casimir-Formel exakt wieder die etablierte Standardform

$$|\rho_{\text{Casimir}}(d)| = \frac{\pi^2\hbar c}{240\,d^4} \tag{10.5}$$

reproduziert.

Dies verbindet CMB und Casimir-Effekt zu zwei Seiten derselben fraktalen Vakuumstruktur. Die präzisen Messungen des Casimir-Effekts fungieren damit als Laborbestätigung dafür, dass die durch ξ organisierte Tiefenstruktur physikalisch wirksam ist. Hier liegt eine der robustesten Rückkopplungen zwischen Theorie und Experiment im Rahmen der FFGFT vor.

10.4 Kosmologische Spannungen und Tiefenstruktur

Auf kosmologischer Seite haben sich in den letzten Jahren mehrere Spannungen herausgebildet, etwa unterschiedliche Werte der Hubble-Konstanten aus lokalen Messungen und aus CMB-Analysen. Die fraktale Kosmologie der FFGFT interpretiert solche Spannungen als Hinweis darauf, dass die reine Expansionsdeutung der Rotverschiebung unvollständig ist und Tiefenstruktur eine Rolle spielt.

Wichtig ist hier eine differenzierte Sicht:

- Die FFGFT steht nicht im Widerspruch zu den präzisen Daten, sondern bietet eine alternative Lesart der zugrundeliegenden Geometrie.
- Ob diese Lesart allen zukünftigen Messungen standhält, bleibt Gegenstand laufender Analysen.
- Erste Vergleiche zeigen, dass viele beobachtete Effekte natürlich in die Zeit-Masse-Dualität eingebettet werden können, ohne neue dunkle Komponenten einzuführen.

10.5 Quantencomputer, Simulationen und numerische Tests

Im Bereich der Quanteninformation liefern Simulationen von Algorithmen wie dem Shor-Verfahren weitere Anknüpfungspunkte. Wie in Kapitel 4 beschrieben, lassen sich logische Zustände als Besetzungen fraktaler Grundfunktionen $G_n(t)$ deuten, und typische Algorithmen nutzen Interferenzmuster, die aus dieser Struktur hervorgehen.

Numerische Simulationen zeigen, dass Erfolgschancen und Interferenzstrukturen der Standardalgorithmen reproduziert werden können, wenn man die durch ξ vorgegebenen Skalen konsistent einbaut. Diese Ergebnisse sind eher konzeptionelle Bestätigungen als präzise Messwerte; sie zeigen, dass die Zeit-Masse-Dualität auch dort tragfähig ist, wo Quanteninformation und Feldtheorie aufeinandertreffen.

10.6 Attosekunden-Entstehung von Quantenverschränkung

Eine aktuelle theoretische Studie von Jiang et al. [Jiang et al.(2024)] zeigt, dass Quantenverschränkung in einem Helium-System unter intensiven EUV-Pulsen nicht instantan entsteht, sondern sich über ein lokales Zeitfenster von rund 232 as aufbaut. Die Endenergie des gebundenen Elektrons korreliert dabei direkt mit der Austrittszeit des entweichenden Elektrons, so dass sich die gemeinsame Quantengeschichte rekonstruieren lässt; vorgeschlagen wird ein Doppelpuls-Experiment mit Koinzidenzdetektion. Aus Sicht der Zeit-Masse-Dualität liefert dies einen starken konzeptionellen Hinweis darauf, dass Verschränkung ein zeitlich aufgelöster, kausaler Prozess innerhalb eines endlichen Interaktionsfensters ist und keine „spukhafte Fernwirkung" erfordert. Eine ausführliche Diskussion findet sich im eigenständigen T0-Dokument *Attosekunden-Vorhersage zur Entstehung von Quantenverschränkung als Beleg für die T_0-Time-Mass-Duality-Theorie* [Pascher(2026b)].

10.7 Zusammenfassung

Die hier skizzierten Präzisionstests und Beobachtungen liefern verschiedene Blickwinkel auf ein und denselben geometrischen Kern. An einigen Stellen – etwa bei Leptonenmassen, Feinstrukturkonstante und Casimir-Effekt – ist die Übereinstimmung bereits beeindruckend konkret. An anderen Punkten – insbesondere bei Muon-$g-2$ und kosmologischen Spannungen – wird bewusst vorsichtig argumentiert und Raum für künftige Daten gelassen.

Insgesamt zeichnet sich das Bild ab, dass die Zeit-Masse-Dualität nicht nur ein elegantes theoretisches Konstrukt ist, sondern an vielen Fronten mit der beobachteten Physik in Verbindung steht.

Kapitel 11

Rechnen mit der Zeit-Masse-Dualität

Dieses Kapitel bietet einige durchgehende Rechenbeispiele, die zeigen, wie sich mit wenigen Formeln der Zeit-Masse-Dualität konkrete Größen abschätzen lassen. Die Beispiele sind bewusst einfach gehalten und ersetzen keine vollständigen technischen Ableitungen, machen aber die Funktionsweise des Ansatzes transparent.

11.1 Von ξ und E_0 zur Feinstrukturkonstante

Ausgangspunkt ist die Zahl

$$\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4} \tag{11.1}$$

und die aus der Leptonenhierarchie gewonnene Skala

$$E_0 \approx 7{,}4\,\text{MeV}. \tag{11.2}$$

Die in früheren Kapiteln eingeführte Beziehung lautet

$$\alpha(\xi, E_0) = \xi \left(\frac{E_0}{1\,\text{MeV}} \right)^2. \tag{11.3}$$

Setzt man die Werte ein, erhält man schematisch

$$\alpha \approx \left(\tfrac{4}{3} \times 10^{-4}\right) \times (7{,}4)^2. \tag{11.4}$$

Die Quadratur liefert

$$(7{,}4)^2 \approx 54{,}76, \tag{11.5}$$

so dass

$$\alpha \approx \tfrac{4}{3} \times 10^{-4} \times 54{,}76 \approx 0{,}007297 \tag{11.6}$$

und damit

$$\frac{1}{\alpha} \approx 137{,}0. \tag{11.7}$$

Feinheiten wie Rundungsfehler und höherordentliche Korrekturen verschieben die letzte Nachkommastelle; entscheidend ist hier, dass die Struktur

$$\alpha \sim \xi E_0^2 \tag{11.8}$$

mit der beobachteten Feinstrukturkonstante vereinbar ist. Das Beispiel zeigt, wie direkt ξ und eine einzige Skala E_0 in eine zentrale Naturkonstante eingehen.

11.2 Von der CMB-Energiedichte zur Skala L_xi

Ein zweites Beispiel betrifft die Verbindung zwischen CMB und Casimir-Effekt. Ausgehend von der beobachteten Energiedichte der kosmischen Hintergrundstrahlung ρ_{CMB} und der Beziehung

$$\rho_{\text{CMB}} = \frac{\xi \, \hbar c}{L_\xi^4} \tag{11.9}$$

öffnet sich die Möglichkeit, eine charakteristische Vakuumlänge L_ξ abzuschätzen.

Löst man die Gleichung nach L_ξ auf, erhält man

$$L_\xi = \left(\frac{\xi \, \hbar c}{\rho_{\text{CMB}}} \right)^{1/4}. \tag{11.10}$$

Setzt man die bekannten Werte für $\hbar$, c und ρ_{CMB} ein, ergibt sich ein Wert von der Größenordnung

$$L_\xi \sim 100 \, \mu\text{m}. \tag{11.11}$$

Dies ist genau jene Skala, auf der präzise Casimir-Experimente besonders empfindlich sind. Damit verbindet die Zeit-Masse-Dualität eine kosmologische Größe (CMB-Energiedichte) mit einem Laborphänomen im Mikrometerbereich.

11.3 Fraktale Dimension als Alltagsnäher Wert

Die fraktale Dimension der Raumzeit lautet

$$D_f = 3 - \xi \approx 2{,}999867. \tag{11.12}$$

Im Alltag erscheint dieser Unterschied zur glatten 3D-Geometrie verschwindend klein. Für Integrale über extrem hohe Impulse oder sehr kleine Abstände wirkt er jedoch wie ein zusätzlicher Exponent, der über Konvergenz oder Divergenz entscheidet.

Eine einfache Heuristik lautet:

- Wo klassische Theorien Integrale der Form $\int \mathrm{d}^3k$ verwenden, tritt in der FFGFT effektiv ein leicht verändertes Maß $\int \mathrm{d}^{D_f}k$ auf.
- Die winzige Absenkung von D_f reicht aus, um viele divergente Beiträge in endlich regulierte Größen zu übersetzen.

Diese Alltagsperspektive macht deutlich, dass die Zahlenwerte von ξ und D_f nicht losgelöst von den bekannten Dimensionen stehen, sondern diese nur minimal verschieben – mit großer Wirkung im UV-Bereich.

11.4 Wie man weiterrechnet

Die hier gezeigten Beispiele sind bewusst einfach gehalten und sollen dazu einladen, eigene Überschlagsrechnungen anzustellen. Wer tiefer in die Details einsteigen möchte, findet in den technischen Bändern der FFGFT vollständige Ableitungen und numerische Studien.

Für die praktische Arbeit bietet es sich an,

- zentrale Formeln der Zeit-Masse-Dualität (z.B. für α, E_0, L_ξ) als Ausgangspunkt zu nehmen,
- zunächst rein verhältnisbasiert und mit ganzzahligen oder rationalen Zahlen zu rechnen (ohne frühe Gleitkomma-Approximationen und ohne frühe Einführung von Konstanten wie π), um numerische Präzision bei sehr kleinen Größen zu behalten,
- die Auswirkungen kleiner Variationen von ξ oder der Skalen abzuschätzen und
- neue Daten – etwa zu präzisen Konstanten oder Casimir-Messungen – systematisch gegen diese Strukturen zu prüfen.

Auf diese Weise wird die Zeit-Masse-Dualität zu einem handhabbaren Werkzeug: Sie liefert nicht nur eine konzeptionelle Erklärung, sondern auch konkrete Rechenwege, mit denen sich bekannte und neue Phänomene quantitativ einordnen lassen.

Kapitel 12

Natürliche Einheiten und neu gelesene Konstanten

In den bisherigen Kapiteln wurden bereits mehrere Skalen eingeführt, die sich direkt aus der Zeit-Masse-Dualität und dem Parameter ξ ergeben: die Energieskala E_0 im MeV-Bereich, eine minimale Längenskala $L_0 = \xi L_P$ im Sub-Planck-Bereich und eine Vakuumlängenskala L_ξ im Bereich von $100\,\mu$m. Dieses Kapitel erläutert, warum die Verwendung *natürlicher Einheiten* der Schlüssel zum Verständnis dieser Zusammenhänge ist – und warum einige vertraute Einheiten (etwa das Coulomb) in diesem Rahmen neu gelesen werden müssen.

12.1 Warum natürliche Einheiten?

Das internationale Einheitensystem (SI) ist auf praktische Messbarkeit und technische Anwendungen optimiert: Meter, Kilogramm, Sekunde, Ampere und Kelvin sind historisch gewachsene Größen, die sich an Laborstandards orientieren. Für die Struktur der fundamentalen Gesetze sind sie jedoch oft ungünstig, weil sie zentrale Konstanten wie c, $\hbar$ und die Elementarladung e in die Einheiten selbst „hineinverstecken".

Natürliche Einheiten verfolgen einen anderen Ansatz:

- Man setzt fundamentale Konstanten wie c und $\hbar$ gleich Eins.
- Längen, Zeiten und Energien werden direkt ineinander umgerechnet.
- Viele scheinbar komplizierte Konstanten verschwinden aus den Formeln und machen Platz für dimensionslose Verhältnisse.

Wichtig ist dabei: $c = 1$ bedeutet nicht, dass „Energie und Masse immer gleich sind", sondern dass im Ruhesystem eines Teilchens $E = m$ die bekannte Relation $E = mc^2$ abkürzt; dynamisch bleibt die volle Gleichung $E^2 = p^2 + m^2$ erhalten. Sinngemäß gilt dies auch für $\hbar = 1$ und (in geeigneter Normierung) $\alpha \approx 1/137$: Das Setzen auf Eins ist eine Schreibweise, keine neue Physik – der logische Schritt zurück zu den physikalischen Größen muss immer explizit mitgedacht und am Ende durch Einheitenprüfung vollzogen werden.

Im Kontext der Zeit-Masse-Dualität dienen Größen wie E_0, L_0 und L_ξ als natürliche Maßstäbe eines fraktal organisierten Raumes; ihre volle Bedeutung zeigt sich jedoch erst, wenn man nach einer Rechnung in natürlichen Einheiten wieder sorgfältig in die gewohnten SI-Einheiten zurückkonvertiert und die Skalen mit den Messdaten vergleicht.

12.2 Die doppelte Sicht auf α, c und $\hbar$

Die Feinstrukturkonstante α ist das klassische Beispiel dafür, wie sehr die Wahl der Einheiten das Verständnis beeinflusst. In SI-Schreibweise lautet eine verbreitete Form

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c}, \tag{12.1}$$

wo e die Elementarladung, ε_0 die elektrische Feldkonstante, $\hbar$ das reduzierte Plancksche Wirkungsquantum und c die Lichtgeschwindigkeit ist.

Diese Darstellung suggeriert vier voneinander unabhängige Größen. In natürlichen Einheiten mit $c = \hbar = 1$ und einer geeigneten Normierung des elektromagnetischen Feldes reduziert sich die Beziehung jedoch auf

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi}, \tag{12.2}$$

so dass α direkt das Quadrat einer dimensionslosen Kopplung beschreibt.

Die Zeit-Masse-Dualität fügt eine zweite, komplementäre Sicht hinzu:

$$\alpha = \xi \left(\frac{E_0}{1\,\text{MeV}}\right)^2. \tag{12.3}$$

Die fraktale Struktur, die in dieser Beziehung steckt, wird erst sichtbar, wenn man α in dieser Gestalt wieder in konkrete Einheiten und numerische Werte zurückübersetzt. Damit zeigt sich α gleichzeitig

- als Verhältnis von Ladung zu den Licht- und Wirkungsquanten ($e^2/4\pi\hbar c$) und
- als geometrisch organisierte Zahl aus ξ und der fraktal-emergenten Skala E_0.

Diese doppelte Sicht wird besonders transparent, wenn man die Einheiten so wählt, dass c und $\hbar$ nicht als „Faktoren am Rand“, sondern als Strukturgeber der Skalen erscheinen.

12.3 Das Coulomb neu gelesen

Im SI-System ist die Einheit der Ladung, das Coulomb, eine historisch definierte Größe, die über das Ampere und letztlich über makroskopische Ströme festgelegt wird. In einer FFGFT-Perspektive ist das unbefriedigend, weil die grundlegenden Prozesse im elektromagnetischen Sektor nicht von makroskopischen Leiterströmen, sondern von quantisierten Ladungsträgern und ihren Kopplungen an das Feld bestimmt werden.

Natürliche Einheiten bieten hier eine klarere Sicht:

- Man normiert das elektromagnetische Feld so, dass e eine dimensionslose Größe wird.
- Die effektive Einheit der Ladung wird durch α und die Wahl von c und $\hbar$ bestimmt.
- Statt „Coulomb" als eigener Basiseinheit tritt eine Geometrie, in der Ladung ein Maß dafür ist, wie stark ein Feld an der fraktalen Zeit-Masse-Struktur ansetzt.

In diesem Bild ist e kein frei justierbarer Parameter, sondern durch α und die durch ξ festgelegten Skalen fixiert. Das SI-Coulomb lässt sich dann als abgeleitete Größe interpretieren, die bei makroskopischen Strömen praktisch ist, aber die zugrundeliegende Geometrie verdeckt.

12.4 Neu definierte Einheiten für eine klare Geometrie

Die Zeit-Masse-Dualität legt nahe, Einheiten bewusst so zu wählen, dass geometrische Zusammenhänge sichtbar werden:

- Die Basiseinheiten orientieren sich an natürlichen Skalen wie E_0, L_0 und L_ξ.
- c und $\hbar$ werden als Umrechnungsfaktoren zwischen Zeit, Länge und Energie genutzt, nicht als „Zusatzzahlen".
- Elektromagnetische Größen werden so normiert, dass α direkt als quadratische Kopplung erscheint.

Praktisch bedeutet dies zum Beispiel:

- Eine Energieeinheit im MeV-Bereich (nahe E_0) macht die Rolle der Leptonenskala sichtbar.
- Eine Längeneinheit im Bereich von L_ξ hebt die Verbindung zwischen CMB und Casimir-Effekt hervor.
- Zeitabstände werden systematisch mit lokalen Massendichten verknüpft, wie es die Zeit-Masse-Dualität nahelegt.

Solche Entscheidungen sind keine reine Geschmacksfrage, sondern bestimmen, ob Muster in den Daten als zusammenhängendes Ganzes erkannt werden oder hinter einer Vielzahl von Konversionsfaktoren verschwinden.

12.5 Natürliche Einheiten als Denkwerkzeug

Natürliche Einheiten zwingen dazu, Konstanten wie c, $\hbar$ und e nicht als „Zierschrift“ in Formeln zu behandeln, sondern als Ausdruck konkreter geometrischer Strukturen. In der FFGFT werden diese Strukturen durch ξ, die fraktale Dimension D_f und die daraus folgenden Skalen organisiert.

Wer in natürlichen Einheiten rechnet, sieht schneller, wo wirklich neue Physik steckt:

- Einheitenkonversionen verschwinden und machen Platz für dimensionslose Größen.
- Unterschiede zwischen Modellen lassen sich klar in veränderten Kopplungen oder Skalen verorten.
- Die Verbindung zwischen Mikro- und Makrowelt (von Leptonenmassen bis zu Hubble-Skalen) wird als Beziehung weniger Zahlen und Skalen erkennbar.

In diesem Sinne sind natürliche Einheiten nicht nur ein technisches Hilfsmittel, sondern ein Denkwerkzeug: Sie machen den geometrischen Kern der Zeit-Masse-Dualität sichtbar und zeigen, wie α, c, $\hbar$ und e als verschiedene Projektionen derselben fraktalen Struktur verstanden werden können.

12.6 Was beim Setzen von c, $\hbar$, G und α auf Eins verloren geht

In der Praxis ist es verführerisch, alle Konstanten einfach „wegzunormieren“. Für das Xi-Narrativ ist jedoch wichtig, welche Aspekte der fraktalen Struktur dabei unsichtbar werden:

- Setzt man $c = 1$, verschwindet die explizite Lichtgeschwindigkeit aus den Gleichungen. Die Lorentz-Struktur und die Trennung von Raum und Zeit bleiben zwar erhalten, aber der Kontrast zwischen nichtrelativistischen und relativistischen Skalen wird weniger sichtbar.
- Setzt man $\hbar = 1$, verliert man die explizite Skala, ab wann Prozesse „quantenhaft“ werden. Der Grenzübergang $\hbar \to 0$ und der Vergleich „klein gegenüber $\hbar$“ versus „groß gegenüber $\hbar$“ verschwinden als eigene Schrittfolge aus den Formeln.

- Setzt man $G = 1$, wird die Kopplung von Raumzeitkrümmung an Energie-Impuls dimensionslos. Damit geht der direkte Bezug zwischen lokalen Dichten, Krümmungsradien und den fraktal organisierten Skalen L_0 und L_ξ in einer Einheitswahl auf.
- Versucht man schließlich, α „auf Eins zu setzen", wird nicht nur eine Einheit gewählt, sondern eine *physikalische Annahme* über die Stärke der elektromagnetischen Kopplung getroffen. In der FFGFT ginge damit gerade die Information verloren, dass α als fraktale Funktion der Skala gelesen werden kann – die feinstrukturierten Wechselwirkungen werden zu einer einzigen glatten Zahl zusammengepresst.

Historisch war dies auch der Ausgangspunkt der hier dargestellten FFGFT-Perspektive: Erst als in Zwischenrechnungen bewusst und gezielt $\alpha = 1$ gesetzt wurde, traten die zugrundeliegenden dreidimensionalen geometrischen Zusammenhänge klar hervor. Gerade der Vergleich zwischen diesem „geglätteten" Bild und der später rekonstruierten fraktalen Skalenabhängigkeit machte sichtbar, welche zusätzliche Struktur in einer variablen, geometrisch organisierten Feinstrukturkonstante steckt.

Für konkrete Rechnungen bedeutet das: Man kann in einem ersten Schritt mit $\alpha = 1$ in einer geglätteten, dreidimensionalen Geometrie arbeiten, sofern in jeder Formel klar notiert ist, mit welcher Potenz α wirklich eingeht (z.B. $\sigma \propto \alpha^2$, Energieniveaus $\propto \alpha^2$, Laufzeiten $\propto \alpha^{-1}$ usw.). In diesem Schritt werden alle Rechenschritte transparent, aber die fraktale Skalenabhängigkeit von α ist bewusst „ausgeblendet". In einem zweiten, ebenso systematischen Schritt werden die entsprechenden α-Faktoren – mit der richtigen Potenz und an der richtigen Skala – bei der Rückkonvertierung explizit wieder eingesetzt und so die fraktale Kopplungsstruktur rekonstruiert. Erst hier entscheidet man, ob α als konstant oder als laufende, fraktal organisierte Größe gelesen wird.

Im Sinne des Xi-Narrativs kann man sagen: c, $\hbar$ und G lassen sich als Umrechnungsfaktoren im Hintergrund verstecken, ohne die fraktale Struktur prinzipiell zu zerstören; sie werden dann schwerer zu sehen, bleiben aber konzeptionell vorhanden. Würden wir dagegen auch α konsequent auf Eins setzen, würde das Modell auf eine beinahe rein dreidimensionale, glatte Geometrie reduziert – gerade jene feine fraktale Skalenstruktur der Kopplungen, die das Xi-Buch herausarbeitet, ginge im Formalismus verloren, auch wenn sie in den Daten weiterhin wirkt.

12.7 Rechenbeispiele: α bewusst aus- und wieder einschalten

Um dieses zweistufige Vorgehen greifbar zu machen, lohnt sich ein Blick auf konkrete Beispielrechnungen:

1. **Geometrischer Schritt mit $\alpha = 1$:** Zunächst werden alle relevanten Observablen so umgeschrieben, dass ihre Abhängigkeit von α explizit ist, etwa $\sigma(E) = C(E)\,\alpha^2$ für einen Wirkungsquerschnitt, eine Energieverschiebung $\Delta E \propto \alpha^2$ oder eine Lebensdauer $\tau \propto \alpha^{-1}$. In diesem ersten Schritt setzt man $\alpha = 1$ und untersucht nur die geometrischen Vorfaktoren $C(E)$ und deren Abhängigkeit von Skalen wie E_0, L_0 und L_ξ.
2. **Rekonstruktionsschritt mit physikalischem α:** In einem zweiten Durchgang werden die vollen α-Faktoren mit der richtigen Potenz und an der passenden Skala wiederhergestellt und mit ihrem physikalischen Wert ausgewertet. Hier gehen die fraktale Laufung von α mit Energie oder Länge und die Interpretation der Daten als Projektion einer tieferen fraktalen Geometrie ein.

Im Alltag kann ein Theoretiker daher im ersten Durchgang durchaus „vergessen", dass α von der Skala abhängt, um zunächst nur die reine dreidimensionale Geometrie freizulegen – sofern die Buchführung über die Potenzen von α sauber erfolgt. Das Spezifische an der FFGFT-/Xi-Perspektive ist die Betonung, dass der zweite Schritt nicht optional ist: Gerade in der kontrollierten Wieder-Einführung von $\alpha(E)$ liegt der Schlüssel dazu, wie eine deterministische, fraktale Feldtheorie probabilistisch aussehende Daten reproduzieren und dennoch Raum für effektive Freiheit, emergente Entscheidungen und bewusste Agency auf makroskopischen Skalen lassen kann.

Kapitel 13

Warum Einheitenprüfung essenziell ist

Natürliche Einheiten machen viele Formeln optisch einfacher: Konstanten wie c und $\hbar$ verschwinden aus der Schreibweise, und Kopplungen wie α werden zu scheinbar reinen Zahlen. Gerade im Rahmen der Zeit-Masse-Dualität ist dies nützlich – aber es birgt auch die Gefahr, dass man vergisst, welche physikalischen Skalen im Hintergrund wirken. Dieses Kapitel erläutert, warum eine systematische Einheitenprüfung unverzichtbar ist und wie sich daran die fraktale Struktur erst vollständig offenbart.

13.1 Natürliche Einheiten als Zwischenraum

Wenn man in natürlichen Einheiten mit $c = \hbar = 1$ rechnet, werden viele Beziehungen sehr kompakt. Zum Beispiel erscheint die Feinstrukturkonstante in einer geeigneten Normierung einfach als

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi}, \tag{13.1}$$

und die durch ξ organisierte Struktur als

$$\alpha = \xi \left(\frac{E_0}{\text{MeV}}\right)^2. \tag{13.2}$$

In diesem Zwischenraum der natürlichen Einheiten ist die Geometrie besonders klar zu sehen. Damit eine Aussage physikalisch überzeugend wird, muss man jedoch den Rückweg antreten: von der kompakten Schreibweise zur tatsächlichen Messgröße in SI-Einheiten.

13.2 Rückkonvertieren als Härtetest

Die fraktale Struktur und die durch ξ definierten Skalen zeigen ihre Tragfähigkeit erst dann, wenn die Umrechnung nach SI-Einheiten konsistent alle bekannten Zahlen reproduziert. Das bedeutet konkret:

- Man startet mit einer einfachen Beziehung in natürlichen Einheiten (z.B. $\alpha \sim \xi E_0^2$).
- Man setzt systematisch alle Faktoren von c, $\hbar$ und den gewählten Basisgrößen wieder ein.
- Man setzt insbesondere α in der Gestalt $\alpha = \xi(E_0/\text{MeV})^2$ wieder vollständig ein, statt sie als bloße Zahl zu behandeln.
- Man prüft, ob die resultierenden Werte für Energien, Längen und Zeiten mit den experimentellen Daten übereinstimmen.

Erst dieser Härtetest zeigt, ob eine scheinbar elegante Formel wirklich mehr ist als eine Zahlenspielerei. Für die Zeit-Masse-Dualität bedeutet das: Die Abkürzung durch natürliche Einheiten ist hilfreich, aber der physikalische Inhalt entscheidet sich bei der Rückübersetzung in konkrete Einheiten. Gefährlich sind dabei "clevere"Kürzungen: Wenn man Konstanten wie c, $\hbar$ oder sogar α vorschnell wegstreicht, kann die fraktale Struktur unsichtbar werden und scheinbar zwingende, aber physikalisch falsche Skalen entstehen. Gerade in natürlichen Einheiten ist es verlockend, aus $E = mc^2$ sofort $E = m$ oder aus $\alpha = \xi(E_0/\text{MeV})^2$ eine reine Zahl zu machen; der korrekte physikalische Schluss erfordert aber immer, die zugrunde liegenden Annahmen (Ruhesystem, Impuls, konkrete Skalen) mitzudenken und am Ende explizit wieder einzusetzen.

13.3 Beispiel: CMB, Casimir und L_ξ

Ein besonders anschauliches Beispiel ist die Beziehung

$$\rho_{\text{CMB}} = \frac{\xi\,\hbar c}{L_\xi^4}, \tag{13.3}$$

mit der sich eine charakteristische Längenskala L_ξ abschätzen lässt.

In natürlichen Einheiten wirken $\hbar$ und c wie harmlose Faktoren. Erst wenn man die SI-Werte für $\hbar$, c und ρ_{CMB} einsetzt und die Dimensionen sorgfältig nachverfolgt, zeigt sich, dass L_ξ tatsächlich im Bereich von $100\,\mu\text{m}$ liegt – genau dort, wo Casimir-Experimente hochpräzise messen.

Ohne eine konsequente Einheitenprüfung könnte man diesen Zusammenhang leicht übersehen oder falsch einschätzen. Die fraktale Struktur wird also nicht nur im Kopf sichtbar, sondern in der konkreten Rückrechnung auf reale Messgrößen.

13.4 Vermeidung von Scheinzusammenhängen

Umgekehrt hilft eine strenge Einheitenprüfung, zufällige numerische Überlappungen von echten Zusammenhängen zu unterscheiden. Zwei Zahlen mögen in natürlichen Einheiten ähnlich aussehen; wenn ihre Dimensionen sich unterscheiden, ist klar, dass sie nicht direkt vergleichbar sind.

Die Zeit-Masse-Dualität arbeitet daher konsequent mit dimensionslosen Kombinationen (wie α) und klar definierten Skalen (wie E_0, L_0, L_ξ), bevor Vergleiche gezogen werden. Jeder Schritt wird durch Einheitenbuchhaltung begleitet:

- Welche Größe ist wirklich dimensionslos?
- Welche Kombinationen von c, $\hbar$ und Basiseinheiten treten auf?
- Wo können scheinbar ähnliche Zahlen in Wirklichkeit verschiedene physikalische Inhalte haben?

13.5 Einheiten als Integritätscheck der Theorie

Am Ende ist die Einheitenprüfung mehr als eine technische Formalität. Sie fungiert als Integritätscheck der gesamten Theorie:

- Sie erzwingt Konsistenz zwischen geometrischem Bild und messbaren Größen.
- Sie macht sichtbar, ob eine vorgeschlagene Beziehung wirklich skalenverträglich ist.
- Sie schützt vor überdehnten Interpretationen scheinbar schöner Zahlen.

Für die FFGFT und die Zeit-Masse-Dualität bedeutet dies: Erst die Kombination aus natürlichen Einheiten *und* konsequenter Rückprüfung in SI-Einheiten legt offen, wie tief die fraktale Struktur in die beobachtete Physik eingreift. Natürliche Einheiten sind damit ein nützlicher Arbeitsraum – die Realitätsprüfung findet in den vertrauten Einheiten unserer Messinstrumente statt.

Gleichzeitig bleibt ein philosophischer Vorbehalt: Jede Messung vergleicht letztlich Frequenzen oder Zählraten und liefert damit nur *relative* Aussagen; was ontologisch "wirklich"langsamer läuft oder schwerer wird, entzieht sich der direkten Testbarkeit. Für die FFGFT heißt dies: Entscheidend ist nicht, ob wir absolut feststellen können, ob sich die Zeit verlangsamt oder die Masse zunimmt; entscheidend ist, dass die mathematische Struktur konsistent ist und alle beobachtbaren Relationen (Frequenzen, Skalen, Verhältnisse) reproduziert.

Kapitel 14

FFGFT als Lagrange-Erweiterung

Die Zeit-Masse-Dualität und die Fundamental Fractal-Geometric Field Theory (FFGFT) sollen keine bewährten Theorien ersetzen, sondern sie empherweitern. Statt ein neues Über-"Modell gegen Quantenfeldtheorie, Standardmodell oder Allgemeine Relativität zu stellen, versteht sich die FFGFT als strukturelle Ergänzung: Sie legt eine fraktale Geometrie zugrunde, in der die bekannten Lagrange-Dichten als effektive Beschreibung bestimmter Skalen erscheinen.

14.1 Lagrange-Dichten als gemeinsame Sprache

Die moderne Physik formuliert nahezu alle erfolgreichen Theorien in der Sprache der Lagrange-Dichten:

- die Dirac- und Klein-Gordon-Gleichung für Quantenfelder,
- die Yang–Mills-Theorien des Standardmodells,
- die Einstein–Hilbert-Wirkung der Allgemeinen Relativität.

In all diesen Fällen ist die Lagrangedichte nicht nur mathematische Bequemlichkeit, sondern die kompakteste Formulierung von Symmetrien und Erhaltungssätzen. Die FFGFT schließt hier an: Sie *verändert* die bekannte Form dieser Lagrangedichten nicht direkt, sondern ergänzt sie um eine fraktale Struktur des Hintergrundes und um zusätzliche, durch ξ organisierte Terme.

14.2 Fraktale Geometrie als Zusatzstruktur

Im Xi-Narrativ wurde die fraktale Dimension $D_f = 3 - \xi$ als globales Maßfür die Faltungstiefe des Raumes eingeführt. Auf Ebene der Lagrange-Dichten bedeutet dies, dass Integrale der Form

$$S = \int \mathrm{d}^3 x \, \mathcal{L} \tag{14.1}$$

in eine leicht veränderte Form

$$S_{\text{frak}} = \int \mathrm{d}^{D_f} x \, \mathcal{L}_{\text{eff}} \tag{14.2}$$

übergehen, wobei $\mathcal{L}_{\text{eff}}$ die gleiche Symmetriestruktur wie die ursprüngliche Lagrangedichte trägt, aber durch die fraktale Maßstruktur zusätzlich reguliert wird.

Praktisch heißt das:

- Die Form der Dirac-, Maxwell- oder Yang–Mills-Lagrange bleibt erhalten.
- Die fraktale Geometrie ändert die Art, wie Selbstenergien und Schleifenintegrale konvergieren.
- Die bekannten Ergebnisse der Quantenfeldtheorie werden im passenden Grenzfall ($\xi \to 0$, $D_f \to 3$) reproduziert.

14.3 Erweiterung statt Konkurrenz

Bewährte Theorien wie das Standardmodell oder die Allgemeine Relativität haben eine beeindruckende experimentelle Basis. Die FFGFT nimmt diese Erfolge ernst und versteht sich nicht als Ersatz, sondern als Erweiterung in zwei Schritten:

1. **Geometrische Vertiefung:** Die Raumzeit erhält eine fraktale Tiefenstruktur mit $D_f = 3 - \xi$, aus der Skalen wie E_0, L_0 und L_ξ hervorgehen.
2. **Lagrange-Ergänzung:** Die bekannten Lagrange-Dichten werden so gelesen, dass ihre Parameter (Massen, Kopplungen) nicht frei sind, sondern von dieser fraktalen Geometrie organisiert werden.

In diesem Sinn ist die FFGFT eine *Theorie der Lagrange-Dichten*: Sie fragt nicht nach einer einzigen "Lagrange-Dichte für alles", sondern danach, wie die Vielzahl bewährter effektiver Lagrange-Dichten in einer gemeinsamen fraktalen Geometrie verankert ist.

14.4 Worin sich die FFGFT von der Allgemeinen Relativität unterscheidet

Aus Sicht der Allgemeinen Relativität bringt die FFGFT mehrere strukturelle Veränderungen mit sich, die für die Zeit-Masse-Dualität zentral sind:

- Die Raumzeitmannigfaltigkeit erhält eine fraktale Tiefenstruktur mit effektiver Raumdimension $D_f = 3 - \xi$; Krümmungen und Volumina werden bezüglich dieser Tiefenstruktur ausgewertet.
- Ruhemasse ist nicht mehr ein strikt fester Parameter entlang einer Weltlinie, sondern ein effektives Massenfeld $m(x)$, das aus dem Zeitfeld hervorgeht; nur in einfachen Situationen wird dies gut durch einen konstanten Wert angenähert.
- Die Gravitationskonstante G wird als emergente Kopplung interpretiert, die sich in Begriffen von ξ und den natürlichen Skalen E_0, L_0 und L_ξ ausdrücken lässt, statt als fundamentale Konstante postuliert zu werden.
- In den einleitenden Kapiteln wird mit einer vereinfachten Lagrangedichte gearbeitet, in der ξ vor allem Massen, Kopplungen und Cutoffs organisiert; die erweiterte Lagrangedichte der vollständigen FFGFT fügt die fraktale Maßstruktur und explizite Vakuumterme hinzu, die das Laufen von Kopplungen und Massen kodieren.

Historisch hält Einsteins Formulierung die Ruhmassen fest und legt alle Dynamik in die Krümmung der Raumzeit; sobald Quantenfelder und Selbstenergien hinzukommen, führt dies zu komplizierten Regularisierungs- und Renormierungstricks, um Widersprüche und Divergenzen zu zähmen. Diese Unterschiede präzisieren, in welchem Sinne die FFGFT über die Allgemeine Relativität hinausgeht, während sie alle lokalen Gravitations-Tests im passenden Grenzfall weiterhin reproduziert.

14.5 Was sich *nicht* ändert

Wichtig für das Verständnis ist, was sich explizit
emphnicht ändert:

- Die lokal gemessenen Effekte der Allgemeinen Relativität (z.B. GPS-Korrekturen, Lichtablenkung, Periheldrehung) bleiben unberührt.
- Die Vorhersagen des Standardmodells für Streuquerschnitte, Zerfallsbreiten und Präzisionsobservablen werden respektiert.
- Auch die QED mit ihrer extrem genauen Beschreibung von $g - 2$ bleibt im zulässigen Parameterbereich der FFGFT enthalten.

Die Erweiterung setzt dort an, wo Beobachtungen auf neue Skalen hinweisen: bei der Hierarchie der Massen, der Zahl 137, der Verbindung zwischen CMB und Casimir-Effekt oder bei subtilen Abweichungen in Präzisionstests. In diesen Bereichen bietet die FFGFT eine zusätzliche Struktur an, ohne die etablierten Lagrange-Theorien fallenzulassen.

14.6 Ausblick: Eine fraktale Theorie von allem

Ein vollständiges Lagrange-Bild der FFGFT würde alle genannten Bausteine – fraktale Geometrie, Zeit-Masse-Dualität, Skalen E_0, L_0, L_ξ und die bestehenden Lagrange-Dichten von QFT und Gravitation – in einer gemeinsamen Wirkungsfunktion zusammenfassen. Auf der Ebene der Feldgleichungen bleibt diese Beschreibung deterministisch; erst die fraktale, rekursive Variation der Anfangsbedingungen auf vielen Skalen eröffnet einen effektiven Spielraum für Bewusstsein, Selbstbestimmung und emergente Entscheidungen, ohne die zugrunde liegende Dynamik zu verletzen. Aus praktischen Gründen und wegen der extrem komplexen Kopplung der deterministischen Gleichungen sind bei konkreten Rechnungen häufig probabilistische Methoden, effektive Feldtheorien oder Monte-Carlo-Verfahren die einzig realistische Vorgehensweise, auch wenn sie auf einem letztlich deterministischen Unterbau beruhen. Das Xi-Narrativ liefert hierzu die konzeptionellen Leitplanken: FFGFT soll als Erweiterung gelesen werden, die bewährte Lagrange-Theorien in einen größeren geometrischen Zusammenhang stellt, nicht als Theorie, die sie ersetzt.

Kapitel 15

Quellen und weiterführende Literatur

Dieses Kapitel führt die wichtigsten externen Quellen auf, die im Xi-Narrativ zitiert werden, und verweist auf ergänzende T0-Dokumente im Repository.

Literaturverzeichnis

[Modesto(2008)] L. Modesto, “Fractal Structure of Loop Quantum Gravity,” Class. Quantum Grav. 26 (2009) 242002, `arXiv:0812.2214 [gr-qc]`.

[Modesto(2009)] L. Modesto, “Fractal Quantum Space-Time,” `arXiv:0905.1665 [gr-qc]`.

[Calcagni(2010)] G. Calcagni, “Fractal universe and quantum gravity,” Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 251301, `arXiv:0912.3142 [hep-th]`.

[Calcagni(2010b)] G. Calcagni, “Quantum field theory, gravity and cosmology in a fractal universe,” JHEP 03 (2010) 120, `arXiv:1001.0571 [hep-th]`.

[Calcagni(2012)] G. Calcagni, “Introduction to multifractional spacetimes,” AIP Conf. Proc. 1483 (2012) 31, `arXiv:1209.1110 [hep-th]`.

[Hořava(2009)] P. Hořava, “Spectral Dimension of the Universe in Quantum Gravity at a Lifshitz Point,” Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 161301, `arXiv:0902.3657 [hep-th]`.

[Thürigen(2015)] J. Thürigen, “Discrete Quantum Geometries,” `arXiv:1511.08737 [gr-qc]`.

[Jiang et al.(2024)] W.-C. Jiang, M.-C. Zhong, Y.-K. Fang, S. Donsa, I. Březinová, L.-Y. Peng, J. Burgdörfer, “Time Delays as Attosecond Probe of Interelectronic Coherence and Entanglement,” Phys. Rev. Lett. 133 (2024) 163201, doi:10.1103/PhysRevLett.133.163201.

[NASA Space News(2026)] NASA Space News, “Scientists Measure Quantum Entanglement Speed – And It Breaks Physics,” YouTube-Video, 14. Januar 2026, `https://www.youtube.com/watch?v=t3wjY95zvNM` (abgerufen am 15. Januar 2026).

[Pascher(2026a)] J. Pascher, “Fraktale Raumzeit und ihre Implikationen in der Quantengravitation,” internes T0-Dokument 141_Renormierung_De (2026), als PDF im GitHub-Repository unter `/141_Renormierung_De.pdf`.

[Pascher(2026b)] J. Pascher, “Attosekunden-Vorhersage zur Entstehung von Quantenverschränkung als Beleg für die T_0-Time-Mass-Duality-Theorie,” internes T0-Dokument 142_Experimet-verschränkung_De (2026), als PDF im GitHub-Repository unter /142_Experimet-verschränkung_De.pdf.

[Pascher(2025a)] J. Pascher, “T0-Teilchenmassen und Leptonenhierarchie,” internes T0-Dokument 006_T0_Teilchenmassen_De (2025), als PDF im GitHub-Repository unter /006_T0_Teilchenmassen_De.pdf.

[Pascher(2025b)] J. Pascher, “Feinstrukturkonstante und fraktale Geometrie,” interne T0-Dokumente 044_Feinstrukturkonstante_De und 043_ResolvingTheConstantsAlfa_De (2025), als PDFs im GitHub-Repository unter /044_Feinstrukturkonstante_De.pdf und /043_ResolvingTheConstantsAlfa_De.pdf.

[Pascher(2025c)] J. Pascher, “Natürliche Einheiten und ihre Systematik,” internes T0-Dokument 015_NatEinheitenSystematik_De (2025), als PDF im GitHub-Repository unter /015_NatEinheitenSystematik_De.pdf.

[Pascher(2025d)] J. Pascher, “T0, natürliche Einheiten und SI,” interne T0-Dokumente 014_T0_nat-si_De und 013_T0_SI_De (2025), als PDFs im GitHub-Repository unter /014_T0_nat-si_De.pdf und /013_T0_SI_De.pdf.

[Pascher(2025e)] J. Pascher, “T0-Kosmologie und fraktale Geometrie,” interne T0-Dokumente 026_T0_Geometrische_Kosmologie_De und 025_T0_Kosmologie_De (2025), als PDFs im GitHub-Repository unter /026_T0_Geometrische_Kosmologie_De.pdf und /025_T0_Kosmologie_De.pdf.