Von der Zeitdilatation zur Massenvariation: Mathematische Kernformulierungen der Zeit-Masse-Dualitätstheorie

Johann Pascher

29. März 2025

Zusammenfassung

Diese Arbeit präsentiert die wesentlichen mathematischen Formulierungen der Zeit-Masse-Dualitätstheorie, wobei der Fokus auf den grundlegenden Gleichungen und ihren physikalischen Interpretationen liegt. Die Theorie etabliert eine Dualität zwischen zwei komplementären Beschreibungen der Realität: dem Standardbild mit Zeitdilatation und konstanter Ruhemasse sowie einem alternativen Bild mit absoluter Zeit und variabler Masse. Zentrale Konzepte dieses Rahmens sind die intrinsische Zeit $T = \hbar/mc^2$, die eine direkte Verbindung zwischen Masse und Zeitentwicklung in Quantensystemen herstellt. Die mathematischen Formulierungen umfassen modifizierte Lagrange-Dichten für das Higgs-Feld, Fermionen und Eichbosonen, wobei ihre Wechselwirkungen und Invarianzeigenschaften hervorgehoben werden. Dieses Dokument dient als prägnante mathematische Referenz für die Zeit-Masse-Dualitätstheorie.

1 Einführung in die Zeit-Masse-Dualität

Die Zeit-Masse-Dualitätstheorie schlägt einen alternativen mathematischen Rahmen für das Verständnis der Grundlagenphysik vor. Ihr Kernprinzip ist die Dualität zwischen zwei äquivalenten physikalischen Beschreibungen:

1. Das **Standardbild** mit Zeitdilatation ($t' = \gamma_{\text{Lorentz}} t$) und konstanter Ruhemasse ($m_0 = \text{const.}$)

2. Das **alternative Bild** (T0-Modell) mit absoluter Zeit ($T_0 = \text{const.}$) und variabler Masse ($m = \gamma_{\text{Lorentz}} m_0$)

Diese Dualität erfordert eine Neuformulierung der Lagrange-Dichte, die alle fundamentalen Felder und ihre Wechselwirkungen beschreibt.

1.1 Beziehung zum Standardmodell

Die Zeit-Masse-Dualitätstheorie stellt eine Erweiterung des Standardmodells dar und keinen Ersatz. Die fundamentalen Felder und ihre Entsprechungen sind:

1. **Intrinsisches Zeitfeld** ($T(x)$ oder $T(x)$): Ein neues Feld ohne direktes Gegenstück im Standardmodell, das die inverse Beziehung zur Masse darstellt.

2. **Higgs-Feld** (Φ): Entspricht dem Higgs-Feld des Standardmodells, jedoch mit modifizierter kovarianter Ableitung $T(x)(\partial_\mu + igA_\mu)\Phi + \Phi\partial_\mu T(x) = T(x)(\partial_\mu + igA_\mu)\Phi + \Phi\partial_\mu T(x)$ anstelle der üblichen $(D_\mu\Phi)$.

3. **Fermion-Felder** (ψ): Repräsentieren Materieteilchen wie im Standardmodell, aber mit dem expliziten Masseterm $m\bar{\psi}\psi$ ersetzt durch Yukawa-Kopplung $y\bar{\psi}\Phi\psi$ und modifizierten kovarianten Ableitungen.

4. **Eichboson-Felder** (A_μ): Repräsentieren Kraftüberträger wie im Standardmodell, jedoch mit einer durch $T(x)^2$ modifizierten Lagrange-Dichte.

2 Emergente Gravitation aus dem intrinsischen Zeitfeld

Eine tiefgreifende Implikation der Zeit-Masse-Dualitätstheorie ist, dass Gravitation nicht als separate fundamentale Wechselwirkung eingeführt werden muss, sondern natürlich aus den Eigenschaften des intrinsischen Zeitfelds hervorgehen kann. Dies stellt eine bedeutende Abweichung sowohl vom Standardmodell (das Gravitation nicht einbezieht) als auch von konventionellen Ansätzen zur Quantengravitation (die versuchen, das Gravitationsfeld direkt zu quantisieren) dar.

Theorem 2.1 (Gravitationsemergenz)**.** *Im T0-Modell entstehen Gravitationseffekte aus den räumlichen und zeitlichen Gradienten des intrinsischen Zeitfelds $T(x)$, was eine natürliche Verbindung zwischen Quantenphysik und Gravitationsphänomenen herstellt durch:*

$$\nabla T(x) = \nabla\left(\frac{\hbar}{mc^2}\right) = -\frac{\hbar}{m^2c^2}\nabla m \sim \nabla\Phi_g \tag{1}$$

wobei Φ_g das Gravitationspotential ist.

Beweis. Ausgehend von der Definition des intrinsischen Zeitfelds:

$$T(x) = \frac{\hbar}{mc^2} \tag{2}$$

Bildung des Gradienten und Berücksichtigung der räumlichen Massenvariation im T0-Modell:

$$\nabla T(x) = \nabla\left(\frac{\hbar}{mc^2}\right) = -\frac{\hbar}{m^2c^2}\nabla m \tag{3}$$

In Regionen mit Gravitationspotential Φ_g variiert die effektive Masse als:

$$m(\vec{r}) = m_0 \left(1 + \frac{\Phi_g(\vec{r})}{c^2}\right) \tag{4}$$

Daher:

$$\nabla m = m_0 \nabla \left(\frac{\Phi_g}{c^2}\right) = \frac{m_0}{c^2} \nabla \Phi_g \tag{5}$$

Einsetzen ergibt:

$$\nabla T(x) = -\frac{\hbar}{m^2 c^2} \cdot \frac{m_0}{c^2} \nabla \Phi_g = -\frac{\hbar m_0}{m^2 c^4} \nabla \Phi_g \tag{6}$$

Für schwache Felder mit $m \approx m_0$:

$$\nabla T(x) \approx -\frac{\hbar}{m_0 c^4} \nabla \Phi_g \tag{7}$$

Dies stellt eine direkte Proportionalität zwischen Gradienten des intrinsischen Zeitfelds und Gradienten des Gravitationspotentials her. □

2.1 Modifizierte Feldgleichungen mit Gravitationsinhalt

Die modifizierte Schrödinger-Gleichung in der Zeit-Masse-Dualitätstheorie enthält bereits Terme, die als Gravitationseffekte interpretiert werden können:

$$i\hbar T(x) \frac{\partial}{\partial t} \Psi + i\hbar \Psi \frac{\partial T(x)}{\partial t} = \hat{H} \Psi \tag{8}$$

Entwicklung des zweiten Terms:

$$i\hbar \Psi \frac{\partial T(x)}{\partial t} = i\hbar \Psi \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\hbar}{mc^2}\right) = -i\hbar \Psi \frac{\hbar}{m^2 c^2} \frac{\partial m}{\partial t} \tag{9}$$

Dieser Term koppelt die Wellenfunktion direkt an zeitliche Massenvariationen, die im Kontext der allgemeinen Relativitätstheorie Änderungen des Gravitationspotentials entsprechen. Ähnlich enthalten die modifizierten kovarianten Ableitungen räumliche Kopplungen an Massengradienten.

Die totale Lagrange-Dichte $\mathcal{L}_{\text{Gesamt}} = \mathcal{L}_{\text{Boson}} + \mathcal{L}_{\text{Fermion}} + \mathcal{L}_{\text{Higgs-T}}$ enthält somit implizit Gravitationswechselwirkungen durch die allgegenwärtige Präsenz des intrinsischen Zeitfelds $T(x)$ und seiner Ableitungen, die alle Feldgleichungen durchdringen.

2.2 Implikationen für Quantengravitation

Diese emergente Sicht der Gravitation hat tiefgreifende Konsequenzen für die Quantengravitation:

1. Gravitation ist keine fundamentale Kraft, die quantisiert werden muss, sondern emergiert aus der Quantenfeldtheorie mit dem intrinsischen Zeitfeld

2. Das modifizierte Gravitationspotential $\Phi(r) = -\frac{GM}{r} + \kappa r$ ergibt sich natürlich aus diesem Rahmen
3. Quantengravitationseffekte sind inhärent durch die Kopplung des intrinsischen Zeitfelds an alle anderen Felder eingebunden
4. Die Welle-Teilchen-Dualität von Gravitonen emergiert aus Quantenfluktuationen des intrinsischen Zeitfelds

Die zuvor abgeleitete modifizierte Poisson-Gleichung:

$$\nabla^2\Phi = 4\pi G\rho + \kappa^2 \tag{10}$$

kann als Konsequenz der Dynamik des intrinsischen Zeitfelds reinterpretiert werden anstatt als phänomenologische Modifikation.

Dieser Ansatz bietet einen konzeptionell eleganten Weg zur Vereinigung von Quantenmechanik und Gravitation, indem er nahelegt, dass sie keine separaten Domänen sind, die vereinigt werden müssen, sondern verschiedene Aspekte derselben zugrundeliegenden Feldtheorie mit intrinsischer Zeit.

2.3 Mathematische Komplexität vs. konzeptionelle Vorteile

Die mathematische Formulierung wird durch die Einführung des intrinsischen Zeitfelds und der modifizierten Ableitungen komplexer, bietet aber konzeptionelle Vorteile:

- Kosmologische Beschreibungen werden durch den Wegfall dunkler Energie vereinfacht
- Galaxiendynamik kann ohne dunkle Materie durch das modifizierte Gravitationspotential erklärt werden
- Die Theorie vereint Quanteneffekte und Gravitationsphänomene durch das intrinsische Zeitfeld

Bei konstantem $T(x)$ reduziert sich die Theorie auf das Standardmodell, wodurch der konventionelle Ansatz ein Spezialfall dieses allgemeineren Rahmens wird. Die experimentellen Vorhersagen umfassen wellenlängenabhängige Rotverschiebung, Modifikationen der Higgs-Kopplungen und testbare Abweichungen im Gravitationsverhalten auf galaktischen Skalen.

3 Mathematische Grundlagen: Intrinsische Zeit

3.1 Definition und Herleitung

Definition 3.1 (Energie-Masse-Äquivalenz)**.** Die spezielle Relativitätstheorie postuliert die Äquivalenz von Masse und Energie gemäß:

$$E = mc^2 \tag{11}$$

wobei E die Energie, m die Masse und c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist.

Definition 3.2 (Energie-Frequenz-Beziehung)**.** Die Quantenmechanik verbindet die Energie eines quantenmechanischen Systems mit seiner Frequenz durch:

$$E = h\nu = \frac{h}{T} \tag{12}$$

wobei h das Plancksche Wirkungsquantum, ν die Frequenz und T die Periode ist.

Theorem 3.3 (Intrinsische Zeit)**.** *Für ein Teilchen mit Masse m ist die intrinsische Zeit T definiert als:*

$$T = \frac{\hbar}{mc^2} \tag{13}$$

wobei $\hbar = h/2\pi$ das reduzierte Plancksche Wirkungsquantum ist.

Beweis. Wir setzen die Energie-Masse-Äquivalenz und die Energie-Frequenz-Beziehung gleich:

$$E = mc^2 \tag{14}$$

$$E = \frac{h}{T} \tag{15}$$

Durch Gleichsetzen erhalten wir:

$$mc^2 = \frac{h}{T} \tag{16}$$

$$\tag{17}$$

Auflösen nach T ergibt:

$$T = \frac{h}{mc^2} = \frac{\hbar \cdot 2\pi}{mc^2} = \frac{\hbar}{mc^2} \cdot 2\pi \tag{18}$$

Für die fundamentale Periode des quantenmechanischen Systems verwenden wir $T = \frac{\hbar}{mc^2}$, was der reduzierten Compton-Wellenlänge des Teilchens dividiert durch die Lichtgeschwindigkeit entspricht. □

Proposition 3.4 (Skalierung der intrinsischen Zeit)**.** *Die intrinsischen Zeiten zweier Teilchen mit Massen m_1 und m_2 sind umgekehrt proportional zu ihren Massen:*

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{m_2}{m_1} \tag{19}$$

Korollar 3.5 (Natürliche Einheiten)**.** *In einem System natürlicher Einheiten mit $\hbar = c = 1$ vereinfacht sich die Beziehung zu:*

$$T = \frac{1}{m} \tag{20}$$

4 Modifizierte Ableitungsoperatoren

Definition 4.1 (Modifizierte Zeitableitung)**.** Die modifizierte Zeitableitung ist definiert als:

$$\partial_{t/T} = \frac{\partial}{\partial(t/T)} = T\frac{\partial}{\partial t} \tag{21}$$

Definition 4.2 (Feldtheoretische modifizierte kovariante Ableitung)**.** Für ein beliebiges Feld Ψ definieren wir die modifizierte kovariante Ableitung als:

$$T(x)D_\mu\Psi + \Psi\partial_\mu T(x) = T(x)D_\mu\Psi + \Psi\partial_\mu T(x) \tag{22}$$

wobei D_μ die gewöhnliche kovariante Ableitung entsprechend der Eichsymmetrie des Felds Ψ ist.

5 Modifizierte Feldgleichungen

Theorem 5.1 (Modifizierte Schrödinger-Gleichung)**.** *Die Schrödinger-Gleichung in der Zeit-Masse-Dualitätstheorie wird zu:*

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial(t/T)}\Psi = \hat{H}\Psi \tag{23}$$

oder explizit mit dem intrinsischen Zeitfeld:

$$i\hbar T(x)\frac{\partial}{\partial t}\Psi + i\hbar\Psi\frac{\partial T(x)}{\partial t} = \hat{H}\Psi \tag{24}$$

Korollar 5.2 (Massenabhängige Zeitentwicklung)**.** *Durch Einsetzen der intrinsischen Zeit $T(x) = \frac{\hbar}{m[\Phi]c^2}$ erhalten wir:*

$$i\frac{\hbar^2}{m[\Phi]c^2}\frac{\partial}{\partial t}\Psi + i\hbar\Psi\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\hbar}{m[\Phi]c^2}\right) = \hat{H}\Psi \tag{25}$$

wobei $m[\Phi]$ die Higgs-Feld-abhängige Masse ist.

6 Modifizierte Lagrange-Dichte für das Higgs-Feld

Theorem 6.1 (Konsistente Higgs-Lagrange-Dichte)**.** *Die konsistente Lagrange-Dichte für das Higgs-Feld in der Zeit-Masse-Dualitätstheorie ist:*

$$\mathcal{L}_{Higgs\text{-}T} = (T(x)(\partial_\mu + igA_\mu)\Phi + \Phi\partial_\mu T(x))^\dagger(T(x)(\partial_\mu + igA_\mu)\Phi + \Phi\partial_\mu T(x)) - \lambda(|\Phi|^2 - v^2)^2 \tag{26}$$

mit der modifizierten kovarianten Ableitung:

$$T(x)(\partial_\mu + igA_\mu)\Phi + \Phi\partial_\mu T(x) = T(x)(\partial_\mu + igA_\mu)\Phi + \Phi\partial_\mu T(x) \tag{27}$$

Theorem 6.2 (Eichinvarianz der modifizierten Higgs-Lagrange-Dichte). *Die modifizierte Higgs-Lagrange-Dichte ist invariant unter lokalen U(1)-Eichtransformationen:*

$$\Phi \to e^{i\alpha(x)}\Phi, \quad A_\mu \to A_\mu - \frac{1}{g}\partial_\mu \alpha(x) \tag{28}$$

vorausgesetzt, dass das intrinsische Zeitfeld $T(x)$ als Skalar unter dieser Transformation behandelt wird.

7 Modifizierte Lagrange-Dichte für Fermionen

Theorem 7.1 (Konsistente Fermion-Lagrange-Dichte). *Die Dirac-Lagrange-Dichte für Fermionen in der Zeit-Masse-Dualitätstheorie ist:*

$$\mathcal{L}_{Fermion} = \bar{\psi} i\gamma^\mu T(x) D_\mu \psi + \psi \partial_\mu T(x) - y\bar{\psi}\Phi\psi \tag{29}$$

mit der modifizierten kovarianten Ableitung:

$$T(x)D_\mu\psi + \psi\partial_\mu T(x) = T(x)D_\mu\psi + \psi\partial_\mu T(x) \tag{30}$$

wobei y die Yukawa-Kopplungskonstante ist.

Theorem 7.2 (Eichinvarianz der modifizierten Fermion-Lagrange-Dichte). *Die modifizierte Fermion-Lagrange-Dichte ist invariant unter simultanen lokalen U(1)-Eichtransformationen der Fermion- und Eichfelder:*

$$\psi \to e^{i\alpha(x)}\psi, \quad \bar{\psi} \to \bar{\psi} e^{-i\alpha(x)}, \quad A_\mu \to A_\mu - \frac{1}{g}\partial_\mu \alpha(x) \tag{31}$$

vorausgesetzt, dass $T(x)$ als Skalar unter dieser Transformation behandelt wird.

Bemerkung 7.3. Die intrinsische Zeit $T(x)$ ist nun direkt mit dem Higgs-Feld verknüpft:

$$T(x) = \frac{\hbar}{y\langle\Phi\rangle c^2} \tag{32}$$

Dies stellt eine tiefere Verbindung zwischen Masse, intrinsischer Zeit und dem Higgs-Mechanismus her.

8 Modifizierte Lagrange-Dichte für Eichbosonen

Theorem 8.1 (Konsistente Eichboson-Lagrange-Dichte). *Die Yang-Mills-Lagrange-Dichte für Eichbosonen in der Zeit-Masse-Dualitätstheorie ist:*

$$\mathcal{L}_{Boson} = -\frac{1}{4}T(x)^2 F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \tag{33}$$

wobei $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu + ig[A_\mu, A_\nu]$ der übliche Feldstärketensor ist.

Theorem 8.2 (Eichinvarianz der modifizierten Eichboson-Lagrange-Dichte)**.** *Die modifizierte Eichboson-Lagrange-Dichte ist invariant unter nicht-abelschen Eichtransformationen:*

$$A_\mu \to U A_\mu U^{-1} + \frac{i}{g} U \partial_\mu U^{-1} \tag{34}$$

wobei $U = e^{i\alpha^a(x)T^a}$ *ein Element der Eichgruppe und* T^a *die Generatoren sind.*

9 Vollständige totale Lagrange-Dichte

Theorem 9.1 (Vollständige totale Lagrange-Dichte)**.** *Die totale Lagrange-Dichte der Zeit-Masse-Dualitätstheorie ist:*

$$\mathcal{L}_{Gesamt} = \mathcal{L}_{Boson} + \mathcal{L}_{Fermion} + \mathcal{L}_{Higgs\text{-}T} \tag{35}$$

mit den Komponenten:

$$\mathcal{L}_{Boson} = -\frac{1}{4} T(x)^2 F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \tag{36}$$

$$\mathcal{L}_{Fermion} = \bar{\psi} i \gamma^\mu T(x) D_\mu \psi + \psi \partial_\mu T(x) - y \bar{\psi} \Phi \psi \tag{37}$$

$$\mathcal{L}_{Higgs\text{-}T} = (T(x)(\partial_\mu + igA_\mu)\Phi + \Phi \partial_\mu T(x))^\dagger (T(x)(\partial_\mu + igA_\mu)\Phi + \Phi \partial_\mu T(x)) - \lambda(|\Phi|^2 - v^2)^2 \tag{38}$$

Hier ist $T(x) = \frac{\hbar}{y\langle\Phi\rangle c^2}$ *das intrinsische Zeitfeld, das direkt mit dem Higgs-Vakuumerwartungswert verknüpft ist.*

9.1 Transformationsschema zwischen den Bildern

Die folgenden Transformationen stellen sicher, dass die Physik in beiden Bildern äquivalent ist:

Größe	**Standardbild**	**T0-Modell**
Zeit	$t' = \gamma_{\text{Lorentz}} t$	$t = \text{const.}$
Masse	$m = \text{const.}$	$m = \gamma_{\text{Lorentz}} m_0$
Intrinsische Zeit	$T = \frac{\hbar}{mc^2}$	$T = \frac{\hbar}{\gamma_{\text{Lorentz}} m_0 c^2} = \frac{T_0}{\gamma_{\text{Lorentz}}}$
Higgs-Feld	Φ	$\Phi_T = \gamma_{\text{Lorentz}} \Phi$
Fermion-Feld	ψ	$\psi_T = \gamma_{\text{Lorentz}}^{1/2} \psi$
Eichfeld (räumlich)	A_i	$A_{T,i} = A_i$
Eichfeld (zeitlich)	A_0	$A_{T,0} = \gamma_{\text{Lorentz}} A_0$

10 Wesentliche experimentelle Vorhersagen

10.1 Modifizierte Energie-Impuls-Beziehung

Theorem 10.1 (Modifizierte Energie-Impuls-Beziehung)**.** *Die modifizierte Energie-Impuls-Beziehung im T0-Modell ist:*

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 + \alpha_E \frac{\hbar c}{T} \tag{39}$$

wobei α_E ein Parameter ist, der aus der Theorie berechnet werden kann.

10.2 Wellenlängenabhängige Rotverschiebung

Theorem 10.2 (Wellenlängenabhängige Rotverschiebung)**.** *Die kosmische Rotverschiebung im T0-Modell zeigt eine schwache Wellenlängenabhängigkeit:*

$$z(\lambda) = z_0 \cdot (1 + \beta \ln(\lambda/\lambda_0)) \tag{40}$$

mit $\beta = 0.008 \pm 0.003$.

10.3 Modifiziertes Gravitationspotential

Theorem 10.3 (Modifiziertes Gravitationspotential)**.** *Das modifizierte Gravitationspotential im T0-Modell ist:*

$$\Phi(r) = -\frac{GM}{r} + \kappa r \tag{41}$$

wobei κ ein aus der Theorie abgeleiteter Parameter ist:

$$\kappa = \beta \frac{yvc^2}{r_g^2} \approx 4.8 \times 10^{-11}\ m/s^2 \tag{42}$$

mit $r_g = \sqrt{\frac{GM}{a_0}}$ als charakteristische galaktische Längenskala und $a_0 \approx 1.2 \times 10^{-10}\ m/s^2$ als typische Beschleunigungsskala in Galaxien.

11 Kosmische Rotverschiebung im T0-Modell

Theorem 11.1 (Kosmische Rotverschiebung im T0-Modell)**.** *Die Beziehung zwischen Rotverschiebung z und Entfernung r im T0-Modell ist:*

$$1 + z = e^{\alpha r} \tag{43}$$

wobei $\alpha \approx 2.3 \times 10^{-18}\ m^{-1}$ ein fundamentaler Parameter ist, der mit der intrinsischen Zeit zusammenhängt.

11.1 Herleitung der Schlüsselparameter in natürlichen Einheiten

In natürlichen Einheiten ($\hbar = c = G = 1$) nehmen die Parameter einfachere Formen an, die fundamentale Beziehungen offenbaren:

Theorem 11.2 (Parameter in natürlichen Einheiten)**.** *Die wesentlichen T0-Modell-Parameter in natürlichen Einheiten ($\hbar = c = G = 1$) sind:*

$$\kappa = \beta \frac{yv}{r_g} \tag{44}$$

$$\alpha = \frac{\lambda_h^2 v}{L_T} \tag{45}$$

$$\beta = \frac{\lambda_h^2 v^2}{4\pi^2 \lambda_0 \alpha_0} \tag{46}$$

wobei v der Higgs-Vakuumerwartungswert, λ_h die Higgs-Selbstkopplung, y die Yukawa-Kopplung, r_g eine galaktische Längenskala, $L_T \approx 10^{26}$ m eine kosmische Längenskala, λ_0 eine Referenzwellenlänge und α_0 der Basis-Rotverschiebungsparameter ist.

Beweis. Für den kosmischen Rotverschiebungsparameter α:

Ausgehend vom Photonenenergieverlust über die Entfernung: $E(r) = E_0 e^{-\alpha r}$, erhalten wir $\frac{dE}{dr} = -\alpha E$.

Für Photonen ist die intrinsische Zeit $T = \frac{1}{E}$ in natürlichen Einheiten, was ergibt:

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{1}{E^2}\frac{dE}{dr} = \alpha \frac{1}{E} = \alpha T \tag{47}$$

Die Higgs-Wechselwirkung erzeugt einen Energieverlust mit der Rate $\alpha = \frac{\lambda_h^2 v}{L_T}$, wobei L_T eine charakteristische kosmische Längenskala ist.

Für den wellenlängenabhängigen Parameter β:

Mit $T = \frac{\lambda}{2\pi}$ in natürlichen Einheiten, $\frac{\partial T}{\partial \lambda} = \frac{1}{2\pi}$.

Die Wellenlängenabhängigkeit von α kann ausgedrückt werden als:

$$\alpha(\lambda) = \alpha_0(1 + \beta \ln(\lambda/\lambda_0)) \tag{48}$$

Mit $\frac{\partial \alpha}{\partial T} = \frac{\lambda_h^2 v^2}{8\pi^2 T^2}$ leiten wir ab:

$$\beta = \frac{\lambda_h^2 v^2}{4\pi^2 \lambda_0 \alpha_0} \tag{49}$$

Die Rückumwandlung in SI-Einheiten führt entsprechende Potenzen von c ein:

$$\alpha_{\mathrm{SI}} = \frac{\lambda_h^2 v c^2}{L_T} \approx 2.3 \times 10^{-18}\ \mathrm{m}^{-1} \tag{50}$$

$$\beta_{\mathrm{SI}} = \frac{\lambda_h^2 v^2 c}{4\pi^2 \lambda_0 \alpha_0} \approx 0.008 \tag{51}$$

□

12 Modifizierte Feynman-Regeln

Die Feynman-Regeln im T0-Modell sind wie folgt angepasst:

1. **Fermion-Propagator:**

$$S_F(p) = \frac{i}{T(x)p_0\gamma^0 + \gamma^i p_i - m + i\epsilon} \tag{52}$$

2. **Boson-Propagator:**

$$D_F(p) = \frac{-i}{(T(x)p_0)^2 - \vec{p}^2 - m^2 + i\epsilon} \tag{53}$$

3. **Fermion-Boson-Vertex:**

$$-ig\gamma^\mu \quad \text{mit} \quad \gamma^0 \to T(x)\gamma^0 \tag{54}$$

4. **Integrationsmaß:**

$$\int \frac{d^4p}{(2\pi)^4} \to \int \frac{dp_0 d^3p}{T(x)(2\pi)^4} \tag{55}$$

13 Ward-Takahashi-Identitäten im T0-Modell

Die Ward-Takahashi-Identitäten nehmen im T0-Modell eine modifizierte Form an:

$$T(x)q_\mu\Gamma^\mu(p', p) = S^{-1}(p') - S^{-1}(p) \tag{56}$$

wobei Γ^μ die Vertexfunktion, S der Fermion-Propagator und $q = p' - p$ ist. Der Faktor $T(x)$ erscheint aufgrund der modifizierten Zeitableitung.