

Einheitenkonventionen und die Lichtgeschwindigkeit c

$E=mc^2$ vs. $E=m$: Zwei äquivalente Perspektiven

Natürliche Einheiten, SI-Einheiten und die T0-Sichtweise

Johann Pascher

22. Dezember 2025

Zusammenfassung

Dieses Dokument untersucht die Frage, wann man $c=1$ setzen kann (natürliche Einheiten) und wann man die volle Form $E=mc^2$ mit $c=299\,792\,458\text{ m/s}$ (SI-Einheiten) benötigt. Parallel zur Behandlung der Feinstrukturkonstante α in Dokument 101 zeigt sich: Beide Perspektiven sind mathematisch äquivalent und unterscheiden sich nur in der Wahl des Einheitensystems. Die T0-Theorie offenbart, dass c kein fundamentales Naturgesetz, sondern ein dynamisches Verhältnis L/T ist. Aus T0-Sicht kann $c=1$ gesetzt werden (Planck-Einheiten, Teilchenphysik), während für technische Anwendungen und Präzisionsmessungen SI-Einheiten mit explizitem c erforderlich sind. Die Äquivalenz $E=mc^2 \leftrightarrow E=m$ gilt exakt in natürlichen Einheiten. Referenzen: Dokumente 013 (SI-System), 014 (nat./SI), 015 (Systematik), 077 ($E=mc^2$ -Analyse), 101 (α -Konventionen).

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung: Die Frage nach $c=1$

1.1 Die zentrale Frage

Die Frage „Wann kann man $c=1$ setzen?“ ist analog zur Frage „Wann kann man $\alpha=1$ setzen?“, die in Dokument 101 behandelt wurde. In beiden Fällen geht es um **Einheitenkonventionen**, nicht um fundamentale Physik.

Zentrale These

$E=mc^2$ und $E=m$ sind mathematisch identisch!

- In SI-Einheiten: $E = mc^2$ mit $c = 299\,792\,458$ m/s
- In natürlichen Einheiten: $E = m$ mit $c = 1$

Beide Formen beschreiben dieselbe Physik – nur die Einheitenwahl unterscheidet sich.

1.2 Historischer Kontext

Einstein schrieb 1905 die berühmte Formel:

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

Diese Form war notwendig, weil er in **SI-Einheiten** arbeitete, wo Länge (Meter), Zeit (Sekunde) und Masse (Kilogramm) unabhängige Dimensionen haben.

Moderne Teilchenphysik verwendet stattdessen:

$$E = m \quad (\text{in natürlichen Einheiten mit } c = \hbar = 1) \quad (2)$$

2 Natürliche Einheiten: Wann $c=1$ gültig ist

2.1 Definition natürlicher Einheiten

In natürlichen Einheiten setzt man:

$$c = 1, \quad \hbar = 1, \quad (\text{optional: } k_B = 1) \quad (3)$$

Mathematische Bedeutung:

$$c = 1 \quad \Rightarrow \quad \text{Länge} \equiv \text{Zeit} \quad (4)$$

$$\hbar = 1 \quad \Rightarrow \quad \text{Energie} \equiv \text{inverse Zeit} \quad (5)$$

2.2 Anwendungsbereiche

Natürliche Einheiten sind angemessen in:

- **Planck-Skala:** Quantengravitation, fundamentale Theorie
 - **Teilchenphysik:** Hochenergiephysik, QFT, Standardmodell
 - **Kosmologie:** Frühe Universen, inflationäre Modelle
 - **Theoretische Arbeit:** Mathematische Ableitungen, Symmetrien
- Vorteil:** Formeln werden einfacher, physikalische Zusammenhänge klarer.

2.3 Mathematische Konsistenz

In natürlichen Einheiten gilt:

$$E^2 = p^2 + m^2 \quad (6)$$

Im Ruhesystem ($p = 0$):

$$E = m \quad (7)$$

Dies ist exakt – **keine Näherung**.

2.4 T0-Perspektive: c als Verhältnis

Die T0-Theorie zeigt (siehe Dokument 077):

$$c = \frac{L}{T} \quad (8)$$

c ist kein fundamentales Naturgesetz, sondern ein *Verhältnis*!

Mit der T0-Grundrelation:

$$T \cdot m = 1 \quad (\text{Zeit-Masse-Dualität}) \quad (9)$$

folgt, dass c ein dynamisches Verhältnis ist, das mit der Massenskala variiert.

Implikation: In Planck-Einheiten, wo $t_P = \ell_P/c$, ist $c=1$ die natürliche Wahl.

3 SI-Einheiten: Wann $c=299\,792\,458$ m/s benötigt wird

3.1 Die SI-Definition (seit 2019)

Das moderne SI-System definiert seit 2019:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s (exakt)} \quad (10)$$

Diese Wahl ist eine **Konvention**, die das Meter über die Sekunde definiert.

3.2 Anwendungsbereiche

SI-Einheiten mit explizitem c sind erforderlich in:

- **Ingenieurwesen:** GPS, Telekommunikation, Lasertechnik
- **Präzisionsmessungen:** Atomuhren, Interferometrie, Metrologie
- **Experimentalphysik:** Labormessungen mit SI-geeichten Geräten
- **Angewandte Physik:** Energieberechnungen, Dosimetrie
- **Öffentlichkeit & Lehre:** Verständlichkeit, historische Kontinuität
Vorteil: Praktische Berechenbarkeit mit geeichten Messgeräten.

3.3 Mathematische Form

In SI-Einheiten:

$$E = \gamma mc^2 \quad (11)$$

mit dem Lorentzfaktor:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (12)$$

Im Ruhesystem ($v = 0, \gamma = 1$):

$$E = mc^2 \quad (13)$$

3.4 Umrechnung zwischen Einheitensystemen

Von natürlichen Einheiten zu SI:

$$E_{\text{nat}} = m_{\text{nat}} \quad (14)$$

$$\Downarrow \quad (\text{Multiplikation mit } c^2) \quad (15)$$

$$E_{\text{SI}} = m_{\text{SI}} \cdot c^2 \quad (16)$$

Beispiel: Elektronmasse

$$m_e = 0,511 \text{ MeV} \quad (\text{natürliche Einheiten}) \quad (17)$$

$$m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg} \quad (\text{SI}) \quad (18)$$

$$E_e = m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV} = 8,187 \times 10^{-14} \text{ J} \quad (19)$$

Konvention	Feinstrukturkonstante α	Lichtgeschwindigkeit c
Natürlich	$\alpha = 1$ (Heaviside-Lorentz)	$c = 1$ (Planck-Einheiten)
SI / Standard	$\alpha = 1/137,036$ (Gauss-SI)	$c = 299\,792\,458$ m/s
Dokument	101 (Zirkularität-Konstanten)	134 (Einheitenkonventionen c)

Tabelle 1: Parallele Struktur: α und c als Konventionen

4 Vergleich mit α : Parallele Struktur

4.1 Zwei analoge Konventionen

4.2 Gemeinsame Prinzipien

Beide Fälle zeigen:

- **Physik ist invariant** unter Einheitenwahl
- **Natürliche Einheiten** vereinfachen theoretische Arbeit
- **SI-Einheiten** ermöglichen praktische Anwendungen
- **T0-Theorie**: Beide sind abgeleitete Konventionen, nicht fundamental

4.3 T0-Reduktion

Aus T0-Sicht (siehe Dokument 101):

$$\xi \rightarrow D_f \rightarrow E_0 \rightarrow \alpha \rightarrow \hbar, c, G \rightarrow \text{alle anderen Konstanten} \quad (20)$$

Nur $\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4}$ ist fundamental.

Sowohl α als auch c sind abgeleitete Größen oder Konventionen.

5 Wann welches System verwenden?

5.1 Entscheidungsmatrix

5.2 Empfehlungen

Verwende natürliche Einheiten ($c=1$), wenn:

- Du theoretische Ableitungen durchführst
- Symmetrien und invariante Strukturen wichtig sind
- Formeln vereinfacht werden sollen
- Du in Teilchenphysik oder Kosmologie arbeitest

Kontext	Natürliche Einheiten ($c=1$)	SI-Einheiten (c explizit)
Theoretische Physik	✓	
Quantenfeldtheorie	✓	
Hochenergiephysik	✓	
Kosmologie (früh)	✓	
Experimentalphysik		✓
Ingenieurwesen		✓
Präzisionsmessungen		✓
Angewandte Physik		✓
Lehre		✓

Tabelle 2: Anwendungsbereiche der Einheitensysteme

Verwende SI-Einheiten (c explizit), wenn:

- Du experimentelle Messungen planst oder auswertest
- Technische Berechnungen erforderlich sind
- Ergebnisse für Nicht-Physiker verständlich sein sollen
- Historische Kontinuität wichtig ist

6 Häufige Missverständnisse

6.1 Missverständnis: $c=1$ ist nur eine Näherung

FALSCH. $c=1$ ist **exakt** in natürlichen Einheiten, nicht eine Näherung.

Es ist eine Wahl des Einheitensystems, die definiert:

$$\text{Längeneinheit} = \text{Zeiteinheit} \quad (21)$$

Analog: In Planck-Einheiten ist $\hbar = 1$ exakt, nicht näherungsweise.

6.2 Missverständnis: $E=m$ gilt nur für Photonen

FALSCH. In natürlichen Einheiten gilt $E = m$ für **alle** Teilchen im Ruhesystem.

Für Photonen ($m = 0$) gilt: $E = p$ (in natürlichen Einheiten) oder $E = pc$ (in SI).

6.3 Missverständnis: c ist eine fundamentale Naturkonstante

T0-Sichtweise: c ist ein **Verhältnis** L/T , keine fundamentale Konstante.

Mit der T0-Dualität $T \cdot m = 1$ variiert c dynamisch mit der Massenskala:

$$c = \frac{L}{T} = L \cdot m \quad (22)$$

Nur in SI-Einheiten wird c *per Definition* fixiert.

6.4 Missverständnis: Natürliche Einheiten ändern die Physik

FALSCH. Die Physik ist unabhängig vom Einheitensystem.

Alle **dimensionslosen** Größen (z.B. ξ , α , Massenverhältnisse) sind invariant.
Nur dimensionsbehaftete Größen ändern ihre Zahlenwerte.

7 T0-Perspektive: c als dynamisches Verhältnis

7.1 Die T0-Grundrelation

Aus Dokument 077:

$$T \cdot m = 1 \quad (\text{Zeit-Masse-Dualität}) \quad (23)$$

Dies bedeutet:

$$T \propto \frac{1}{m} \quad (24)$$

$$L \propto \frac{1}{m} \quad (\text{über Compton-Wellenlänge}) \quad (25)$$

$$\Rightarrow c = \frac{L}{T} \propto \frac{1/m}{1/m} = \text{skalenabhängig} \quad (26)$$

7.2 Implikationen

1. c ist nicht universell konstant im T0-Rahmen:

In verschiedenen Massenskalen können unterschiedliche effektive c -Werte auftreten.

2. SI-Definition $c=299\,792\,458$ m/s ist eine Kalibrierung:

Diese Fixierung definiert das Meter über die Sekunde – eine metrologische Konvention.

3. Natürliche Einheiten $c=1$ sind T0-konsistent:

In Planck-Einheiten, wo $t_P \propto \ell_P$, ist $c=1$ die natürliche Wahl.

7.3 Vergleich mit Dokument 077

Dokument 077 argumentiert: „ $E=mc^2 = E=m$ – Die Konstanten-Illusion entlarvt“

Präzisierung hier:

- $E=mc^2$ (SI) und $E=m$ (natürlich) sind *äquivalent*, nicht identisch
- Der Unterschied liegt im *Einheitensystem*, nicht in der Physik

- Einsteins c-Fixierung ist eine *Konvention*, kein Fehler
- T0 zeigt: c ist ein Verhältnis, das je nach Skala variieren kann

8 Mathematische Konsistenz

8.1 Energie-Impuls-Relation

In natürlichen Einheiten ($c = 1$):

$$E^2 = p^2 + m^2 \quad (27)$$

In SI-Einheiten:

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \quad (28)$$

Beide Formen sind mathematisch äquivalent.

8.2 Lorentz-Transformation

In natürlichen Einheiten:

$$E' = \gamma(E - p \cdot v) \quad (29)$$

In SI-Einheiten:

$$E' = \gamma(E - p \cdot v \cdot c^2) \quad (30)$$

Die Physik bleibt invariant.

8.3 Klein-Gordon-Gleichung

In natürlichen Einheiten:

$$(\partial_\mu \partial^\mu + m^2)\phi = 0 \quad (31)$$

In SI-Einheiten:

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \right) \phi = 0 \quad (32)$$

Identische Physik, unterschiedliche Notation.

9 Referenzen zu T0-Dokumenten

9.1 Verwandte Dokumente

- **Dokument 013:** SI-System und T0-Theorie
https://github.com/jpascher/T0-Time-Mass-Duality/blob/main/2/pdf/013_T0_SI_De.pdf

- **Dokument 014:** Natürliche vs. SI-Einheiten
https://github.com/jpascher/T0-Time-Mass-Duality/blob/main/2/pdf/014_T0_nat-si_De.pdf
- **Dokument 015:** Systematik natürlicher Einheiten
https://github.com/jpascher/T0-Time-Mass-Duality/blob/main/2/pdf/015_NatEinheitenSystematik_De.pdf
- **Dokument 077:** $E=mc^2 = E=m$ Analyse
https://github.com/jpascher/T0-Time-Mass-Duality/blob/main/2/pdf/077_E-mc2_De.pdf
- **Dokument 101:** Zirkularität der Konstanten (α -Konventionen)
https://github.com/jpascher/T0-Time-Mass-Duality/blob/main/2/pdf/101_zirkularitaet-Konstanten_De.pdf
- **Dokument 133:** Fraktale Korrektur K_{frak} Herleitung
https://github.com/jpascher/T0-Time-Mass-Duality/blob/main/2/pdf/133_Fraktale_Korrektur_Herleitung_De.pdf

9.2 Ableitungshierarchie

Die T0-Hierarchie (aus Dokument 101):

$$\xi \rightarrow D_f \rightarrow E_0 \rightarrow \alpha \rightarrow \hbar, c, G \rightarrow \text{Massenverhältnisse} \quad (33)$$

zeigt, dass sowohl α als auch c abgeleitete Größen sind.

10 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

10.1 Kernerkenntnisse

Zusammenfassung

1. **$E=mc^2$ und $E=m$ sind mathematisch äquivalent** – unterschiedlich nur im Einheitensystem
2. **$c=1$ (natürliche Einheiten)** ist exakt, nicht näherungsweise, in Teilchenphysik/Theorie
3. **$c=299\,792\,458\text{ m/s (SI)}$** ist erforderlich für Experiment, Ingenieurwesen, Lehre
4. **T0-Perspektive:** c ist ein Verhältnis L/T , kein fundamentales Naturgesetz
5. **Einheitenwahl ändert nicht die Physik** – nur die Notation
6. **Parallelität zu α :** Beide sind Konventionen/abgeleitete Größen, nicht fundamental

10.2 Praktische Empfehlung

Für theoretische Arbeit: Verwende $c=1$ (natürliche Einheiten)

Für experimentelle/angewandte Arbeit: Verwende c explizit (SI-Einheiten)

Wichtig: Sei konsistent innerhalb einer Berechnung und dokumentiere die Einheitenwahl.

10.3 T0-Tiefergehende Einsicht

Die T0-Theorie zeigt, dass die Debatte „ $c=1$ oder $c=299\,792\,458$?“ letztlich auf **Einheitenkonventionen** reduziert werden kann – ähnlich wie die Debatte über $\alpha=1$ vs. $\alpha=1/137$ in Dokument 101.

Die fundamentale Physik steckt in **dimensionslosen Größen** wie $\xi = \frac{4}{3} \times 10^{-4}$, aus denen alle anderen Konstanten emergieren.

c ist ein **abgeleitetes Verhältnis**, keine fundamentale Konstante.

10.4 Ausblick

Zukünftige Arbeiten könnten untersuchen:

- Experimentelle Tests der T0-Vorhersage variabler c -Werte auf verschiedenen Skalen

- Präzisionsmessungen zur Verifizierung der Zeit-Masse-Dualität $T \cdot m = 1$
- Didaktische Ansätze zur Vermittlung der Äquivalenz natürlicher/SI-Einheiten

Literatur

- [1] Johann Pascher, *Der vollständige Abschluss der T0-Theorie: Von ξ zur SI-Reform 2019*, Dokument 013, T0-Theorie-Reihe (2024).
- [2] Johann Pascher, *Natürliche vs. SI-Einheiten*, Dokument 014, T0-Theorie-Reihe (2024).
- [3] Johann Pascher, *Systematik natürlicher Einheiten*, Dokument 015, T0-Theorie-Reihe (2024).
- [4] Johann Pascher, *$E=mc^2 = E=m$: Die Konstanten-Illusion entlarvt*, Dokument 077, T0-Theorie-Reihe (2024).
- [5] Johann Pascher, *Die Zirkularität in der Debatte über fundamentale Konstanten*, Dokument 101, T0-Theorie-Reihe (2025).
- [6] Johann Pascher, *Fraktale Korrektur K_{frak} – Vollständiger mathematischer Beweis*, Dokument 133, T0-Theorie-Reihe (2025).
- [7] Max Planck, *Über irreversible Strahlungsvorgänge*, Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften (1899).
- [8] George Johnstone Stoney, *On the Physical Units of Nature*, Philosophical Magazine, Series 5, Vol. 11 (1881).
- [9] BIPM, *The International System of Units (SI)*, 9th edition (2019).