Einheitenkonventionen und die Lichtgeschwindigkeit c

E=mc² 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 $c=299\,792\,458$ 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 α=1 setzen?", die in Dokument 101 behandelt wurde. In beiden Fällen geht es um **Einheitenkonventionen**, nicht um fundamentale Physik.

Zentrale These

E=mc² 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:

$$E = mc^2 \tag{1}$$

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:

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

2 Natürliche Einheiten: Wann c=1 gültig ist

2.1 Definition natürlicher Einheiten

In natürlichen Einheiten setzt man:

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

Mathematische Bedeutung:

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

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

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:

$$E^2 = p^2 + m^2 \tag{6}$$

Im Ruhesystem ($p = 0$):

$$E = m \tag{7}$$

Dies ist exakt – **keine Näherung**.

2.4 T0-Perspektive: c als Verhältnis

Die T0-Theorie zeigt (siehe Dokument 077):

$$c = \frac{L}{T} \tag{8}$$

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

Mit der T0-Grundrelation:

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

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:

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

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

3.2 Anwendungsbereiche

SI-Einheiten mit explizitem c sind erforderlich in:

- **Ingenieurswesen**: 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:

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

mit dem Lorentzfaktor:

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

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

$$E = mc^2 \tag{13}$$

3.4 Umrechnung zwischen Einheitensystemen

Von natürlichen Einheiten zu SI:

$$E_{\text{nat}} = m_{\text{nat}} \tag{14}$$

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

$$E_{\text{SI}} = m_{\text{SI}} \cdot c^2 \tag{16}$$

Beispiel: Elektronmasse

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

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

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

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):

$$\xi \to D_f \to E_0 \to \alpha \to \hbar, c, G \to \text{alle anderen Konstanten} \tag{20}$$

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

Verwende SI-Einheiten (c explizit), wenn:

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

- 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:

$$\text{Längeneinheit} = \text{Zeiteinheit} \tag{21}$$

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:

$$c = \frac{L}{T} = L \cdot m \tag{22}$$

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:

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

Dies bedeutet:

$$T \propto \frac{1}{m} \tag{24}$$

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

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

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=mc² = E=m – Die Konstanten-Illusion entlarvt"
Präzisierung hier:

- E=mc² (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 ($c = 1$):

$$E^2 = p^2 + m^2 \tag{27}$$

In SI-Einheiten:

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \tag{28}$$

Beide Formen sind mathematisch äquivalent.

8.2 Lorentz-Transformation

In natürlichen Einheiten:

$$E' = \gamma(E - p \cdot v) \tag{29}$$

In SI-Einheiten:

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

Die Physik bleibt invariant.

8.3 Klein-Gordon-Gleichung

In natürlichen Einheiten:

$$(\partial_\mu \partial^\mu + m^2)\phi = 0 \tag{31}$$

In SI-Einheiten:

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

Identische Physik, unterschiedliche Notation.

9 Referenzen zu T0-Dokumenten

9.1 Verwandte Dokumente

- **Dokument 013**: SI-System und T0-Theorie
- **Dokument 014**: Natürliche vs. SI-Einheiten
- **Dokument 015**: Systematik natürlicher Einheiten
- **Dokument 077**: $E=mc^2$ = E=m Analyse
- **Dokument 101**: Zirkularität der Konstanten (α-Konventionen)
- **Dokument 133**: Fraktale Korrektur K_frak Herleitung

9.2 Ableitungshierarchie

Die T0-Hierarchie (aus Dokument 101):

$$\xi \to D_f \to E_0 \to \alpha \to \hbar, c, G \to \text{Massenverhältnisse} \tag{33}$$

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