

FN-Merge-Oscillatio-v0.1-2026-05-17

Forschungsnotiz — Schwingung überall

Autor: Thomas Schüller · forschung@tschueller.com · ORCID 0009-0003-9799-6747 **Affiliation:** privat finanziert, ohne institutionelle Affiliation **Lizenz:** CC BY 4.0 · **Version:** 0.1 · **Datum:** 2026-05-17
Strang: FORSCHUNG / Merge / M3 Schwingung überall **Werkzeug:** OSCILLATIO · **Dokumenttyp:** Forschungsnotiz (Template v1.0)
Status: abgeschlossener Test mit dokumentierter Bewertung
Besonderheit: fünftes **Merge-Modul** — verbindet Mechanik, Audio, Optik und den Quanten-Cluster

1. These

Ein Pendel, eine Gitarrensaite, ein Radio-Schwingkreis und die Streckschwingung eines CO-Moleküls gelten als Gegenstände verschiedener Fächer. Das geprüfte engere Modell M1 lautet: *„Jede Schwingung braucht ihre eigene Theorie. Pendel, Saite, Schwingkreis und Molekülschwingung sind verschiedene Phänomene mit verschiedenen Gesetzen; Ähnlichkeiten sind oberflächlich.“*

Die Behauptung dieses Moduls: Alle vier folgen **derselben Differentialgleichung**, und das ist kein Zufall. Der harmonische Oszillator ist nicht ein Modell unter vielen, sondern die **generische erste Näherung für jedes stabile Gleichgewicht**.

Das Modul schließt direkt an M2 (ANALOGON) an. Dort brach die optisch-mechanische Analogie bei der Wellenlänge; hier bricht die klassische Beschreibung bei $\hbar$. Beide Male ist der Bruch nicht das Ende der Analogie, sondern der Übergang zur nächsten Theorie.

2. Annahmen

1. Jedes betrachtete System hat ein stabiles Gleichgewicht.
2. Das Potential ist um dieses Gleichgewicht in eine Taylorreihe entwickelbar.
3. Rückstell- und Trägheitsgröße sind identifizierbar.
4. Die Auslenkung ist klein genug, dass der quadratische Term dominiert.
5. Dämpfung und äußere Anregung sind vernachlässigbar.

3. Mathematisches Modell

M1 — „eigene Theorie je Schwingung“: Es gibt keine gemeinsame Gleichung.

M2 — ein Formalismus. Ein Potential $V(x)$ mit stabilem Gleichgewicht bei x_0 : $V(x) = V(x_0) + \underbrace{V'(x_0)}_{=0}(x-x_0) + \frac{1}{2}V''(x_0)(x-x_0)^2$

+ \dots] Der lineare Term verschwindet, weil $\langle x_0 \rangle$ ein Gleichgewicht ist. Der quadratische Term ergibt eine lineare Rückstellkraft $\langle F = -V''(x_0)(x-x_0) \rangle$ und damit $\langle \ddot{x} + \omega^2 x = 0, \text{quad } \omega = \sqrt{\frac{\text{Rückstellgröße}}{\text{Trägheitsgröße}}} \rangle$.

M3 — die Grenze. Für das Pendel lässt sich der Fehler exakt angeben: $\langle \frac{T}{T_0} = \frac{2}{\pi} K \left(\sin^2 \frac{\theta_0}{2} \right) = 1 + \frac{\theta_0^2}{16} + \frac{11\theta_0^4}{3072} + \dots \rangle$ mit $K(K)$ als vollständigem elliptischem Integral erster Art.

M4 — quantisiert. Dasselbe Potential ergibt quantenmechanisch $\langle E_n = \hbar \omega \left(n + \frac{1}{2} \right) \rangle$ also diskrete Energien und eine Nullpunktsenergie $\langle E_0 = \hbar \omega / 2 \neq 0 \rangle$.

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\langle \omega \rangle$	Kreisfrequenz	rad/s
$\langle \theta_0 \rangle$	Auslenkungswinkel	rad
$\langle K \rangle$	elliptisches Integral 1. Art	—
$\langle E_n \rangle$	Energieniveau	J
$\langle \hbar \rangle$	reduziertes Plancksches Wirkungsquantum	J·s

4. Parameter

Szenario	Setup
A Formalismus	fünf Systeme: Pendel (1 m), Feder-Masse (10 N/m, 0,1 kg), Saite (440 Hz), LC-Kreis (1 MHz), CO-Streckschwingung (2143 cm ⁻¹)
B Grenze	Auslenkungen 1° bis 179°, exakt gegen Näherung
C Quanten	dieselben Systeme quantisiert; CO bei 300 K

Toleranz: $\langle \epsilon = 10^{-9} \rangle$ für die normierte Abweichung in A; sonst $\langle \epsilon = 0 \rangle$.

5. Vorhersage

Szenario	Erwartung
A	normierte Lösungen deckungsgleich über viele Größenordnungen
B	Näherung bricht bei großen Auslenkungen, Fehler berechenbar
C	diskrete Energien; bei makroskopischen Systemen klassischer Grenzfall

6. Falsifikationskriterium

M1 ist widerlegt, sobald physikalisch verschiedene Systeme nachweislich derselben Gleichung folgen und die Gemeinsamkeit begründbar ist (nicht bloß zufällig).

7. Konkurrenzmodelle

- **K1 — eigene Theorie je Schwingung (M1):** geprüfenes engeres Modell.
- **K2 — Zufällige Ähnlichkeit:** dieselbe Gleichung ohne tieferen Grund — durch das Taylor-Argument widerlegt.
- **K3 — Taylor-Argument:** jedes stabile Gleichgewicht ergibt in erster Näherung ein quadratisches Potential.
- **K4 — Anharmonizität:** reale Systeme weichen ab; die Frage ist wie stark (Szene B).
- **K5 — Quantisierung:** derselbe Formalismus, andere Physik (Szene C).
- **K6 — Quantenfeldtheorie:** jede Feldmode ist ein harmonischer Oszillator — die weitreichendste Anwendung.

8. Versagensbereich

- **Nur der eindimensionale, ungedämpfte Oszillator.** Dämpfung, äußere Anregung, Resonanz (Audio 04), Nichtlinearität, gekoppelte Oszillatoren und Normalmoden fehlen.
- **Die Systemwerte sind typische Größenordnungen,** keine Messwerte eines konkreten Aufbaus.
- **Die Kleinwinkel-Analyse gilt für das mathematische Pendel.** Ein reales Pendel hat ausgedehnte Masse, Luftwiderstand und Aufhängungsreibung.
- **Anharmonische Effekte sind real und wichtig.** Molekülschwingungen sind nur nahe dem Grundzustand harmonisch; die Dissoziation ist ein rein anharmonischer Effekt, den dieses Modell nicht enthält.
- **Der Vergleich Quant/klassisch in Szene C ist qualitativ.** Die Aufenthaltsverteilungen werden gegenübergestellt, nicht die vollständige Zeitentwicklung.
- **Die Merge-Grenze aus M1 gilt.** Gemeinsame Mathematik heißt nicht gemeinsame Natur: eine Saite und ein Molekül sind nicht „dasselbe“.

9. Simulation

Numerische Auswertung in `oscillatio_simulation.py`:

1. Szene A: fünf Systeme, Kreisfrequenzen, Perioden; Vergleich der normierten Lösungen; Spannweite in Größenordnungen.
2. Szene B: exakte Pendelperiode über das elliptische Integral gegen die harmonische Näherung und die Reihenentwicklung; Bestimmung der 1 %-Grenze.
3. Szene C: Nullpunktsenergien und Quantensprünge; Quantenzahl bei typischer Energie; Boltzmann-Faktor für CO bei 300 K; Aufenthaltsverteilungen.

Ergebnisse in `oscillatio_results.json`, Plot als `oscillatio_szenen.svg`.

10. Ergebnis

10.1 A — Ein Formalismus

System	ω / (rad/s)	Periode / s
Pendel (1 m)	3,132	2,006
Feder-Masse	10,00	0,628
Saite (440 Hz)	$2,765 \cdot 10^3$	$2,273 \cdot 10^{-3}$

LC-Kreis (1 MHz)	$6,283 \cdot 10^6$	$1,000 \cdot 10^{-6}$
CO-Molekül	$4,037 \cdot 10^{14}$	$1,557 \cdot 10^{-14}$

Spannweite: $1,29 \cdot 10^{14}$, also 14,1 Größenordnungen. Maximale Abweichung der normierten Lösungen: $1,78 \cdot 10^{-15}$ (Maschinengenauigkeit).

Bewertung M1: widerlegt.

10.2 B — Die Kleinwinkel-Grenze

Auslenkung	$\backslash(T/T_0)$	Fehler der Näherung
5°	1,00048	0,048 %
10°	1,00191	0,191 %
20°	1,00767	0,767 %
23°	—	1,0 % (Grenze)
30°	1,01741	1,741 %
60°	1,07321	7,318 %
90°	1,18034	18,03 %
150°	1,76220	76,22 %

Bewertung M1: widerlegt (die Gemeinsamkeit ist real und quantifizierbar begrenzt).

10.3 C — Der Quantenoszillator

System	$\backslash(E_0) / J$	$\backslash(\Delta E) / eV$	Quantenzahl bei typischer Energie
Pendel	$1,65 \cdot 10^{-34}$	$2,06 \cdot 10^{-15}$	$3,0 \cdot 10^{30}$
Saite 440 Hz	$1,46 \cdot 10^{-31}$	$1,82 \cdot 10^{-12}$	$3,4 \cdot 10^{24}$
LC 1 MHz	$3,31 \cdot 10^{-28}$	$4,14 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{15}$
CO-Molekül	$2,13 \cdot 10^{-20}$	0,266	$\backslash(\Delta E/kT = 10\{, \}28\backslash)$

Eingefrorener Freiheitsgrad (CO bei 300 K):

Größe	Wert
$\backslash(\Delta E / kT)$	10,28
Boltzmann-Faktor	$3,44 \cdot 10^{-5}$
Anteil angeregter Moleküle	0,0034 %

Bewertung M1: widerlegt.

11. Bewertung

M1 („Jede Schwingung braucht ihre eigene Theorie“) ist in allen drei Szenarien widerlegt.

Szene A zeigt mehr als eine Übereinstimmung — sie zeigt, warum es keine sein kann. Fünf Systeme mit völlig verschiedener Physik — Schwerkraft, Federkraft, Saitenspannung, elektrisches Feld, chemische Bindung — folgen derselben Differentialgleichung. In normierten Koordinaten sind die Lösungen bei Maschinengenauigkeit deckungsgleich, über **14 Größenordnungen** in der Kreisfrequenz.

Der entscheidende Punkt ist nicht die numerische Übereinstimmung, sondern ihr Grund. Ein Potential lässt sich um jedes stabile Gleichgewicht in eine Taylorreihe entwickeln. Der konstante Term ist eine Energienullpunktswahl, der lineare Term **verschwindet notwendig** (sonst wäre es kein Gleichgewicht), also dominiert der quadratische. Ein quadratisches Potential ergibt aber **immer** eine lineare Rückstellkraft — und damit immer dieselbe Gleichung.

Daraus folgt: Der harmonische Oszillator ist nicht ein Modell unter vielen, sondern die generische erste Näherung für jedes stabile Gleichgewicht überhaupt. Das erklärt, warum dieselbe Mathematik von der Pendeluhr bis zur Quantenfeldtheorie trägt — und warum die Werkstatt-Stränge Mechanik, Audio und Quanten denselben Kern haben. Wer den harmonischen Oszillator versteht, hat nicht ein Phänomen verstanden, sondern die erste Näherung aller stabilen Systeme.

Szene B macht die Grenze rechenbar statt sie zu behaupten. Ein Pendel ist nicht harmonisch. Die Rückstellkraft geht mit $\sin(\theta)$, nicht mit θ ; erst die Kleinwinkelnäherung macht es harmonisch. Wie gut diese Näherung ist, lässt sich exakt angeben — über das vollständige elliptische Integral erster Art.

Das Ergebnis ist bemerkenswert robust: Bis 23° bleibt der Periodenfehler unter 1 %. Eine Pendeluhr mit $\pm 10^\circ$ Amplitude geht um 0,19 % falsch — etwa 2,7 Minuten pro Tag, was den Aufwand historischer Uhrmacher um Amplitudenkonstanz erklärt. Bei 90° sind es 18 %, bei 150° über 76 %.

Diese Rechenbarkeit ist der Unterschied zwischen einer tragfähigen Analogie und einer Redensart. „Alles schwingt gleich“ wäre eine Phrase. „Alles schwingt gleich, solange die Auslenkung klein ist, und der Fehler beträgt bei 30° genau 1,74 %“ ist eine Aussage. Die Merge-Regel verlangt genau das (Merge-Architektur, Abschnitt 6): keine Analogie ohne Rechnung, und die Grenzen gehören mitgeschrieben.

Szene C liefert den weitreichendsten Befund — und er ist historisch geprüft. Derselbe Formalismus, quantisiert, ergibt völlig andere Physik: diskrete Energien, eine Nullpunktsenergie (der Oszillator kommt **nie** zur Ruhe, klassisch wäre $E=0$ erlaubt), und eine Aufenthaltsverteilung, die der klassischen **gegenläufig** ist. Im Grundzustand ist das Teilchen am wahrscheinlichsten in der Mitte — klassisch ist es dort am schnellsten und hält sich am kürzesten auf.

Für makroskopische Systeme ist die Quantennatur unsichtbar: Das Pendel sitzt bei Quantenzahl $n \approx 3 \cdot 10^{30}$, die Stufen sind unmessbar fein. Beim CO-Molekül kehrt sich das um — und hier liegt der interessanteste Punkt.

Für CO bei 300 K ist $\Delta E/kT = 10^{-28}$, der Boltzmann-Faktor $(3 \cdot 10^{-5})$: **nur 0,0034 % der Moleküle sind angeregt.** Die Schwingung ist eingefroren und trägt zur Wärmekapazität fast nichts bei.

Das war ein ungelöstes Problem der klassischen Physik. Der Gleichverteilungssatz fordert $kT/2$ pro Freiheitsgrad — einen festen Beitrag jedes Freiheitsgrads zur Molwärme, unabhängig von der Temperatur. Gemessen wurde das nicht: Bei zweiatomigen Gasen fehlte der Schwingungsbeitrag bei Raumtemperatur, und die Molwärme fester Körper fiel zu tiefen Temperaturen hin ab. Maxwell nannte es eine der größten Schwierigkeiten der kinetischen Theorie.

Einstein (1907) und Debye (1912) lösten es mit dem quantisierten Oszillator: Ist $\hbar\omega \gg kT$, kann der Freiheitsgrad nicht angeregt werden und fällt aus. Die

Wärmekapazität wird temperaturabhängig. Das war einer der frühesten Erfolge der Quantentheorie außerhalb der Strahlungsgesetze — und er beruht auf genau dem Oszillator, der klassisch die Pendeluhr beschreibt.

Der Anschluss an M2 ist exakt parallel. Dort brach die optisch-mechanische Analogie bei der Wellenlänge, und der Bruch führte über de Broglie und Schrödinger zur Wellenmechanik. Hier bricht die klassische Beschreibung bei $(\hbar)$, und der Bruch führte über Einstein und Debye zur Quantenstatistik. **In beiden Fällen war der Versagensbereich der produktivste Teil.** Das ist inzwischen ein Muster im Merge-Strang, kein Einzelfall.

12. Nächster Test

L6 Gestaltgesetze (GESTALT) zum Abschluss des Wahrnehmungs-Strangs, oder der **Quanten-Cluster (Wunschliste B)**, für den dieses Modul die Grundlage legt: Der quantisierte harmonische Oszillator ist das einzige exakt lösbare Potential der Quantenmechanik und die Basis der Quantenfeldtheorie.

Mögliche Erweiterung v0.2: Dämpfung und Resonanz (Anschluss Audio 04); gekoppelte Oszillatoren und Normalmoden; anharmonische Potentiale (Morse-Potential, Dissoziation); parametrische Anregung; der Oszillator in der Quantenfeldtheorie.

Anhang A — Querverweise

- Praxis-Erklärung: PRAXIS-Oscillatio.md · Begleitpapier: BEGLEITPAPIER-Oscillatio.md
- Werkzeug: OSCILLATIO.html
- Code: oscillatio_simulation.py · Plot: oscillatio_szenen.svg · Daten: oscillatio_results.json
- **Verwendete Module:** M2 Optische Mechanik (Bruch-Muster), M1 Signalkette (Merge-Regel), Mechanik 01/03, Audio 02/03/04, 01 Doppelspalt
- **Planungsdokument:** MERGE-ARCHITEKTUR-v0.1-2026-05-17.md

Anhang B — Externer Bestandscheck

- **Einstein (1907)** — Wärmekapazität mit quantisierten Oszillatoren.
- **Debye (1912)** — Verfeinerung für Festkörper.
- **Feynman, Lectures I-21/23** — der Oszillator als universelles Modell.
- **Landau & Lifschitz, Mechanik** — Kleinwinkelnäherung und Anharmonizität.
- **Morse (1929)** — anharmonisches Molekülpotential.

Was die Werkstatt-Notiz davon unterscheidet: die numerische Prüfung der Deckungsgleichheit über 14 Größenordnungen; die exakte Bestimmung der Kleinwinkel-Grenze statt der üblichen Faustregel; die Verbindung von klassischem und quantisiertem Oszillator zum historischen Problem der Wärmekapazität; die Parallele zum Bruch-Muster aus M2.

Anhang C — Quellen

- Einstein, A. (1907). Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme. *Annalen der Physik* 327:180–190.

- Debye, P. (1912). Zur Theorie der spezifischen Wärmen. *Annalen der Physik* 344:789–839.
- Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M. (1963). *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. I. Addison-Wesley.
- Landau, L. D.; Lifschitz, E. M. (1976). *Mechanics*. 3. Aufl., Butterworth-Heinemann.
- Morse, P. M. (1929). Diatomic molecules according to the wave mechanics. *Physical Review* 34:57–64.

Wortzahl: ca. 2000 · Seiten: 9 · Version 0.1 · 2026-05-17