

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

Forschungsnotiz — Optische Mechanik

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 / M2 Optische Mechanik **Werkzeug:** ANALOGON · **Dokumenttyp:** Forschungsnotiz (Template v1.0)
Status: abgeschlossener Test mit dokumentierter Bewertung
Besonderheit: viertes **Merge-Modul** — verbindet Strang I (Optik) und Strang II (Mechanik)

1. These

Ein Lichtstrahl, der durch Glas läuft, und ein Stein, der durch die Luft fliegt, gelten als Gegenstände verschiedener Gebiete. Das geprüfte engere Modell M1 lautet entsprechend: *„Optik und Mechanik sind getrennte Gebiete. Licht und Materie folgen verschiedenen Gesetzen; die Ähnlichkeit von Strahlengang und Bahnkurve ist oberflächlich.“*

Die Behauptung dieses Moduls: Beide folgen **derselben Variationsrechnung**. Fermats Prinzip (Licht nimmt den Weg extremaler optischer Weglänge) und das Maupertuis-Prinzip (ein Körper nimmt den Weg extremaler Wirkung) sind nicht ähnlich, sondern formal identisch — mit der Zuordnung Brechungsindex $\leftrightarrow$ Impuls.

Dieses Modul hat eine Besonderheit. Die Merge-Regel verlangt, die **Grenzen** jeder Analogie mitzuschreiben (Merge-Architektur, Abschnitt 6). Hier ist die Grenze nicht eine Einschränkung, sondern der wertvollste Teil: Die Analogie bricht an einer bestimmten Stelle — und dieser Bruch führte historisch zur Wellenmechanik.

2. Annahmen

1. Beide Prinzipien lassen sich als Extremalproblem über denselben Wegparameter formulieren.
2. Der Brechungsindex n und der Impuls p sind die jeweils gewichtenden Größen.
3. Die Extremalbedingung ist numerisch auffindbar.
4. Aus der Extremalbedingung folgt in beiden Fällen ein Brechungsgesetz.
5. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit von n und p ist bekannt und verschieden.

3. Mathematisches Modell

M1 — „getrennte Gebiete“: Es gibt keine gemeinsame Formulierung; Übereinstimmungen sind zufällig.

M2 — formale Identität. Fermats Prinzip: $\delta \int n \, ds = 0$.
 Maupertuis' Prinzip (zeitunabhängige Form des Hamiltonschen Prinzips): $\delta \int p \, ds = 0$. Dieselbe Struktur mit $(n \rightarrow p)$. Aus beiden folgt an einer Grenzfläche ein Brechungsgesetz: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$
 $\Leftrightarrow$ bzw. $p_1 \sin \theta_1 = p_2 \sin \theta_2$.

M3 — das Vorzeichen-Kriterium. Hier wird die Analogie prüfbar. Für Licht gilt $(n = c/v)$, für ein Teilchen $(p = mv)$. Daraus: $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \Leftrightarrow$ gegen $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{v_2}{v_1}$. **Exakt invers.** Gleiche Bahnform, entgegengesetzte Geschwindigkeitsänderung.

M4 — der Bruch. Geometrische Optik ist der Grenzfall $(\lambda \rightarrow 0)$ der Wellenoptik (Eikonal-Näherung). Trägt die Analogie, so muss die klassische Mechanik Grenzfall einer Wellenmechanik sein, mit $\lambda_{\text{dB}} = \frac{h}{p}$.

Symbol	Bedeutung	Einheit
(n)	Brechungsindex	—
(p)	Impuls	kg·m/s
(S)	Eikonal / Wirkungsfunktion	— bzw. J·s
(λ_{dB})	de-Broglie-Wellenlänge	m

4. Parameter

Szenario	Setup
A Identität	Grenzfläche bei $(x=0)$; Start $(-2, 1, 5)$, Ziel $(2, -1, 2)$; $(n_1=p_1=1, 0)$, $(n_2=p_2=1, 5)$; 20 001 Stützstellen
B Vorzeichen	Luft $\rightarrow$ Wasser, $(n=1, 333)$, Einfallswinkel 45°
C Bruch	sechs Fälle vom Elektron bis zum Menschen; zwei Kriterien (Dominanz, Messbarkeit)

Toleranz: $(\epsilon = 10^{-6})$ für die Wegdifferenz in A; sonst $(\epsilon = 0)$.

5. Vorhersage

Szenario	Erwartung
A	beide Prinzipien liefern denselben Extremalweg
B	Bahnform gleich, Geschwindigkeitsvorhersagen invers
C	Übergang klassisch/quantenhaft bei (λ_{dB}) vergleichbar mit der Systemgröße

6. Falsifikationskriterium

M1 ist widerlegt, sobald (a) beide Prinzipien nachweislich dieselbe Rechnung sind, (b) die Analogie eine entscheidbare Vorhersage liefert, oder (c) aus ihr eine physikalische Theorie hervorging.

7. Konkurrenzmodelle

- **K1 — getrennte Gebiete (M1):** geprüft es engeres Modell.
- **K2 — formale Analogie ohne Substanz:** dieselbe Mathematik, aber ohne physikalische Bedeutung — durch Szene B und C widerlegt.
- **K3 — Hamiltons Programm (1834):** die Analogie als systematische Grundlage der Mechanik.
- **K4 — de Broglies Schluss (1924):** die Analogie ernst genommen ergibt Materiewellen.
- **K5 — Schrödingers Weg (1926):** die Wellengleichung, deren Kurzwellen-Grenzfall Hamilton-Jacobi ist.
- **K6 — Newtons Korpuskeltheorie:** Licht als klassische Teilchen — durch Szene B experimentell entschieden und widerlegt.

8. Versagensbereich

- **Die Zuordnung gilt für die zeitunabhängige Form.** Maupertuis' Prinzip setzt Energieerhaltung voraus. Die vollständige Hamiltonsche Mechanik enthält mehr: Zeitabhängigkeit, Phasenraum, kanonische Transformationen.
- **$\langle n \rangle$ und $\langle p \rangle$ sind nicht dimensionsgleich.** In Szene A werden gleiche Zahlenwerte verwendet, um die Identität der Rechnung zu zeigen. Das ist eine mathematische, keine physikalische Gleichsetzung: $\langle n \rangle$ ist dimensionslos, $\langle p \rangle$ hat eine Einheit.
- **Die Analogie ist keine Identität der Gegenstände.** Licht und Materie teilen eine Struktur, nicht eine Natur. Die Merge-Grenze aus Modul M1 gilt auch hier.
- **Newtons Korpuskeln sind nicht das Photon.** Szene B widerlegt klassische Lichtteilchen mit $\langle p = mv \rangle$. Das Photon hat $\langle p = h/\lambda \rangle$ und ist damit kein Gegenbeispiel — die Ironie wird in Abschnitt 11 behandelt.
- **Das Kriterium klassisch/quantenhaft ist keine scharfe Schwelle.** Siehe Korrektur in Abschnitt 11.
- **Nicht behandelt:** Lagrange-Formalismus im Detail, Noether-Theorem, relativistische Verallgemeinerung, Pfadintegral (wo die Analogie ihre vollendete Form findet).

9. Simulation

Numerische Auswertung in `optmech_simulation.py`:

1. Szene A: numerische Minimierung beider Funktionale über 20 001 Stützstellen; Vergleich der Extrema; Rückrechnung des Brechungsgesetzes.
2. Szene B: Brechungswinkel aus Snellius; Geschwindigkeitsvorhersagen beider Theorien; Faktor dazwischen.
3. Szene C: de-Broglie-Wellenlängen für sechs Fälle; getrennte Prüfung auf Dominanz und Messbarkeit.

Ergebnisse in `optmech_results.json`, Plot als `optmech_szenen.svg`.

10. Ergebnis

10.1 A — Formale Identität

Größe	Wert
Extremum Optik (f_n ds)	$\lambda(y = -0{,}2305\lambda)$
Extremum Mechanik (f_p ds)	$\lambda(y = -0{,}2305\lambda)$
Differenz	0,0
Snellius-Prüfung λ ($n_1 \sin \theta_1$)	0,654319
Snellius-Prüfung λ ($n_2 \sin \theta_2$)	0,654303
Abweichung	$(1{,}6 \cdot 10^{-5})$ (Gitterauflösung)

Bewertung M1: widerlegt.

10.2 B — Das Vorzeichen-Kriterium

Luft → Wasser, Einfallswinkel 45°, Brechungswinkel 32,04°:

Theorie	(v_2/v_1)	Aussage
Wellentheorie	0,7502	im dichteren Medium langsamer
Korpuskeltheorie (Newton)	1,3330	im dichteren Medium schneller
Faktor zwischen den Vorhersagen	1,777	

Foucault und Fizeau (1850): Licht in Wasser ist **langsamer**. Newtons Korpuskeltheorie widerlegt.

Bewertung M1: widerlegt.

10.3 C — Der produktive Bruch

Fall	(λ_{dB})	(λ/L)	Regime
Elektron im Atom (1 eV)	1,23 nm	12,3	Wellenmechanik nötig
Neutron (thermisch)	0,18 nm	0,60	Wellenmechanik nötig
Elektron im TEM (100 keV)	4,4 pm	0,044	Wellenmechanik nötig
C60 (Arndt 1999)	2,8 pm	$2,8 \cdot 10^{-5}$	klassische Dynamik, Interferenz messbar
Staubkorn (1 μg)	$6,6 \cdot 10^{-22}$ m	$6,6 \cdot 10^{-16}$	klassischer Grenzfall
Mensch beim Gehen	$6,8 \cdot 10^{-36}$ m	$6,8 \cdot 10^{-36}$	klassischer Grenzfall

C60 im Detail: Beugungswinkel $(2{,}77 \cdot 10^{-5})$ rad, Aufspaltung über 1,25 m Flugstrecke **34,6 μm** — messbar.

Bewertung M1: widerlegt.

11. Bewertung

M1 („Optik und Mechanik sind getrennte Gebiete“) ist in allen drei Szenarien widerlegt — und die drei Widerlegungen greifen auf steigender Ebene: formal, experimentell, historisch.

Szene A zeigt die Identität, nicht die Ähnlichkeit. Beide Prinzipien liefern bei gleichen Zahlenwerten denselben Extremalweg mit Differenz exakt null. Das ist kein numerischer Zufall, sondern die Konsequenz daraus, dass es dieselbe Rechnung ist: ein Funktional der Form $\int f(x, y, y', x) dx$ wird extremal gemacht, wobei f einmal n und einmal p heißt. Die Rückrechnung bestätigt in beiden Fällen ein Brechungsgesetz derselben Form.

Die Zuordnung reicht weiter als bis zum Brechungsgesetz: Eikonal $\leftrightarrow$ Wirkungsfunktion, Wellenfronten $\leftrightarrow$ Flächen konstanter Wirkung, Lichtstrahlen $\leftrightarrow$ Teilchenbahnen, Eikonalgleichung $\leftrightarrow$ Hamilton-Jacobi-Gleichung. Das ist kein Katalog von Ähnlichkeiten, sondern eine durchgehende strukturelle Entsprechung.

Szene B zeigt, dass die Analogie Zähne hat. Ein häufiger Einwand gegen formale Analogien lautet, sie seien mathematische Spielereien ohne physikalischen Gehalt (K2). Hier lässt sich das prüfen — und der Befund ist bemerkenswert.

Die Analogie ist gerade **nicht** trivial, weil n und p **entgegengesetzt** von der Geschwindigkeit abhängen: $n = c/v$ nimmt zu, wenn v abnimmt; $p = mv$ nimmt ab. Beide Bilder sagen deshalb dieselbe Bahnform voraus — aber inverse Geschwindigkeitsänderungen. Für Luft $\rightarrow$ Wasser bei 45° : die Wellentheorie fordert $(v_2/v_1 = 0{,}75)$, Newtons Korpuskeln $(1{,}33)$. Ein Faktor $1{,}78$ zwischen den Vorhersagen, bei identischem beobachtetem Strahlengang.

Das machte die Frage entscheidbar. Über anderthalb Jahrhunderte war nicht zu klären, ob Licht Welle oder Teilchen ist, weil beide Bilder dieselbe Brechung erklärten. Foucault und Fizeau maßen 1850 die Lichtgeschwindigkeit in Wasser **direkt** — und fanden sie langsamer. Newtons Korpuskeltheorie war damit widerlegt. Eine formale Analogie hatte ein *experimentum crucis* geliefert.

Die Ironie gehört dazu: Licht ist heute beides, Welle und Quant. Aber Newtons Korpuskeln waren **klassische** Teilchen mit $p = mv$, und die sind widerlegt. Das Photon hat $p = h/\lambda$ — eine Beziehung, die die Wellenlänge enthält und damit zur Wellenbeschreibung zurückführt. Szene B widerlegt nicht „Licht ist teilchenartig“, sondern „Licht besteht aus klassischen Massenpunkten“.

Szene C zeigt, wo die Analogie endet — und warum das der wichtigste Teil ist. Die geometrische Optik ist der Grenzfall $\lambda \rightarrow 0$ der Wellenoptik. Wenn die Analogie mehr ist als Zufall, dann muss auch die klassische Mechanik der Grenzfall einer Wellentheorie sein, deren Wellenlänge bei makroskopischen Objekten verschwindend klein wird.

Hamilton formulierte die Analogie 1834, ohne von Materiewellen zu wissen; sie blieb neunzig Jahre eine mathematische Kuriosität. **De Broglie (1924) nahm sie ernst** und postulierte $\lambda = h/p$. **Schrödinger (1926) ging den letzten Schritt** und suchte die Wellengleichung, deren Kurzwellen-Grenzfall die Hamilton-Jacobi-Gleichung ergibt. Das Ergebnis war die Wellenmechanik.

Für die Merge-Architektur ist das ein Sonderfall. Die Regel verlangt, Grenzen jeder Analogie zu dokumentieren, damit der Merge-Gedanke nicht ins Beliebig kippt. Hier ist der **Versagensbereich der**

produktivste Teil: Die Analogie versagt genau dort, wo die Wellenlänge relevant wird, und dieses Versagen war die Spur zur Quantenmechanik. Ein dokumentierter Versagensbereich ist nicht nur eine Einschränkung — er kann der Ort sein, an dem die nächste Theorie ansetzt.

Zur Korrektur in Szene C. Die erste Fassung verwendete ein einziges Kriterium, λ_{dB} im Verhältnis zur Systemgröße, mit der Schwelle (10^{-3}) . Das ordnete **C60 als klassischen Grenzfall** ein — ausgerechnet das Molekül, mit dem Arndt et al. 1999 Materiewellen-Interferenz nachwiesen. Die Klassifikation widersprach also einem der bekanntesten Experimente des Feldes.

Der Fehler lag im Kriterium selbst. Zu unterscheiden sind zwei verschiedene Fragen: **Dominanz** (bestimmen Quanteneffekte die Dynamik?) und **Messbarkeit** (ist Interferenz mit gegebener Apparatur nachweisbar?). Bei C60 fällt beides auseinander: Bei einer Gitterperiode von 100 nm ist $\lambda/L = 2,8 \cdot 10^{-5}$, die Dynamik also klar klassisch — aber der Beugungswinkel von $(2,8 \cdot 10^{-5})$ rad ergibt über 1,25 m Flugstrecke eine Aufspaltung von 34,6 μm , und die ist messbar.

„Klassisch“ ist damit keine scharfe Schwelle, sondern hängt davon ab, was man misst und wie genau. Der Fehler wird hier dokumentiert statt stillschweigend behoben (Werkstattlinie); die Korrektur hat die Aussage geschärft statt nur repariert.

12. Nächster Test

Modul M3 Schwingung überall (OSCILLATIO) als naheliegende Fortsetzung: der harmonische Oszillator von Pendel über Saite und elektromagnetische Welle bis zum Quantenoszillator — ein Formalismus, fünf Kontexte, zwanzig Größenordnungen. Oder **L6 Gestaltungsgesetze**, das den Wahrnehmungs-Strang abschließt.

Mögliche Erweiterung v0.2: Lagrange-Formalismus und Noether-Theorem; das Pfadintegral als vollendete Form der Analogie; relativistische Verallgemeinerung; Brachistochrone als gemeinsames Beispiel; Gradientenmedien (Fata Morgana) neben der Bahn im Schwerfeld.

Anhang A — Querverweise

- Praxis-Erklärung: PRAXIS-OptMech.md · Begleitpapier: BEGLEITPAPIER-OptMech.md
- Werkzeug: ANALOGON.html
- Code: optmech_simulation.py · Plot: optmech_szenen.svg · Daten: optmech_results.json
- **Verwendete Module:** M1 Signalkette (Merge-Regel), 05 Linsen, 06 Prismen (Brechung), Mechanik 01/03, 01 Doppelspalt (Wellenoptik)
- **Planungsdokument:** MERGE-ARCHITEKTUR-v0.1-2026-05-17.md

Anhang B — Externer Bestandscheck

- **Hamilton (1834/35)** — die optisch-mechanische Analogie.
- **Foucault (1850), Fizeau (1850)** — Lichtgeschwindigkeit in Wasser.
- **de Broglie (1924)** — Materiewellen.
- **Schrödinger (1926)** — Wellenmechanik aus der Analogie.

- **Arndt et al. (1999)** — Interferenz von C60.
- **Goldstein, *Classical Mechanics*** — Standarddarstellung der Analogie.

Was die Werkstatt-Notiz davon unterscheidet: die numerische Prüfung der Identität statt bloßer Behauptung; das Vorzeichen-Kriterium als durchgerechnetes *experimentum crucis*; die Trennung von Dominanz und Messbarkeit beim Übergang klassisch/quantenhaft; die Einordnung des Versagensbereichs als produktiver Teil der Analogie.

Anhang C — Quellen

- Hamilton, W. R. (1834). On a General Method in Dynamics. *Phil. Trans. R. Soc.* 124:247–308.
- Foucault, L. (1850). Méthode générale pour mesurer la vitesse de la lumière. *Comptes Rendus* 30:551–560.
- de Broglie, L. (1924). *Recherches sur la théorie des quanta*. Dissertation, Paris.
- Schrödinger, E. (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem. *Annalen der Physik* 384:361–376.
- Arndt, M. et al. (1999). Wave-particle duality of C60 molecules. *Nature* 401:680–682.
- Goldstein, H.; Poole, C.; Safko, J. (2002). *Classical Mechanics*. 3. Aufl., Addison-Wesley.