

FN-Quanten-Dualitas-v0.1-2026-05-17

Forschungsnotiz — Doppelspalt mit einzelnen Quanten

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 / Quanten / Q1 Doppelspalt **Werkzeug:** DUALITAS · **Dokumenttyp:** Forschungsnotiz (Template v1.0) **Status:** abgeschlossener Test mit dokumentierter Bewertung **Besonderheit:** eröffnet den Quanten-Cluster

1. These

Zwei Merge-Module liefen auf denselben Punkt zu. In **M2 (ANALOGON)** brach die optisch-mechanische Analogie bei der Wellenlänge — de Broglie und Schrödinger nahmen den Bruch ernst und kamen zur Wellenmechanik. In **M3 (OSCILLATIO)** brach die klassische Beschreibung bei $\hbar$ — Einstein und Debye lösten damit das Wärmekapazitäts-Rätsel. Beide Male war der Bruch der Übergang. Hier wird er zum Gegenstand.

Das geprüfte engere Modell M1 lautet: *„Ein Teilchen geht durch einen der beiden Spalte. Was am Schirm ankommt, ist entweder durch A oder durch B gekommen; das Muster ist die Summe beider Möglichkeiten.“*

Die Behauptung dieses Moduls: M1 ist falsch, und zwar nachweisbar — die klassische Summe zweier Einzelspalte reproduziert das gemessene Muster nicht. Zugleich ist jede einzelne Detektion ein lokalisierter Punkt. **Weder „Teilchen“ noch „Welle“ erfasst allein den Befund.**

Eine Abgrenzung vorweg, die für dieses ganze Modul gilt: Was hier gerechnet wird, sind Wahrscheinlichkeiten für Messergebnisse. Was zwischen Quelle und Schirm geschieht, steht **nicht** im Formalismus. Populäre Darstellungen führen dort Erzählungen ein — „das Teilchen weiß“, „der Beobachter entscheidet“ —, die die Rechnung nicht hergibt. Die Deutungsfrage ist Gegenstand des geplanten Moduls W2 und bleibt hier ausdrücklich offen.

2. Annahmen

1. Die Quelle emittiert einzelne Quanten, zeitlich getrennt.
2. Jede Detektion ist ein lokalisiertes Ereignis an einem Ort.
3. Die Quantenmechanik liefert eine Wahrscheinlichkeitsdichte für den Detektionsort.
4. Weginformation lässt sich als Unterscheidbarkeit $\langle D \rangle$ quantifizieren.
5. Sichtbarkeit $\langle V \rangle$ ist relativ zur lokalen Einhüllenden definiert.

3. Mathematisches Modell

M1 — „ein Weg“: Das Muster ist die Summe der Einzelspalt-Verteilungen: $P_{\text{klass}}(x) = \frac{1}{2} \left[I_1(x) + I_2(x) \right]$

M2 — Quantenvorhersage. Die Amplituden werden addiert, nicht die Intensitäten: $P(x) = \left| \psi_1(x) + \psi_2(x) \right|^2 = I_{\text{env}}(x) \frac{1 + \cos(\Delta(x))}{2}$, $\Leftrightarrow \Delta = \frac{2\pi d}{\lambda L}$

M3 — Komplementarität (Englert 1996). Für Weginformation $\langle D \rangle$ und Sichtbarkeit $\langle V \rangle$: $\langle V^2 \rangle + \langle D^2 \rangle \leq 1$ mit Gleichheit bei idealer Messung.

M4 — Vergleich der Modelle. Für dieselben Daten wird das Log-Likelihood-Verhältnis gebildet: $\Delta = \sum_i \left[\log P(x_i) - \log P_{\text{klass}}(x_i) \right]$

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\langle d \rangle$	Spaltabstand	—
$\langle V \rangle$	Sichtbarkeit der Streifen	—
$\langle D \rangle$	Unterscheidbarkeit der Wege	—
$\langle \Delta \rangle$	Log-Likelihood-Verhältnis	—

4. Parameter

Szenario	Setup
A Einzelereignisse	$\langle d \rangle = 6 \mu\text{m}$, $\langle a \rangle = 1 \mu\text{m}$; N von 1 bis 100 000; 400 bzw. 40 Wiederholungen je Stufe
B Komplementarität	$\langle D \rangle$ von 0 bis 1 in acht Stufen
C Quantenradierer	Sichtbarkeit im flachen Bereich $\langle x \rangle < 0{,}4 \mu\text{m}$, Einhüllende herausdividiert

Toleranz: $\langle \epsilon \rangle = 0$ in A, $\langle 10^{-9} \rangle$ in B, $\langle 0{,}1 \rangle$ in C.

5. Vorhersage

Szenario	Erwartung
A	bei kleinem N keine Unterscheidung; mit wachsendem N klare Bevorzugung der Quantenvorhersage
B	$\langle V^2 + D^2 \rangle = 1$ über den ganzen Bereich
C	Teilmengen mit voller Sichtbarkeit, Summe ohne Streifen

6. Falsifikationskriterium

M1 ist widerlegt, sobald die klassische Summe die Daten signifikant schlechter beschreibt als die Quantenvorhersage — gemessen am Log-Likelihood-Verhältnis relativ zu seiner Streuung.

7. Konkurrenzmodelle

- **K1 — ein Weg (M1):** geprüfenes engeres Modell; entspricht der klassischen Teilchenvorstellung.
- **K2 — reine Wellenbeschreibung:** erklärt das Muster, aber nicht die lokalisierten Einzeldetektionen.
- **K3 — Komplementarität (Bohr):** Welle und Teilchen als sich ausschließende Beschreibungen.
- **K4 — quantitative Komplementarität (Englert):** eine Ungleichung statt eines Schalters — schärfer als K3.
- **K5 — Deutungen:** Kopenhagen, Viele-Welten, Bohm, GRW, QBism — sie unterscheiden sich in der Erzählung, **nicht in den Vorhersagen**. Gegenstand von W2.
- **K6 — Dekohärenz:** erklärt, warum Interferenz in makroskopischen Systemen verschwindet — beantwortet aber nicht die Deutungsfrage.

8. Versagensbereich

- **Idealisierter Aufbau.** Punktquelle, monochromatisch, keine Dekohärenz, perfekte Detektoren. Reale Experimente kämpfen mit all dem.
- **Willkürliche Einheiten.** $\langle d \rangle$, $\langle a \rangle$, $\langle \lambda \rangle$, $\langle L \rangle$ sind dimensionslos gewählt; die Rechnung zeigt Struktur, keine konkreten Streifenabstände.
- **Die Englert-Relation wird nicht hergeleitet**, sondern verwendet. Ihre Herleitung erfordert den vollen Formalismus.
- **Der Quantenradierer wird nicht dynamisch simuliert.** Die Koinzidenz-Teilungen werden aus dem bekannten Ergebnis konstruiert, nicht aus einer Zweiteilchen-Rechnung. Das zeigt die Struktur korrekt, ersetzt aber keine Verschränkungsrechnung.
- **Keine Deutung.** Was zwischen Quelle und Schirm geschieht, ist hier ausdrücklich **nicht** Gegenstand. Wer eine Antwort darauf sucht, findet sie in dieser Notiz nicht — und im Formalismus auch nicht.
- **Kein Bell-Test.** Die Frage nach lokalem Realismus ist ein eigenes Thema (geplant im Cluster).

9. Simulation

Numerische Auswertung in `dualitas_simulation.py`:

1. Szene A: Ziehen von Detektionsorten aus der Quantenvorhersage; Log-Likelihood beider Modelle für dieselben Daten; Mittelwert und Streuung über viele Wiederholungen.
2. Szene B: Englert-Relation für acht Werte von $\langle D \rangle$; Prüfung der Gleichheit.
3. Szene C: Sichtbarkeit von Gesamtmuster, markiertem Muster und beiden Teilmengen, jeweils mit herausdividiertem Einhüllender.

Ergebnisse in `dualitas_results.json`, Plot als `dualitas_szenen.svg`.

10. Ergebnis

10.1 A — Einzelereignisse

N	$\langle \Delta \rangle$ (Mittel)	Streuung	S/N	belastbar
1	5,94	4,27	1,39	nein
10	58,78	15,52	3,79	ja

100	586,77	46,23	12,69	ja
1 000	5 862,63	142,22	41,22	ja
10 000	58 649,72	408,17	143,69	ja
100 000	585 775,94	1 537,93	380,89	ja

Bewertung M1: widerlegt.

10.2 B — Komplementarität

$\backslash(D\backslash)$	$\backslash(V\backslash)$	$\backslash(V^2+D^2\backslash)$
0,0	1,0000	1,000000
0,4	0,9165	1,000000
0,707	0,7072	1,000000
0,8	0,6000	1,000000
0,95	0,3122	1,000000
1,0	0,0000	1,000000

Bewertung M1: widerlegt.

10.3 C — Quantenradierer

Bedingung	Sichtbarkeit
ohne Weginformation	1,0000
mit Weginformation	0,0000
Koinzidenz-Teilmenge 1	1,0000
Koinzidenz-Teilmenge 2	1,0000
Summe beider Teilmengen	0,0000

Bewertung M1: widerlegt.

11. Bewertung

M1 („ein Teilchen geht durch einen der beiden Spalte“) ist in allen drei Szenarien widerlegt.

Szene A zeigt beides zugleich. Jede einzelne Detektion ist ein Punkt — lokalisiert, an einem Ort, nicht verschmiert. Das ist teilchenhaft und kein Interpretationsspielraum: Der Detektor klickt einmal, an einer Stelle.

Und doch reproduziert die klassische Summe zweier Einzelspalte die Verteilung dieser Punkte nicht. Das Log-Likelihood-Verhältnis wächst linear mit der Ereigniszahl; bei 100 000 Detektionen beträgt das Signal-Rausch-Verhältnis 381. Die Daten bevorzugen die Quantenvorhersage nicht knapp, sondern überwältigend.

Wichtig ist die Untergrenze. Bei $N = 1$ liegt S/N bei 1,39 — **keine Unterscheidung möglich.** Ein einzelner Punkt passt zu beiden Modellen; er kann zufällig dort landen, wo die Vorhersagen auseinandergehen. Erst ab etwa zehn Ereignissen wird die Aussage belastbar. Das ist keine Schwäche der Rechnung, sondern eine sachliche Eigenschaft: **Das Interferenzmuster ist eine Aussage über Ensembles, nicht über einzelne Quanten.** Ein einzelnes Quant „interferiert“ nicht sichtbar — es landet an einem Ort.

Szene B ersetzt einen Schalter durch eine Bilanz. Bohrs Komplementarität wird oft als Entweder-Oder dargestellt: entweder Welle oder Teilchen, je nach Versuchsanordnung. Englerts Relation \

$(V^2 + D^2 \leq 1)$ ist präziser. Die Rechnung bestätigt die Gleichheit über den ganzen Bereich exakt.

Entscheidend ist der Zwischenbereich. Bei $(D = V = 0,707)$ hat man **beides zu 71 %**: teilweise Weginformation *und* teilweise sichtbare Streifen. Es gibt keinen Umschaltpunkt. **Die Frage ist nicht „Welle oder Teilchen“, sondern: wie viel Weginformation habe ich, und wie viel Interferenz bleibt dann übrig?** Die Antwort ist eine Ungleichung.

Das trifft M1 direkt: M1 setzt volle Weginformation voraus ($D = 1$) und müsste damit ($V = 0$) erzwingen. Gemessen wird aber Interferenz — also ist die Weginformation nicht vorhanden.

Szene C entschärft ein verbreitetes Missverständnis. Der Quantenradierer wird oft so erzählt, als könne eine spätere Entscheidung die Vergangenheit ändern. Die Rechnung zeigt, was tatsächlich passiert.

Die beiden Koinzidenz-Teilmenen haben je volle Sichtbarkeit (1,0), aber sie sind um eine halbe Periode gegeneinander verschoben. **Ihre Summe hat Sichtbarkeit exakt 0,0.** Das heißt: **Das Gesamtmuster am Schirm ändert sich nie.** Wer nur den Schirm betrachtet, sieht immer dasselbe strukturlose Bild — ob die Weginformation gelöscht wurde oder nicht.

Die Streifen erscheinen erst, wenn man die Detektionen nachträglich nach dem Messergebnis am Partnerteilchen **sortiert**. Diese Sortierinformation muss klassisch übermittelt werden. **Deshalb lässt sich damit nichts übertragen und nichts rückwirkend ändern:** Ohne die Information, wie zu sortieren ist, sieht der Empfänger nur Rauschen. Der Quantenradierer ist kein Kanal in die Vergangenheit — er ist eine Aussage darüber, welche Korrelationen in den Daten stecken.

Was dieses Modul nicht leistet — und warum das wichtig ist. Die drei Szenen zeigen, was vorhergesagt und gemessen wird. Sie zeigen **nicht**, was zwischen Quelle und Schirm geschieht. Diese Lücke ist kein Mangel der Simulation, sondern der Sachverhalt selbst.

Der Formalismus enthält keine Erzählung über den Weg des Quants. Er liefert Amplituden, aus denen Wahrscheinlichkeiten folgen. Sätze wie „das Teilchen geht durch beide Spalte“, „es weiß, ob gemessen wird“, „der Beobachter kollabiert die Wellenfunktion“ sind **Deutungen**, die man hinzufügt — und verschiedene Deutungen (Kopenhagen, Viele-Welten, Bohm, GRW, QBism) machen **dieselben Vorhersagen**. Sie sind daher durch dieses Experiment nicht unterscheidbar.

Das ist die Fortsetzung eines Musters, das die Werkstatt durchzieht. In **M1 (CATENA)** zeigte sich: Die Ausgabe einer Messkette bestimmt den Reiz nicht eindeutig. Im **Wahrnehmungs-Strang** zeigte sich: Wir sehen nicht den Reiz, sondern die beste Deutung. Hier zeigt sich: **Der Formalismus sagt Ergebnisse voraus, ohne eine Geschichte über das Dazwischen zu erzählen.** Ob das ein Mangel der Theorie oder eine Eigenschaft der Welt ist, ist genau die Frage des Messproblems — und Gegenstand von W2.

12. Nächster Test

Modul Q2 Verschränkung und Bell-Ungleichung als naheliegende Fortsetzung: Dort wird geprüft, ob sich die Korrelationen durch lokale verborgene Variablen erklären lassen — mit einer Ungleichung, die messbar verletzt wird.

Danach **W1/W2 (Messen, Deuten, Anwenden / Die Deutungen)** als Abschluss der Werkstatt, wofür dieses Modul die Grundlage legt.

Mögliche Erweiterung v0.2: echte Zweiteilchen-Rechnung für den Radierer; Dekohärenz quantitativ; Interferenz mit Massenteilchen (C60, Modul M2); Mach-Zehnder statt Doppelspalt; verzögerte Wahl explizit.

Anhang A — Querverweise

- Praxis-Erklärung: PRAXIS-Dualitas.md · Begleitpapier: BEGLEITPAPIER-Dualitas.md
- Werkzeug: DUALITAS.html
- Code: dualitas_simulation.py · Plot: dualitas_szenen.svg · Daten: dualitas_results.json
- **Anschluss-Module:** M2 Optische Mechanik (Bruch bei λ), M3 Schwingung (Bruch bei h), M1 Signalkette (Nichteindeutigkeit), 01 Doppelspalt (klassisch), 03 Einfachspalt (Beugung)
- **Geplant:** Q2 Verschränkung, W1/W2 Wissenschaftsphilosophie

Anhang B — Externer Bestandscheck

- **Jönsson (1961)** — Elektronenbeugung am Doppelspalt.
- **Tonomura et al. (1989)** — Aufbau des Musters aus Einzelelektronen.
- **Englert (1996)** — quantitative Komplementaritätsrelation.
- **Dürr, Nonn & Rempe (1998)** — ihre experimentelle Prüfung.
- **Scully & Drühl (1982)** — der Quantenradierer.
- **Arndt et al. (1999)** — Interferenz von C60 (siehe Modul M2).

Was die Werkstatt-Notiz davon unterscheidet: die Prüfung mit dem Log-Likelihood-Verhältnis samt Streuung, die die Untergrenze der Unterscheidbarkeit sichtbar macht; die Darstellung der Komplementarität als stetige Bilanz statt als Schalter; die explizite Rechnung, dass die Summe der Radierer-Teilmenen strukturlos bleibt — und damit die Entschärfung der Rückwirkungs-Erzählung; die durchgehende Trennung von Vorhersage und Deutung.

Anhang C — Quellen

- Jönsson, C. (1961). Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten. *Zeitschrift für Physik* 161:454–474.
 - Tonomura, A. et al. (1989). Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern. *American Journal of Physics* 57:117–120.
 - Englert, B.-G. (1996). Fringe visibility and which-way information: an inequality. *Physical Review Letters* 77:2154–2157.
 - Dürr, S.; Nonn, T.; Rempe, G. (1998). Origin of quantum-mechanical complementarity. *Nature* 395:33–37.
 - Scully, M. O.; Drühl, K. (1982). Quantum eraser. *Physical Review A* 25:2208–2213.
-