

Anschluss, Skala und Festlegung im Doppelspalt

Minimalformalismus — Standard-QM-Statusordnung am Minimalfall

Begleitwerk · Deutung · Physik

Fassung

v1.0 · Pass 122

Stand

27. Juni 2026

Inhalt

§0–§12 · Physiker-Summary · Glossar

Kanon

UUU §13 · AAA H16

Kernpaket: AAA · UUU · OOO · TTT — Begleitblätter: JJJ · KKK · LLL · MMM

TTT — Open_X(D_way), γ/D_{path} vs. Fact. Wände: MMM · QQQ · RRR.

Inhaltsverzeichnis

Anschluss, Skala und Festlegung im Doppelspalt

Abstract

0. Ziel und rote Linie

1. Minimalformalismus

2. Doppelspalt ohne Welcher-Weg-Messung

3. Doppelspalt mit Welcher-Weg-Messung

4. Partielle Trennwirksamkeit

5. Record-Stabilität und Pointer-Basis

6. Unschärfe Messungen: POVMs

7. Instrument, Dephasierung und Quantum Eraser

8. Glossar der Statusbegriffe

9. Was dieses Modell erklärt

10. Was dieses Modell nicht erklärt

11. Exklusiver Kern der Deutung

12. Status und Begleitblätter

Anschluss, Skala und Festlegung im Doppelspalt

Begleitwerk zur Kausalen Anschlussordnung — Formalismus v1.0

Lesestufe: [Deutung · Physik] — schmale Brücke zum Standard-QM-Formalismus am Minimalfall Doppelspalt. Keine neue Dynamik, keine Born-Herleitung, keine Laborvorhersagen.

Maßgeblich: Workspace-TTT (Pass 122). v0_12 = historisches Codex-Archiv — kein v0_13.

Abstract

Dieses Papier ordnet Anschluss, Skala, Trennwirksamkeit und Festlegung an den Standardformalismus der Quantenmechanik — am Doppelspalt als Minimalfall. Kernbegriffe: Möglichkeitsordnung, Record-Kandidat, stabile Tatsache, Record-Überlappung γ , POVM, Quantum Eraser. Die zentrale Disziplin: **Trennwirksamkeit ist graduell; Tatsachenstatus ist schwellenförmig** (Status 0/1/2). Querverweise: Hauptbuch §13 · Handbuch H16 · MMM (Statusleiter) · QQQ / RRR (defensive Physik-Wände) · Prüfpfad separat (H6.5/H6.6).

Physiker-Summary: Abschnitt 0.1.

0. Ziel und rote Linie

Dieses Papier versucht keine neue Quantenmechanik und keine Ableitung der Born-Regel. Es versucht eine schmale formale Brücke:

1. Die Begriffe Anschluss, Skala, Trennwirksamkeit und Festlegung werden so gefasst, dass sie an den Standardformalismus der Quantenmechanik anschliessen.
2. Der Doppelspalt wird als Minimalfall beschrieben.
3. Es wird genau getrennt, was die Anschlussordnung deutet und was bei der Physik bleibt.

Der erste mathematische Anker ist nicht der ideale Ja/Nein-Fall, sondern die partielle Welcher-Weg-Messung: Dort wird sichtbar, dass Trennwirksamkeit an die Überlappung von Record-Zuständen anschliessen kann.

Die Leitthese lautet:

Die Wellenfunktion beschreibt eine getragene Möglichkeitsordnung. Wirklich im harten Sinn sind die jeweils festgelegten Kopplungsereignisse. Eine Messung ist keine Beobachter-Sonderhandlung, sondern die trennwirksame Auflösung einer Unterscheidung in eine anschlussfähige Tatsache.

Damit ist der Anspruch ontologisch, nicht dynamisch. Schrödinger-Dynamik, Detektorphysik, Dekohärenzraten, Pointer-Basis und exakte Wahrscheinlichkeiten werden vorausgesetzt, nicht hergeleitet.

0.1 Kompaktfassung für Physiker

Dieses Papier ändert keine Standard-QM-Rechnung. Es macht einen Interpretationsvorschlag für den Wirklichkeitsstatus von Zustand, Outcome, Record und Tatsache.

Kurz:

Standard-QM liefert:

Zustandsraum, Dynamik, Messformalismus, Wahrscheinlichkeiten.

Anschlussordnung liefert:

Statusordnung: Möglichkeitsordnung -> Record-Kandidat -> stabile Tatsache.

Die wichtigsten Zuordnungen:

Standard-QM	Anschluss-Lesung	Nicht behauptet
$ \psi\rangle, \rho$	Möglichkeitsordnung	schon realisierte Welt
Projektoren/POVMs	mögliche Unterscheidungen	automatische Tatsachen
Instrument	konkrete Kopplung	Beobachter-Magie
Outcome k	möglicher Record-Label	schon Tatsachenstatus
Record-Zustände	Record-Kandidat	irreversible Festlegung
Dekohärenz	Stabilitätsanzeige	Kollaps-Herleitung
Quantum Eraser	Reversibilitäts-Test	Löschung von Tatsachen
Born-Regel	verwendete Gewichtsregel	keine Herleitung hier

Die zentrale These ist nicht:

Die Wellenfunktion kollabiert physikalisch neu.

Sondern:

Ein Ereignis wird im harten Sinn wirklich, wenn ein Record stabil, trennwirksam und anschlussfähig wird.

Die zentrale Formel des Minimalmodells ist die Record-Überlappung:

$$\gamma = \langle r_L | r_R \rangle$$

Im symmetrischen Doppelspalt liest sie sich so:

$$\begin{aligned} V_{\text{interf}} &= |\gamma| \\ D_{\text{path}} &= \sqrt{1 - |\gamma|^2} \\ \tau_{\text{path}} &= 1 - |\gamma| \quad \text{nur Anschlussindex, keine Standardgrösse} \end{aligned}$$

Wichtig:

D_{path} ist Physik.
 τ_{path} ist interne Anschluss-Sprache.
Fact(...) ist erst der Tatsachenschwellen-Test.

Die Deutung ist daher empirisch konservativ:

keine neuen Laborvorhersagen,
keine Born-Ableitung,
keine Tsirelson-Ableitung,

keine neue Kollapsdynamik,
keine Ersetzung von Dekohärenztheorie.

Ihr eigener Anspruch ist schmaler:

Sie ordnet, wann eine physikalisch berechnete Kopplung ontologisch als
Möglichkeit, Record-Kandidat oder stabile Tatsache gelesen werden soll.

1. Minimalformalismus

1.1 Möglichkeitsordnung

Eine Möglichkeitsordnung ist eine strukturierte Menge noch nicht festgelegter Anschlussmöglichkeiten. Im quantenmechanischen Minimalmodell wird sie durch einen Zustand repräsentiert.

System: S
Hilbertraum: H_S
Zustand: $|\psi\rangle$ in H_S
oder: ρ auf H_S

ρ ist hier die allgemeinere Schreibweise; der reine Zustand $|\psi\rangle$ reicht für den Doppelspalt. Diese Repräsentation ist physikalisch gegeben. Die Anschlussordnung deutet nur ihren Wirklichkeitsstatus:

- $|\psi\rangle$ ist nicht bloss subjektives Wissen.
- $|\psi\rangle$ ist aber auch noch keine realisierte Wirklichkeit.
- $|\psi\rangle$ ist reale Möglichkeitsstruktur: sie trägt, was anschlussfähig werden kann.

1.2 Unterscheidung

Eine Unterscheidung ist eine Frage, deren Alternativen prinzipiell als Tatsachen auseinanderfallen können. Im Minimalmodell ist eine Unterscheidung eine endliche Projektorzerlegung:

$$\begin{aligned} D &= \{P_i\}_{i \in I} \\ \sum_i P_i &= I \\ P_i P_j &= 0 \text{ für } i \neq j \\ P_i^2 &= P_i \end{aligned}$$

Die Ereignisalgebra $A(D)$ ist die von diesen Projektoren erzeugte Algebra:

$$A(D) = \left\{ \sum_i a_i P_i \right\}$$

Eine gröbere Unterscheidung entsteht durch Zusammenlegen von Alternativen. Wenn $f: I \rightarrow J$ eine Grobabbildung ist, dann:

$$\begin{aligned} Q_j &= \sum_{\{i: f(i)=j\}} P_i \\ D_{\text{grob}} &= \{Q_j\}_{j \in J} \end{aligned}$$

Beispiel Doppelspalt:

$$D_{\text{way}} = \{P_L, P_R\}$$

Die Unterscheidung fragt: linker Spalt oder rechter Spalt?

1.3 Skala

Eine Skala bestimmt, welche Unterscheidungen im betrachteten Zugriff aufgelöst werden können.

Formal ist eine Skala eine Ereignisalgebra A_S , also eine Auswahl von physikalisch verfügbaren Ereignissen/Unterscheidungen. Zwei Skalen können geordnet werden:

$$A_{\text{grob}} \text{ subset } A_{\text{fein}}$$

Dann ist A_{fein} die feinere Skala: sie kann mindestens dieselben und zusätzliche Unterscheidungen auflösen.

Wichtig: Eine Festlegung auf einer Skala legt nicht automatisch jede feinere Unterscheidung fest. Im Doppelspalt kann die Schirmposition festgelegt sein, ohne dass die Spalt-Unterscheidung festgelegt ist.

1.4 Kopplung

Eine Kopplung ist ein physischer Vorgang, durch den eine Möglichkeitsordnung in Anschluss mit einem anderen System tritt. Im Minimalmodell schreiben wir eine Kopplung als:

$$C = (R, |r_0\rangle, U)$$

mit:

$$\begin{aligned} R &= \text{Record- oder Apparatsystem} \\ |r_0\rangle &= \text{Anfangszustand des Records} \\ U &= \text{gemeinsame Dynamik auf } H_S \text{ tensor } H_R \end{aligned}$$

Nicht jede Kopplung löst jede Unterscheidung auf. Entscheidend ist, welche Unterscheidung die Kopplung stabil registriert.

1.5 Record

Ein Record ist eine Spur, die für weitere Kopplungen als Bedingung wirken kann. Noch vorsichtiger: Zuerst entsteht nur ein Record-Kandidat. Er wird erst dann zur Tatsache im Anschluss-Sinn, wenn er hinreichend stabil wird.

Im Minimalmodell entsteht ein Record-Kandidat für die Unterscheidung $D = \{P_i\}$, wenn die Alternativen mit Record-Zuständen korreliert werden:

$$U(|\phi_i\rangle|r_0\rangle) = |\Phi_i\rangle|r_i\rangle$$

Dabei liegt $|\phi_i\rangle$ im Bereich von P_i . Die Record-Zustände $|r_i\rangle$ müssen nicht ideal unterscheidbar sein. Ihre Überlappung bildet die Record-Matrix:

$$G_{ij} = \langle r_i | r_j \rangle$$

Diese Matrix ist der erste technische Ort, an dem die Anschlussbegriffe physikalisch andocken.

1.6 Stabilität eines Records

Eine reversible Korrelation ist noch keine Tatsache. Das ist die zentrale Schärfung.

Beispiel:

$$\alpha |L\rangle |R_L\rangle + \beta |R\rangle |R_R\rangle$$

ist zunächst nur eine Korrelation zwischen System und Record. Solange diese Korrelation prinzipiell wieder zusammengesoben werden kann, ohne dass eine stabile Anschlussfolge bleibt, ist sie noch nicht das, was die Theorie eine festgelegte Tatsache nennen sollte.

Ein Record zählt relativ zu einer Skala A_S und einem Zeithorizont T als stabil, wenn drei Bedingungen erfüllt sind:

1. Unterscheidbarkeit:

Die Record-Zustände sind auf der betrachteten Skala unterscheidbar.

2. Persistenz:

Die Unterscheidbarkeit bleibt über relevante Folgekopplungen erhalten.

3. Anschlussfähigkeit:

Der Record kann spätere Kopplungen bedingen, ohne dass die ursprüngliche Kohärenz praktisch wieder verfügbar wird.

Als Arbeitsdefinition:

$\text{Stable}(R,D,A_S,T)$ genau dann, wenn
für $i \neq j$ die Records r_i, r_j auf A_S unterscheidbar bleiben
und für relevante Folgekopplungen $C_t, 0 \leq t \leq T$,
als getrennte Bedingungen wirken.

Das ist bewusst skalen- und horizontrelativ. Es behauptet keinen neuen fundamentalen Kollaps. Es markiert den Punkt, an dem eine Korrelation für die Welt als Tatsache weiterarbeitet.

Physikalisch gehört diese Stelle zur Dekohärenz- und Messapparatphysik: Umweltkopplung, Verstärkung, irreversible Streuung, thermische Spuren, Detektorrecords. Die Anschlussordnung berechnet diese Stabilität nicht; sie benennt, warum gerade diese Stabilität ontologisch relevant ist.

1.7 Trennwirksamkeit

Eine Unterscheidung D ist trennwirksam unter einer Kopplung C , wenn ihre Alternativen in einem Record stabil und unterscheidbar auseinanderfallen.

Minimal formal:

D ist ideal trennwirksam unter C
genau dann, wenn
für $i \neq j$ gilt: $G_{ij} = \langle r_i | r_j \rangle = 0$
und $\text{Stable}(R,D,A_S,T)$ gilt.

Der Gegenfall:

```
Gij ≈ 1 für alle relevanten i,j
```

bedeutet: Die Kopplung hat die Alternativen praktisch nicht getrennt.

Für den Zweiweg-Fall reicht ein einzelner Parameter:

```
|L>|R0> -> |L>|RL>  
|R>|R0> -> |R>|RR>  
gamma = <RL|RR>
```

Dabei gilt:

```
|gamma| = 1 keine Wegtrennung  
|gamma| = 0 ideale Wegtrennung
```

Als einfache Arbeitsgröße kann man setzen:

```
tau_path = 1 - |gamma|
```

`tau_path` ist nicht als neue physikalische Grundgröße gemeint. Es ist nur ein Minimalmaß für diese Modellfamilie: Es zeigt, wie stark die Welcher-Weg-Unterscheidung als anschlussfähige Tatsache auseinanderfällt. Es darf nicht mit der optimalen physikalischen Weg-Unterscheidbarkeit verwechselt werden. Für zwei reine Record-Zustände mit gleichen Priors gilt im Standardfall:

```
D_path = sqrt(1 - |gamma|^2)
```

`D_path` ist die operative Wegauslesbarkeit; `tau_path` ist nur ein monotoneres Anschluss-Arbeitsmaß für den Verlust der Pfad-Überlappung.

Für eine echte Tatsache reicht `tau_path` allein nicht. Es braucht zusätzlich Record-Stabilität:

```
Trennwirksamkeit = Unterscheidbarkeit + Stabilität + Anschlussfähigkeit
```

1.8 Festlegung

Eine Festlegung ist der Übergang von Möglichkeitsordnung zu einer bestimmten anschlussfähigen Tatsache. Formal wird nicht behauptet, die Anschlussordnung leite den Einzelausgang aus verborgenen Variablen her. Festlegung bedeutet:

```
Aus einer gewichteten Menge möglicher Ereignisse wird genau ein Ereignis  
wirklich.
```

Die Gewichte werden im quantenmechanischen Fall durch die Born-Regel bestimmt. Diese Regel wird hier benutzt, nicht bewiesen.

Präziser:

Festlegung relativ zu einer Skala A_S :
Ein Ereignis E in A_S wird als stabiler Record anschlussfähig.

Daraus folgt nicht:

Alle Ereignisse einer feineren Skala A_{fein} sind mitfestgelegt.

Das ist die Schlüsselstelle für den Doppelspalt. Ein Schirmereignis kann festgelegt werden, ohne dass eine Welcher-Weg-Tatsache existiert.

2. Doppelspalt ohne Welcher-Weg-Messung

2.1 Ausgangslage

Der Pfadraum sei

$$H_{\text{path}} = \text{span}\{|L\rangle, |R\rangle\}$$

Der Zustand nach den Spalten sei

$$|\psi\rangle = \alpha |L\rangle + \beta |R\rangle$$

mit

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

Der Schirm besitzt mögliche Trefferpositionen x . Die Ausbreitung vom linken oder rechten Spalt zum Punkt x werde durch Amplituden beschrieben:

$$K_L(x), K_R(x)$$

Dann ist die Gesamtamplitude am Punkt x :

$$A(x) = \alpha K_L(x) + \beta K_R(x)$$

und die Standardwahrscheinlichkeit:

$$\begin{aligned} p_{\theta}(x) &= |A(x)|^2 \\ &= |\alpha K_L(x)|^2 \\ &\quad + |\beta K_R(x)|^2 \\ &\quad + 2 \operatorname{Re}(\operatorname{conj}(\alpha) \beta \operatorname{conj}(K_L(x)) K_R(x)) \end{aligned}$$

Der letzte Term ist der Interferenzterm.

2.2 Deutung in Anschluss-Sprache

Ohne Welcher-Weg-Messung wird die Schirmposition festgelegt, aber die Spalt-Unterscheidung nicht.

In Skalen-Sprache (vor der Detailrechnung):

```
A_screen = Algebra der Schirmereignisse {E_x} → festgelegt / pointer-stabil
A_path   = Algebra der Wegereignisse {P_L, P_R} → nicht festgelegt
```

Das heißt:

- Die Schirmposition wird als stabiler Record-Kandidat (bzw. Tatsache am Schirm) festgelegt.
- Die Welcher-Weg-Unterscheidung D_{way} bleibt offen — nicht trennwirksam.
- Die offene Spalt-Unterscheidung bleibt als Möglichkeitsordnung wirksam.
- Sichtbar wird nicht ein heimlicher Weg, sondern ein Muster aus ungelöster Pfad-Offenheit.

Die Anschluss-Deutung sagt daher nicht:

```
Das Teilchen ging wirklich durch beide Spalte.
```

Sie sagt auch nicht:

```
Das Teilchen ging heimlich durch genau einen Spalt.
```

Sondern:

```
Vor der trennwirksamen Auflösung ist die Welcher-Weg-Frage keine Tatsache.
Wirklich wird das Schirmereignis; getragen war die offene Anschlussstruktur.
```

In der Skalen-Sprache:

```
A_screen = Algebra der Schirmereignisse {E_x}
A_path   = Algebra der Wegereignisse {P_L, P_R}
```

Ohne Wegrecord gilt:

```
Festgelegt:      E_x in A_screen
Nicht festgelegt: P_L oder P_R in A_path
```

Das ist keine Wissenslücke über einen vorhandenen Weg. Es ist die Aussage, dass die Weg-Unterscheidung in dieser Kopplung nicht zur Tatsache geworden ist.

3. Doppelspalt mit Welcher-Weg-Messung

3.1 Record-Kopplung

Eine ideale Welcher-Weg-Messung koppelt den Pfad an ein Record-System:

```
(alpha |L> + beta |R>) |R_0>
-> alpha |L>|R_L> + beta |R>|R_R>
```

mit

```
<R_L|R_R> = 0
```

Damit sind die Record-Zustände unterscheidbar. Die Pfad-Unterscheidung ist trennwirksam geworden.

Die Schirmwahrscheinlichkeit verliert den Interferenzterm:

$$p_1(x) = |\alpha K_L(x)|^2 + |\beta K_R(x)|^2$$

3.2 Deutung in Anschluss-Sprache

Die Welcher-Weg-Messung ist nicht deshalb besonders, weil ein Bewusstsein hinsieht. Sie ist besonders, weil sie eine zuvor offene Unterscheidung in eine anschlussfähige Tatsache überführt.

Die Theorie liest den Unterschied so:

Ohne Wegrecord:

Festgelegt wird X.

D_{way} bleibt offen.

Interferenz bleibt sichtbar.

Mit Wegrecord:

Festgelegt wird X und D_{way}.

Die Pfadalternativen fallen trennwirksam auseinander.

Interferenz verschwindet.

Formal heisst das:

A_{screen} bleibt verfügbar.

A_{path} wird zusätzlich trennwirksam.

$G_{LR} = \langle R_L | R_R \rangle = 0$.

Die Apparatur hat also nicht bloss mehr Information geliefert. Sie hat eine andere Unterscheidung in die Menge anschlussfähiger Tatsachen aufgenommen.

4. Partielle Trennwirksamkeit

Der wichtigste Test für den Begriff ist der Zwischenfall: eine teilweise Welcher-Weg-Information.

Dann gilt nicht

$$\langle R_L | R_R \rangle = 0$$

und auch nicht

$$\langle R_L | R_R \rangle = 1$$

sondern

$$\gamma = \langle R_L | R_R \rangle$$

$$0 < |\gamma| < 1$$

Die Wahrscheinlichkeit nimmt die Form an:

```
p_gamma(x)
= |alpha K_L(x)|^2
+ |beta K_R(x)|^2
+ 2 Re(conj(alpha) beta conj(K_L(x)) K_R(x) gamma)
```

Damit hat "Trennwirksamkeit" eine graduelle Seite:

```
|gamma| nahe 1 -> Pfad kaum getrennt, hohe Interferenz
|gamma| nahe 0 -> Pfad stark getrennt, geringe Interferenz
```

In der Arbeitsnotation aus Abschnitt 1:

```
tau_path = 1 - |gamma|
```

Das liest sich so:

```
tau_path = 0 keine Wegtrennwirksamkeit
tau_path = 1 ideale Wegtrennwirksamkeit
0 < tau_path < 1 teilweise Wegtrennung
```

Das ist für die Anschlussordnung wichtig, weil der Begriff dadurch nicht nur metaphorisch ist. Er kann an eine etablierte physikalische Grösse angeschlossen werden: die Unterscheidbarkeit oder Überlappung der Record-Zustände.

4.1 Zahlenbeispiel: symmetrischer Doppelspalt

Nehmen wir den einfachsten symmetrischen Fall:

```
alpha = beta = 1/sqrt(2)
K_L(phi) = exp(+i phi/2)
K_R(phi) = exp(-i phi/2)
```

Dann ist die Intensität bis auf Normierung:

```
I_gamma(phi) = 1 + Re(gamma exp(-i phi))
```

Wenn `gamma` reell und positiv genommen wird, vereinfacht sich das zu:

```
I_gamma(phi) = 1 + gamma cos(phi)
```

Die Interferenzsichtbarkeit ist dann:

```
V_interf = (I_max - I_min) / (I_max + I_min) = |gamma|
```

Für zwei reine Record-Zustände mit gleichen Priors ist die optimale Weg-Unterscheidbarkeit:

```
D_path = sqrt(1 - |gamma|^2)
```

Im idealisierten symmetrischen Fall gilt damit die bekannte Beziehung:

$$V_{\text{interf}}^2 + D_{\text{path}}^2 = 1$$

Die Anschlussordnung braucht diese Beziehung nicht neu zu beweisen. Sie liest sie so:

Je stärker die Wegunterscheidung als Record auslesbar wird,
desto weniger bleibt die offene Pfadordnung als Interferenzmuster sichtbar.

Kleine Tabelle:

$ \gamma $	V_{interf}	D_{path}	τ_{path}	Anschluss-Lesung
1.00	1.00	0.00	0.00	kein Wegrecord
0.80	0.80	0.60	0.20	schwacher Wegrecord
0.50	0.50	0.87	0.50	deutlicher Wegrecord
0.20	0.20	0.98	0.80	fast idealer Wegrecord
0.00	0.00	1.00	1.00	idealer Wegrecord

Der Unterschied zwischen D_{path} und τ_{path} ist absichtlich sichtbar:

D_{path} = physikalische optimale Auslesbarkeit im Standardmodell
 τ_{path} = Anschlussindex für verlorene Pfad-Überlappung

Wenn es um Physik geht, hat D_{path} Vorrang. Wenn es um die interne Sprache der Anschlussordnung geht, kann τ_{path} als einfache monotone Anzeige dienen. Das verhindert, dass die Deutung eine bekannte physikalische Grösse unter neuem Namen verkauft.

4.2 Komplementaritätskarte

Die vier Grössen stehen nicht nebeneinander wie vier unabhängige Parameter. Im symmetrischen Zweiweg-Minimalfall bilden sie eine kleine Karte:

```
Record-Überlappung
gamma = <r_L|r_R>
|
+--> V_interf = |gamma|
|   sichtbare Interferenz
|
+--> D_path = sqrt(1 - |gamma|^2)
|   optimale physikalische Wegauslesbarkeit
|
+--> tau_path = 1 - |gamma|
|   interner Anschlussindex für verlorene Pfad-Überlappung
```

Grobe Leselinie:

$|\gamma|$ hoch
 -> Record-Zustände überlappen stark
 -> Interferenz sichtbar
 -> Wegauslesbarkeit gering
 -> Weg-Unterscheidung bleibt offen

```
|gamma| niedrig
-> Record-Zustände überlappen kaum
-> Interferenz verschwindet
-> Wegauslesbarkeit hoch
-> Weg-Unterscheidung wird als Record-Kandidat stark
```

Als ASCII-Kurve:

gamma	1.0	0.8	0.5	0.2	0.0
V_interf	hoch	hoch	mittel	niedrig	null
D_path	null	mittel	hoch	sehr hoch	ideal
tau_path	null	niedrig	mittel	hoch	ideal

Schutz gegen Kategorienfehler:

```
V_interf sagt: Was bleibt als Muster sichtbar?
D_path sagt: Wie gut ist der Weg optimal auslesbar?
tau_path sagt: Wie weit ist die Pfad-Überlappung im Anschlussindex gefallen?
Fact sagt: Hat ein stabiler Record den Tatsachenschwellen-Test bestanden?
```

Nur die letzte Frage ist eine Tatsachenfrage. Die ersten drei sind Struktur-/Messgrößen.

Deshalb gilt:

```
kleines |gamma| -> starke Wegtrennung
aber nicht automatisch stabile Wegtatsache.
```

Für stabile Wegtatsache braucht es zusätzlich den Record-Test:

```
d_read hoch, d_persist hoch, V_recover klein.
```

4.3 Keine partiellen Tatsachen

Der Zwischenbereich darf nicht als "halbe Wirklichkeit" gelesen werden. Das wäre missverständlich.

Die bessere Regel lautet:

```
Trennwirksamkeit ist gradüßl.
Tatsachenstatus ist schwellenförmig.
```

Eine Unterscheidung kann also teilweise trennwirksam sein, ohne schon eine festgelegte Tatsache zu bilden. Der Grad liegt bei der Record-Bildung, nicht beim Wirklichkeitsstatus selbst.

Arbeitsvokabular:

```
falsch: partielle Tatsache
richtig: partielle Trennwirksamkeit
richtig: Record-Kandidat
richtig: unvollständig stabilisierte Unterscheidung
```

Das verhindert zwei Fehler:

1. Die Theorie behauptet keine Zwischenwelt aus halb wirklichen Pfaden.
2. Sie muss graduelle Messstärken nicht künstlich binarisieren.

4.4 Schwellenmodell

Für praktische Zwecke kann man einen Tatsachenschwellen-Test formulieren. Sei **D** eine Unterscheidung, **C** die Kopplung, **A_S** die Skala und **F_T** die relevante Anschlussfolge. Die Größen **d_read**, **d_persist** und **V_recover** werden in Abschnitt 5.4 genauer benannt. Dann:

```
Fact(D,C,A_S,F_T) genau dann, wenn
  d_read(D)           >= theta_read
  d_persist(D,F_T) >= theta_persist
  V_recover(D,F_T) <= theta_recover
  und der Record in Folgekopplungen als Bedingung wirkt.
```

Die Schwellen sind keine Naturkonstanten. Sie sind skalen-, apparatur- und horizontrelativ. Aber sie leisten begrifflich etwas Wichtiges: Sie halten den Unterschied zwischen gradueller Trennwirksamkeit und Tatsachenstatus fest.

Damit entsteht eine kleine Statusleiter:

```
Status 0: offene Möglichkeitsordnung
  Keine stabile Record-Bildung.
  Beispiel: Doppelspalt ohne Wegdetektor.

Status 1: Record-Kandidat / partielle Trennwirksamkeit
  Ein Record koppelt an, aber Lesbarkeit, Persistenz oder Reversibilität sind
  noch nicht stark genug für Tatsachenstatus.
  Beispiel: schwache Welcher-Weg-Information.

Status 2: stabile Tatsache
  Der Record ist auslesbar, persistent und anschlussfähig; die Unterscheidung
  wirkt in Folgekopplungen als Bedingung.
  Beispiel: idealer oder praktisch stabiler Wegdetektor.
```

Offenheit (Weg): Ohne Wegdetektor gilt in KAO-Notation $\text{Open}_X(D_{\text{way}})$ — weder linker noch rechter Weg als Fact; Interferenz \neq versteckter Weg-Fact (*MMM* §17, Mini-Satz 8–9). Physik: Superposition bleibt Standard-Import.

*Feinere vierstufige Gesamtleiter und Abbildung Status 0/1/2 hier \leftrightarrow **MMM** 0–3:*

[Anschluss_StatusLeiter_Kern.md](#) §8.2. Fact als Arbeitsdefinition und Messketten-Checkliste: **MMM** §5, §8.4.

Kurz:

```
Nicht: etwas ist 40 Prozent wirklich.
Sondern: eine Unterscheidung ist zu 40 Prozent trennwirksam
und hat den Tatsachenschwellen-Test noch nicht bestanden.
```

5. Record-Stabilität und Pointer-Basis

5.1 Warum die Basisfrage entsteht

Der Hilbertraum erlaubt viele Zerlegungen. Formal kann man viele verschiedene Projektorzerlegungen hinschreiben:

$$D = \{P_i\}$$
$$D' = \{Q_j\}$$

Aber daraus folgt nicht, dass jede Zerlegung gleich gut eine Tatsache werden kann. Die Anschlussordnung darf also nicht sagen:

Irgendeine mathematische Basis wird wirklich.

Sie muss sagen:

Diejenige Unterscheidung wird wirklich, die durch reale Kopplung einen stabilen Record bilden kann.

Damit verschiebt sich die Basisfrage an die richtige Stelle: nicht in eine freie ontologische Wahl, sondern in die Physik der Record-Stabilität.

5.2 Minimaler Stabilitätstest

Sei E die relevante Umgebung oder der Messapparat. Eine Unterscheidung $D = \{P_i\}$ ist pointer-stabil relativ zu einer Kopplung mit E , wenn sie drei Bedingungen näherungsweise erfüllt:

1. Korrelationsbildung:
P_i-Zustände koppeln an unterscheidbare Umwelt-/Record-Zustände E_i.
2. Kohärenzverlust zwischen Alternativen:
Für $i \neq j$ werden die Off-Diagonal-Terme $P_i \rho P_j$ in der zugänglichen Beschreibung praktisch unterdrückt.
3. Robustheit:
Weitere Kopplungen lesen diese Unterscheidung aus, statt sie sofort in eine andere Basis zu verschmieren.

In Kurzschreibweise:

D ist pointer-stabil unter C_E
genau dann, wenn C_E die Alternativen von D
als robuste Records verstärkt.

Das ist keine neue Dekohärenztheorie. Es ist die Anschluss-Lesart des bekannten Problems: Welche Unterscheidung wird durch die reale Umgebung zur klassisch stabilen Spur?

5.3 Anschlussfolge

Ein Record ist nicht nur ein Zustand zu einem Zeitpunkt. Er ist eine Spur, die in späteren Kopplungen als Bedingung weiterwirkt.

Eine Anschlussfolge ist daher eine Folge von weiteren Kopplungen oder Kanälen:

```
F_T = (Lambda_1, Lambda_2, ..., Lambda_n)
```

mit einem relevanten Zeithorizont T . Die Lambda_k stehen nicht für eine neue Dynamik, sondern für die normalen Folgewirkungen: Auslesung, Umweltstreuung, Speicherung, Verstärkung, Transport, thermische Kopplung, Kontrolle durch spätere Apparate.

Ein Record ist relativ zu F_T anschlussfähig, wenn seine Alternativen in diesen Folgekopplungen weiter als getrennte Bedingungen wirken:

```
r_i -> Lambda_k(r_i)
r_j -> Lambda_k(r_j)
```

und diese Folgerecords unterscheidbar bleiben.

In Anschluss-Sprache:

```
Record-Stabilität = Unterscheidung überlebt ihre eigene Weiterverwendung.
```

Das ist der Unterschied zwischen einem kurzlebigen Korrelationszustand und einer Tatsache, die im weiteren Weltlauf mitzählt.

Messketten-Brücke: F_T entspricht Kaskadenstufe 8 (Folgeanschluss). γ und D_{path} ordnen die Stufen 4–7 im Doppelspalt (Spur \rightarrow Verstärkung \rightarrow Record-Kandidat \rightarrow Stabilisierung). Vollständige zehnstufige Kaskade und Checkliste: **QQQ** § Messung · **MMM** §8.4.

5.4 Fehlerparameter für Stabilität

Für reale Apparate reichen Idealisierungen wie $\langle r_i | r_j \rangle = 0$ nicht. Man braucht tolerierbare Fehler.

Bei gemischten Record-Zuständen schreiben wir:

```
sigma_i = Record-Zustand, falls Alternative i realisiert ist
```

Die Lesbarkeit einer Unterscheidung kann über die Trace-Distanz gefasst werden:

```
d_read(i,j) = (1/2) || sigma_i - sigma_j ||_1
```

mit:

```
d_read = 0 nicht unterscheidbar
d_read = 1 ideal unterscheidbar
```

Als schlechtester relevanter Fall:

```
d_read(D) = min_{i != j} d_read(i,j)
epsilon_read = 1 - d_read(D)
```

Persistenz über eine Anschlussfolge:

```
d_persist(D,F,T)
= min_k min_{i != j}
  (1/2) || Lambda_k(sigma_i) - Lambda_k(sigma_j) ||_1

epsilon_persist = 1 - d_persist(D,F,T)
```

Für den Doppelspalt bleiben drei Größen nützlich:

```
V_interf = |gamma|
D_path   = sqrt(1 - |gamma|^2)   im symmetrischen Zweiweg-Fall
tau_path = 1 - |gamma|          Anschluss-Arbeitsindex
```

V_{interf} misst, wie stark Interferenz zwischen den Pfadalternativen noch sichtbar sein kann. D_{path} misst die optimale physikalische Wegauslesbarkeit im symmetrischen Standardfall. τ_{path} ist nur der interne Anschlussindex für verlorene Pfad-Überlappung.

Eine Arbeitsbedingung für faktische Record-Bildung kann dann lauten:

```
epsilon_read    << 1
epsilon_persist << 1
V_recover       << 1   relativ zu erlaubten Folgeoperationen
```

V_{recover} ist der heikle Parameter. Er fragt nicht, ob die gesamte Wellenfunktion im Prinzip unitar bleibt. Er fragt operational: Kann die ursprüngliche Kohärenz in der relevanten Anschlussfolge praktisch wieder verfügbar gemacht werden?

Wenn ja, war es eher reversible Korrelation. Wenn nein, arbeitet der Record faktisch als Tatsache.

5.5 Drei Fälle im Doppelspalt

Fall A: kein Wegrecord

```
Pfad:      |L> und |R> bleiben nicht getrennt registriert
gamma:     |gamma| ~ 1
V_interf:  ~ 1
D_path:    ~ 0
tau_path:  ~ 0
A_screen:  stabil
A_path:    nicht stabil
Bild:      Interferenz
Lesung:    Schirmtatsache ohne Wegtatsache
```

Fall B: partieller Wegrecord

```
Pfad:      |L> und |R> koppeln schwach an Record-Zustände
gamma:     0 < |gamma| < 1
```

V_interf: zwischen 0 und 1
D_path: zwischen 0 und 1
tau_path: zwischen 0 und 1
A_screen: stabil
A_path: teilweise stabil/auslesbar
Bild: reduzierte Interferenz
Lesung: graduelle Trennwirksamkeit

Fall C: idealer Wegrecord

Pfad: $|L\rangle$ und $|R\rangle$ koppeln an unterscheidbare stabile Records
gamma: $|\text{gamma}| = 0$
V_interf: 0
D_path: 1
tau_path: 1
A_screen: stabil
A_path: stabil
Bild: keine Interferenz
Lesung: Schirmtatsache plus Wegtatsache

Der Gewinn dieser Dreiteilung ist klein, aber wichtig: Die Theorie muss nicht behaupten, dass Tatsachen nur sprunghaft "da" oder "nicht da" sind. Sie kann zwischen Möglichkeitsordnung, partieller Trennwirksamkeit und stabiler Tatsache unterscheiden.

5.6 Anschluss-Lesung

Die Pointer-Basis ist in dieser Deutung nicht:

die Basis, die ein Beobachter bevorzugt

sondern:

die Unterscheidung, die unter den realen Kopplungen stabil anschlussfähig wird.

Das ist der Schutz gegen Beliebigkeit. Nicht jede formal mögliche Frage wird von der Welt beantwortet. Eine Frage wird erst dann Tatsachenfrage, wenn ihre Alternativen trennwirksam und stabil auseinanderfallen.

5.7 Rückbindung an den Doppelspalt

Ohne Welcher-Weg-Detektor:

A_screen wird pointer-stabil: Trefferpositionen hinterlassen Records.
A_path wird nicht pointer-stabil: linker/rechter Spalt hinterlässt keinen stabilen Wegrecord.

Mit Welcher-Weg-Detektor:

A_screen bleibt pointer-stabil.
A_path wird zusätzlich pointer-stabil, weil der Detektor robuste Wegrecords bildet.

Damit wird die vorherige Aussage präziser:

Nicht die abstrakte Wegbasis entscheidet.
Die reale Record-Stabilität entscheidet, ob die Wegunterscheidung Tatsache wird.

5.8 Rote Linie

Die Anschlussordnung berechnet nicht, welche Basis in einem konkreten Labor stabil ist. Diese Rechnung bleibt Physik: Hamiltonian, Apparatur, Umweltkopplung, Dekohärenzraten, Temperatur, Streuung, Ausleseketten.

Der eigene Beitrag ist kleiner, aber scharf:

Tatsache = nicht bloße Korrelation,
sondern stabile, trennwirksame und anschlussfähige Record-Bildung.

Pointer-Basis, Dekohärenz-Import, Auswahl vs. Verstärkung: **QQQ** — TTT rechnet γ , ordnet Status.

6. Unscharfe Messungen: POVMs

6.1 Warum Projektoren nicht reichen

Die bisherigen Abschnitte benutzen Projektoren:

$$\begin{aligned} D &= \{P_i\} \\ \sum_i P_i &= I \\ P_i P_j &= 0 \text{ für } i \neq j \end{aligned}$$

Das ist für den Kern gut, aber für reale Messungen zu ideal. Apparate haben Rauschen, endliche Auflösung, Fehlklassifikationen und schwache Kopplungen. Dann ist die Messung nicht einfach eine perfekte Zerlegung in orthogonale Alternativen.

Der Standardformalismus dafür ist eine POVM:

$$\begin{aligned} M &= \{E_k\}_{k \in K} \\ E_k &\geq 0 \\ \sum_k E_k &= I \end{aligned}$$

Die Wahrscheinlichkeit für Outcome k ist:

$$p(k) = \text{Tr}(\rho E_k)$$

Oft schreibt man Messoperatoren M_k mit:

$$\begin{aligned} E_k &= M_k^\dagger M_k \\ \sum_k M_k^\dagger M_k &= I \\ \rho \rightarrow M_k \rho M_k^\dagger / p(k) \end{aligned}$$

Genauer: Die Effekte E_k bestimmen die Outcome-Wahrscheinlichkeiten. Die Messoperatoren oder das Instrument bestimmen zusätzlich, wie sich der Zustand und der Record verändern. Dieselbe POVM kann

durch verschiedene Instrumente realisiert werden.

Das ist Physikformalismus. Die Anschlussordnung deutet nicht die Gleichungen neu, sondern den Status des Outcomes und seines Records.

6.2 Anschluss-Lesung einer POVM

Eine POVM beschreibt keine neue Art von Wirklichkeit. Sie beschreibt eine Apparatur, deren mögliche Outcome-Records nicht ideal scharfen Projektoren entsprechen.

In Anschluss-Sprache:

```
E_k      = Effekt, der die Wahrscheinlichkeit eines Outcome-Records bestimmt
k        = möglicher Record-Label
Record(k) = konkrete Spur in Apparatur/Umgebung
Fact(k)   = stabiler Outcome-Record, falls der Tatsachenschwellen-Test greift
```

Wichtig:

```
Nicht der Effekt E_k wird zur Tatsache.
Der stabile Outcome-Record k wird zur Tatsache.
```

Das schützt vor einem Kategorienfehler. Ein Effekt ist Teil der Wahrscheinlichkeitsrechnung; eine Tatsache ist ein stabiler Anschluss im Weltlauf.

Zweite Schutzlinie:

```
Die POVM allein sagt noch nicht, wie viel Kohärenz verloren geht.
Dafür braucht man das Instrument: Messoperatoren, Apparaturkopplung,
Record-Zustände und Umgebung.
```

6.3 Naimark-Brücke

Jede POVM kann als projektive Messung auf einem grösseren Raum verstanden werden: System plus Apparatur/Ancilla. Man muss das hier nicht beweisen; es reicht als Orientierung.

Schema:

```
System S + Apparatur R
Anfang: rho_S tensor |r_0><r_0|
Kopplung: U auf H_S tensor H_R
Projektive Auslesung am Record: {Pi_k^R}
Effekt auf S: E_k
```

Anschluss-Lesung:

```
POVM = sichtbare Systembeschreibung einer Kopplung,
bei der die eigentliche Tatsache im Apparatur-Record liegt.
```

Das passt gut zur bisherigen Theorie. Es sagt: Auch unscharfe Messungen sind keine Beobachter-Magie. Sie sind reale Kopplungen, die mehr oder weniger stabile Records erzeugen.

6.4 Unscharfe Welcher-Weg-Messung

Eine einfache unscharfe Welcher-Weg-Messung kann als Zweier-POVM modelliert werden:

$$E_L = ((1 + \eta)/2) P_L + ((1 - \eta)/2) P_R$$
$$E_R = ((1 - \eta)/2) P_L + ((1 + \eta)/2) P_R$$

mit:

$$0 \leq \eta \leq 1$$

$\eta = 0$ keine Wegauslesung
 $\eta = 1$ ideale Wegauslesung

η beschreibt hier die Klassifikationsschärfe des Weg-Outcomes. Es ist nicht automatisch identisch mit D_{path} oder τ_{path} ; je nach Messmodell hängen diese Größen zusammen, aber sie bezeichnen verschiedene Rollen:

η = Schärfe/Fehlerprofil der Outcome-Zuordnung
 γ = Überlappung der Record-Zustände
 V_{interf} = sichtbare Interferenz
 D_{path} = optimale Wegauslesbarkeit
 τ_{path} = Anschlussindex für verlorene Pfad-Überlappung

Die Anschluss-Lesung:

$\eta > 0$ beschreibt eine unscharfe Weg-Outcome-Zuordnung.
Eine Wegtatsache entsteht dadurch noch nicht automatisch.
Sie entsteht erst, wenn das konkrete Instrument einen Record erzeugt,
der stabil, auslesbar und anschlussfähig wird.

Entscheidend: Interferenzverlust folgt nicht aus η allein. Er folgt aus der konkreten Kopplung und der Überlappung der Record-Zustände, also aus γ oder dem entsprechenden Instrumentparameter.

6.5 Warum das hilft

Mit POVMs kann die Theorie drei realistische Fälle sauber trennen:

1. Unscharfe Outcome-Zuordnung:
Der Apparat hat Labels, aber sie sind fehlerhaft.
2. Schwache Record-Kopplung:
Die Pfadalternativen koppeln nur teilweise an unterscheidbare Records.
3. Instabile Record-Bildung:
Ein Outcome entsteht, bleibt aber nicht persistent genug für
Tatsachenstatus.

Diese drei Fälle können im Experiment zusammenfallen, sind begrifflich aber verschieden. Genau diese Trennung ist ein Gewinn der Anschluss-Sprache.

6.6 Rote Linie

Auch mit POVMs bleibt die Theorie konservativ:

```
Sie ersetzt nicht  $p(k) = \text{Tr}(\rho E_k)$ .  
Sie ersetzt nicht die Messoperatoren.  
Sie leitet keine neuen Wahrscheinlichkeiten her.  
Sie entscheidet nicht ohne Apparaturphysik, welche POVM und welches Instrument realisiert sind.
```

Der eigene Beitrag lautet:

```
Outcome-Wahrscheinlichkeit ist nicht Tatsachenstatus.  
Tatsachenstatus beginnt erst bei stabilem Anschluss des Outcome-Records.
```

Ebenen-Disziplin: $p(k|\rho) \neq \text{Fact}$; γ / D_{path} (Physik) $\neq \tau_{\text{path}} / \text{Fact}(\dots)$ (Anschlussindex/Schwellentest).

Nicht zusammenfallen — auch nicht bei POVM-Outcomes.

Blatt	Was TTT hier nicht tut
MMM	Fact-Definition, G3–G6, Mini-Satz 4, Messketten-Checkliste
QQQ	Born-Import, Kaskade 1–10, Wigner/FR, Sync, Kollaps-Wegweisung
RRR	Bell/CHSH/GHZ, Kontrafaktik, Serien-Befund, Tsirelson-Import

SSS (Sprache/Gefühl): **[Anwendung · nicht Physik]** — Sync-/Gewicht-Analogien nur dort; kein Erweiterungspfad für γ oder POVM.

7. Instrument, Dephasierung und Quantum Eraser

7.1 Ein konkretes Wegrecord-Instrument

Das einfachste Instrument für einen partiellen Welcher-Weg-Record ist eine Kopplung an ein Record-System:

```
|L>|r_0> -> |L>|r_L>  
|R>|r_0> -> |R>|r_R>  
gamma = <r_L|r_R>
```

Wenn der Record nicht ausgelesen wird und man nur das Pfadsystem betrachtet, wirkt diese Kopplung als Dephasierungskanal:

```
rho =  
[ rho_LL rho_LR ]  
[ rho_RL rho_RR ]  
  
Phi_gamma(rho) =  
[ rho_LL      gamma rho_LR      ]  
[ conj(gamma) rho_RL      rho_RR      ]
```

Die Diagonalterme bleiben Weggewichte. Die Off-Diagonalterme tragen die Kohärenz zwischen den Wegen und werden mit γ gedämpft.

Anschluss-Lesung:

```
gamma ~ 1 Record-Zustände fast gleich:  
Weg-Unterscheidung bleibt offen.  
  
gamma ~ 0 Record-Zustände unterscheidbar:  
Weg-Unterscheidung wird als Record-Kandidat stark.
```

Das ist der konkrete mathematische Grund, warum im Doppelspalt die Interferenzsichtbarkeit im symmetrischen Fall mit $|\gamma|$ zusammenhängt.

7.2 Warum ein Channel noch keine Tatsache ist

Der Kanal Φ_γ beschreibt, was im reduzierten Pfadsystem sichtbar ist. Er entscheidet aber noch nicht allein, ob eine Tatsache entstanden ist.

Für Tatsachenstatus braucht es zusätzlich:

1. einen konkreten Record,
2. Auslesbarkeit dieses Records,
3. Persistenz über Anschlussfolgen,
4. geringe praktische Reversibilität.

Darum gilt:

```
Dephasierung im reduzierten System = Hinweis auf Record-Kopplung.  
Stabile Tatsache = Record-Kopplung plus Anschluss-Stabilität.
```

Das ist besonders wichtig, weil man in der Quantenmechanik oft durch Teilsystem-Beschreibung Kohärenz verliert, obwohl das Gesamtsystem noch unitar und prinzipiell reversibel ist.

7.3 Quantum Eraser als Reversibilitäts-Test

Ein Quantum-Eraser-Fall zeigt genau die Kante der Theorie.

Wenn die Record-Zustände noch kontrolliert werden können, kann man sie in einer anderen Basis auslesen, zum Beispiel in einer Eraser-Basis:

```
|e_+> ~ |r_L> + |r_R>  
|e_-> ~ |r_L> - |r_R>
```

Dann gilt grob:

```
Auslesung in Wegbasis:  
Wegrecord sichtbar, Interferenz im Gesamtdatensatz verschwindet.  
  
Auslesung in Eraser-Basis:  
Welche-Weg-Information wird nicht als Wegtatsache stabilisiert.  
Konditionierte Teilmengen zeigen Fransen/Gegenfransen.
```

Anschluss-Lesung:

Der Eraser löscht keine schon stabile makroskopische Tatsache.
Er zeigt, dass der Record noch nicht als irreversible Anschlussbedingung festgelegt war oder dass alle relevanten Record-Kopien kontrolliert wurden.

Der Punkt ist nicht Bewusstsein, sondern Reversibilität der Record-Struktur.

7.4 Eraser und Tatsachenschwelle

Der Tatsachenschwellen-Test aus Abschnitt 4.4 wird dadurch konkret:

Wenn V_{recover} gross ist:
Der Record war noch reversibel genug.
Besserer Status: Record-Kandidat / partielle Trennwirksamkeit.

Wenn V_{recover} klein ist:
Die ursprüngliche Kohärenz ist in der relevanten Anschlussfolge praktisch nicht mehr verfügbar.
Besserer Status: stabile Tatsache.

Das heisst:

Quantum Eraser ist kein Rückgängigmachen einer fertigen Tatsache.
Quantum Eraser ist ein Test, ob der angebliche Record schon Tatsache war.

Bei mikroskopischen Records kann Erasure möglich sein. Bei makroskopisch vervielfältigten Records müsste man alle relevanten Umweltkopien kontrollieren. Dann wird V_{recover} praktisch klein.

7.5 Statusfluss

Möglichkeitsordnung
|
v
Kopplung an Apparatur/Umgebung
|
v
Record-Kandidat
|
+-- V_{recover} gross --> Eraser/Umordnung möglich
| Status: partielle Trennwirksamkeit
|
+-- V_{recover} klein,
d_read hoch,
d_persist hoch --> stabile Tatsache

In einem Satz:

Nicht jeder verlorene Interferenzterm ist schon eine Tatsache.
Aber jede stabile Tatsache setzt eine verlorene praktische Reversibilität der relevanten Record-Struktur voraus.

7.6 Konkretes Quantum-Eraser-Schema

Nehmen wir den idealisierten Fall eines scharfen, aber noch kontrollierbaren mikroskopischen Wegrecords:

$$|\Psi\rangle = (|L\rangle|r_L\rangle + |R\rangle|r_R\rangle) / \sqrt{2}$$
$$\langle r_L|r_R\rangle = 0$$

Wenn der Record in der Wegbasis ausgelesen oder ignoriert wird, sieht das Pfadsystem reduziert wie eine Mischung aus:

$$\rho_{\text{path}} = (|L\rangle\langle L| + |R\rangle\langle R|) / 2$$

Die Off-Diagonal-Terme fehlen im reduzierten Pfadsystem. Der unbedingte Schirmdatensatz zeigt daher kein Interferenzmuster.

Nun wählt man statt der Wegbasis die Eraser-Basis:

$$|e_+\rangle = (|r_L\rangle + |r_R\rangle) / \sqrt{2}$$
$$|e_-\rangle = (|r_L\rangle - |r_R\rangle) / \sqrt{2}$$

Dann lässt sich derselbe Zustand so schreiben:

$$|\Psi\rangle =$$
$$((|L\rangle + |R\rangle) |e_+\rangle$$
$$+ (|L\rangle - |R\rangle) |e_-\rangle) / 2$$

Konditionierung auf den Eraser-Record ergibt:

Outcome e_+ :

$$|\psi_{e_+}\rangle = (|L\rangle + |R\rangle) / \sqrt{2}$$

-> Fransen

Outcome e_- :

$$|\psi_{e_-}\rangle = (|L\rangle - |R\rangle) / \sqrt{2}$$

-> Gegenfransen

Ohne Konditionierung werden beide Teilmengen addiert:

$$\text{Fransen} + \text{Gegenfransen} = \text{kein Muster im Gesamtdatensatz}$$

Anschluss-Lesung:

Der Wegrecord war real gekoppelt, aber noch kontrollierbar.
Die Wegunterscheidung war stark als Record-Kandidat.
Sie war noch nicht als irreversible Anschlussbedingung stabilisiert.

Das erklärt, warum der Eraser keine fertige Tatsache löscht. Er nutzt eine andere Auslesung eines noch kontrollierbaren Record-Systems.

7.7 Umweltleck und Grenze des Erasers

Der kritische Fall entsteht, wenn der Wegrecord nicht nur im kontrollierten System r , sondern auch in unkontrollierten Umweltkopien steckt:

$$|\Psi\rangle = (|L\rangle|r_L\rangle|E_L\rangle + |R\rangle|r_R\rangle|E_R\rangle) / \sqrt{2}$$
$$\delta = \langle E_L | E_R \rangle$$

Wenn man nur r erasen kann, aber E nicht kontrolliert, bleibt die Umwelt als Wegrecord übrig. Im einfachen Modell ist die wiederherstellbare konditionierte Sichtbarkeit durch die Umwelt-Überlappung begrenzt:

$$V_{\text{recover}} \leq |\delta|$$

Lesung:

$|\delta|$ nahe 1:
Die Umwelt hat kaum unterscheidbare Wegkopien.
Erasure bleibt prinzipiell gut möglich.

$|\delta|$ nahe 0:
Die Umwelt trägt unterscheidbare Wegkopien.
Erasure am kleinen Record reicht nicht mehr.
Der Record wirkt faktisch als stabile Anschlussbedingung.

Das ist die präzisere Version von "makroskopisch irreversibel": Nicht Grösse allein zählt, sondern verteilte, nicht mehr kontrollierbare Record-Kopien in der Anschlussfolge.

7.8 Rote Linie

Die Theorie erklärt nicht neu, wann ein konkreter Quantum-Eraser-Aufbau Fransen, Gegenfransen oder keine Fransen zeigt. Das bleibt Standard-QM: Zustand, Kopplung, Messbasis, Konditionierung, Detektoreffizienz.

Der eigene Beitrag ist die Statusordnung:

Eraser möglich -> Record war noch nicht stabiler Anschluss.
Eraser nicht mehr kontrollierbar -> Record wirkt faktisch als Tatsache.

*Reversibilität vs. Record-Status, drei Record-Fälle: **QQQ**. Eraser-Schema bleibt Standard-QM-Rechnung.*

8. Glossar der Statusbegriffe

Dieses Glossar ist kein Ersatz für die Definitionen, sondern eine schnelle Statuskarte. Es soll verhindern, dass Möglichkeit, Record und Tatsache sprachlich ineinanderlaufen.

8.1 Möglichkeitsordnung

Status:

real möglich, aber nicht wirklich.

Form:

getragene Anschlussstruktur, im Minimalmodell durch $|\psi\rangle$ oder ρ repräsentiert.

Nicht:

subjektives Wissen allein;
schon realisierte Tatsache;
parallele fertige Welt.

Beispiel:

Vor der Wegmessung trägt der Doppelspalt eine offene Pfadordnung.
Die Frage L/R ist noch keine Tatsache.

8.2 Unterscheidung

Status:

Frageform, deren Alternativen prinzipiell als Tatsachen auseinanderfallen können.

Form:

$D = \{P_i\}$ oder realistisch eine POVM/Instrument-Struktur.

Nicht:

automatisch eine Tatsache;
automatisch die richtige Pointer-Basis.

Beispiel:

$D_{\text{way}} = \{P_L, P_R\}$

Die Frage "links oder rechts?" existiert als mögliche Unterscheidung. Sie ist aber erst dann eine Wegtatsache, wenn ein stabiler Wegrecord entsteht.

8.3 Kopplung

Status:

realer Vorgang, durch den Möglichkeitsordnung mit Apparatur, Umgebung oder anderem System in Anschluss tritt.

Form:

U, Instrument, Channel oder konkrete Apparaturkopplung.

Nicht:

automatisch Messung im starken Sinn;
automatisch Tatsachenbildung.

Beispiel:

```
|L>|r_0> -> |L>|r_L>  
|R>|r_0> -> |R>|r_R>
```

8.4 Record-Kandidat

Status:

eine Korrelation oder Spur, die als Record in Frage kommt, aber den Tatsachenschwellen-Test noch nicht bestanden hat.

Form:

unterscheidbare oder teilweise unterscheidbare Record-Zustände.

Nicht:

halbe Tatsache;
fertiger makroskopischer Anschluss;
irreversible Festlegung.

Beispiel:

Ein mikroskopischer Wegrecord, der in einer Eraser-Basis noch kontrolliert ausgelesen werden kann.

8.5 Partielle Trennwirksamkeit

Status:

graduelle Stärke, mit der Alternativen auseinanderfallen.

Form:

γ , D_{path} , τ_{path} , d_{read} , d_{persist} als verschiedene Anzeigen.

Nicht:

partieller Tatsachenstatus.

Kurz:

Eine Unterscheidung kann teilweise trennwirksam sein.
Eine Tatsache ist nicht teilweise wirklich.

8.6 Stabile Tatsache

Status:

festgelegter, anschlussfähiger Record.

Form:

Fact(D,C,A_S,F_T), wenn Lesbarkeit, Persistenz, geringe praktische Reversibilität und Folgeanschluss gegeben sind.

Nicht:

ein blosses Outcome-Label;

ein Effekt E_k ;
ein reduzierter Channel allein.

Arbeitsform:

Fact(D,C,A_S,F_T) genau dann, wenn
 $d_{\text{read}}(D) \geq \theta_{\text{read}}$
 $d_{\text{persist}}(D,F_T) \geq \theta_{\text{persist}}$
 $V_{\text{recover}}(D,F_T) \leq \theta_{\text{recover}}$
und der Record in Folgekopplungen als Bedingung wirkt.

8.7 Outcome

Status:
Ergebnislabel einer Messung oder POVM.

Form:
 k mit $p(k) = \text{Tr}(\rho E_k)$.

Nicht:
automatisch Tatsache.

Ein Outcome wird erst dann im Anschluss-Sinn zur Tatsache, wenn der zugehörige Outcome-Record stabil wird.

8.8 Eraser-Fall

Status:
Testfall für Record-Reversibilität.

Form:
kontrollierte Auslesung des Records in anderer Basis.

Nicht:
Rückgängigmachen einer fertigen Tatsache.

Lesung:

Eraser möglich:
Record war noch nicht stabiler Anschluss.

Eraser nicht mehr kontrollierbar:
Record wirkt faktisch als Tatsache.

8.9 Kurzschemata

Möglichkeitsordnung
-> Kopplung
-> Record-Kandidat
-> partielle oder starke Trennwirksamkeit

-> Tatsachenschwellen-Test
-> stabile Tatsache

Oder noch knapper:

Möglichkeit trägt.
Kopplung prüft.
Record kandidat wird.
Stabilität entscheidet.
Tatsache wirkt weiter.

9. Was dieses Modell erklärt

Das Modell erklärt nicht die Quantenmechanik. Es ordnet den Wirklichkeitsstatus ihrer Elemente.

Es leistet:

1. Es trennt Möglichkeitsstruktur von realisierter Tatsache.
2. Es macht klar, warum eine nicht gemessene Welcher-Weg-Frage keine verborgene Tatsache sein muss.
3. Es beschreibt Messung als trennwirksame Kopplung, nicht als Beobachterakt.
4. Es zeigt, warum dieselbe physikalische Apparatur unterschiedliche Wirklichkeiten festlegt, je nachdem, welche Unterscheidung stabil anschlussfähig wird.
5. Es erlaubt partielle Messungen als graduelle Trennwirksamkeit zu lesen.
6. Es trennt graduelle Trennwirksamkeit von schwellenförmigem Tatsachenstatus.
7. Es ordnet unscharfe Messungen als POVM-Outcomes mit separatem Record-Status ein.
8. Es liest Quantum-Eraser-Fälle als Test der Record-Reversibilität.
9. Es kartiert `gamma`, `V_interf`, `D_path` und `tau_path` ohne diese Größen begrifflich zu vermischen.
10. Es zeigt am Eraser-Schema, warum Konditionierung Fransen/Gegenfransen sichtbar machen kann, ohne eine stabile Tatsache rückgängig zu machen.

10. Was dieses Modell nicht erklärt

Die folgenden Punkte bleiben bewusst bei der Physik:

1. Die Schrödinger-Gleichung und die Dynamik der Amplituden.
2. Die Born-Regel als exakte Wahrscheinlichkeitsregel (*Status-Import: **QQQ** — keine Herleitung hier*).
3. Die konkrete Pointer-Basis in realen Messgeräten.
4. Dekohärenzraten und technische Stabilitätsbedingungen von Records.
5. Bell-, CHSH- und Tsirelson-Grenzen (*Korrelations-Import: **RRR** — keine Ableitung hier*).
6. Der genaue Zeitpunkt und Mechanismus einzelner Detektionsereignisse.
7. Welche konkrete POVM und welches Instrument eine reale Apparatur implementiert.
8. Die quantitative Auswertung konkreter Quantum-Eraser-Aufbauten.

Kurz:

Die Anschlussordnung deutet, welche Unterscheidung wirklich wird.
Die Physik berechnet, mit welchen Wahrscheinlichkeiten und unter welchen konkreten dynamischen Bedingungen das geschieht.

11. Exklusiver Kern der Deutung

Das Minimalmodell ist nicht empirisch exklusiv gegen andere Quanteninterpretationen. Es liefert dieselben Standardwahrscheinlichkeiten.

Exklusiv ist sein ontologisches Profil:

1. Möglichkeit ist real, aber nicht schon wirklich.
2. Nur festgelegte Kopplungsereignisse sind wirklich im harten Sinn.
3. Messung ist trennwirksame Kopplung, nicht Bewusstsein und nicht bloss Informationsupdate.
4. Keine verborgenen Pfadtatsachen werden eingeführt.
5. Keine parallelen realisierten Welten werden benötigt.
6. Die Wellenfunktion wird weder subjektiviert noch zur voll realisierten Welt gemacht.

Das ist die Formel:

real möglich, aber nicht wirklich;
wirklich erst als stabil trennwirksam festgelegtes Ereignis.

12. Status und Begleitblätter

Dieses Dokument ist die **kanonische Fassung** des Doppelspalt-Minimalformalismus (**v1.0**, Pass 95). **Pass 115**: Wände-Anbindung · **Pass 122**: [Open_X\(D_way\)](#) in §4.4 · Serien/Valid → **RRR**.

Offen für Folgearbeit: quantitative p -Auswertung weiterer Eraser-Aufbauten (POVM-Feinheit);
Born/Anschlussgewichte als eigenes Folgepapier (→ **QQQ** Forschungsrand).

Forschungsrand (nicht Release-kritisch): Born→**QQQ** bleibt offenes Prüfpad. **p-Mini** §12.3 + §7.6 decken den Eraser-Grundfall; Feinarbeit an Aufbauten = Pass 200+ / Prüfpad.

Motor (Lesart): Zeit und Fortschritt brauchen innerhalb der KAO keine Zusatzontologie — Kernsatz und Einwand-Antwort **NNN** Pass 216; getragene Offenheit **UUU** §4 ≠ Statik im Einwand-Sinn; kein externer Physik-Beweis §12.

Born (Lesart): Gewichtsverteilung als bewegtes Gleichgewicht der Anschlussgewichte — **QQQ** Pass 218; Import, keine $|\psi|^2$ -Herleitung, keine tote Statik.

12.1 Leseffade

Pfad	Folge
Formalismus	MMM §8.2 \leftrightarrow TTT §4.4 \rightarrow TTT §5–7
Physikprüfung	KKK \rightarrow MMM \rightarrow QQQ \rightarrow RRR \rightarrow TTT \rightarrow UUU §13 / AAA H16
Anwendung	MMM \rightarrow SSS (nicht Voraussetzung für TTT)

12.2 Fünf Sätze (Außenkante TTT)

1. γ und D_{path} sind Physik; τ_{path} und **Fact(...)** sind Anschluss-Sprache — nicht vermischen.
2. **Outcome-Wahrscheinlichkeit** ist nicht **Tatsachenstatus**.
3. **Trennwirksamkeit** ist graduell; **Tatsache** ist schwellenförmig (Status 0/1/2).
4. **Eraser** testet Reversibilität — er löscht keine stabile Tatsache.
5. **Born und Bell** importieren, nicht herleiten — **QQQ** und **RRR** tragen den Status-Import.
6. **Ohne Wegdetektor**: $\text{Open}_X(D_{\text{way}})$ — nicht „beide Wege factisch“, nicht „kein Weg“.

12.3 p-Mini — Eraser-Grundfall (Status-Lesart)

[Deutung · Illustration] — keine neue Dynamik, keine Born-Herleitung. **Rechnung**: §7.6 · **Prüfprotokoll** Doppelspalt · $\text{Open}_X(D_{\text{way}})$ §4.4.

Schritt	Physik (kurz)	KAO-Status
Wegrecord kontrolliert · ρ_{path} diagonal (§7.6)	Record-Kandidat stark gekoppelt	R — nicht F
Schirm ohne Weg-Fact	$\text{Open}_X(D_{\text{way}})$	Open
Eraser-Basis · Konditionierung e_+/e_-	Fransen/Gegenfransen recoverierbar	Reversibilitätstest — R , nicht Tatsachen- Löschung
Umweltleck $\delta \neq 0$ (§7.7)	Record nicht voll kontrollierbar	R \rightarrow T/F je nach $\gamma \cdot \tau_{\text{path}}$

Merksatz: Der Eraser prüft, ob der Record schon **Tatsache** war — er löscht keine stabile **F**.

Kanon: [Hauptbuch.md](#) v1.0.39 (freigegeben) · [Handbuch.md](#) H16 · [Fallbuch.md](#) (Verweis).