

Resonanz-vermitteltes Zeit-Gating fragiler Kerne in Hochenergie-Kollisionen

Eine TSM-Brückeninterpretation des „Deuteron-Paradoxons“ (Working Paper)

Version 1.0 · Datum: 30.12.2025 · Status: Arbeits-Hypothese (auditpflichtig)

Autorin: Rosi Hach

Transparenzhinweis (EU AI Act, Stand 08/2025): Dieses Dokument wurde mit Unterstützung eines textgenerierenden KI-Systems erstellt, um Inhalte des Tunnel-Schwingungs-Modells (TSM) in eine Paper-Form zu strukturieren. Die KI ersetzt keine fachliche Gegenlese; alle Aussagen sind prüf- und interpretationspflichtig.

Zusammenfassung

Beobachtungen von Deuteronen und Antideuteronen in sehr heißen hadronischen Endzuständen werden seit langem als „Schneeball-in-der-Hölle“-Problem diskutiert: Wie können schwach gebundene Kerne in einem kurzzeitig extrem heißen Medium auftreten? Ein aktueller ALICE-Befund wird in der Öffentlichkeit so zusammengefasst, dass (Anti)deuteronen überwiegend nicht im primären Feuerball entstehen, sondern zeitverzögert aus Nukleonen, die erst durch den Zerfall kurzlebiger Resonanzen freigesetzt werden. Dieses Papier bereitet die dazu passenden TSM-Kernbegriffe (dreifache Zeitreferenz $t/\tau/\kappa$, Kohärenzfeld K , Phasenlage $\Delta\phi$, Resonanzfunktion F_{res} , Schwellen $\pi/\Delta/\Theta$) so auf, dass Forschende eine nachvollziehbare „Brücken-Lesart“ erhalten: Resonanzen wirken als messbare Zeitpuffer (κ -Gradienten / Wigner-Smith-Delay-Analogon), die ein Bindungsfenster (π -Gate) erst nach Abkühlung öffnen. Wir formulieren prüfbare Hypothesen, ein minimal reproduzierbares Dokumentations-/Audit-Schema und eine vorsichtige Einordnung (TSM als Meta-Rahmen, nicht als Ersatz der QCD).

Schlüsselwörter: Deuteron, Antideuteron, ALICE, Resonanzen, Zeitverzögerung, Wigner-Smith, Zustandsdichte, κ -Feld, Tunnelzeit τ , Kohärenz K , Phasenlage $\Delta\phi$, TSM

1. Kontext und Motivation

Der t3n/MIT-Technology-Review-Artikel (28.12.2025) berichtet über eine neue ALICE-Auswertung zur Produktion leichter Kerne in Proton-Proton-Kollisionen. Die Kernaussage lautet: (Anti)deuteronen „überleben“ die früheste, heißeste Phase nicht, sondern entstehen überwiegend erst in einer späteren, kühleren Phase, nachdem kurzlebige Resonanzen (insb. Δ -Baryonen) zerfallen und Protonen/Neutronen freisetzen. Dadurch wird ein zeitliches Pufferfenster wirksam, in dem die Bindung möglich wird.

Dieses Dokument liefert dazu keine neue Teilchenphysik-Ableitung. Es ist eine TSM-Brückenarbeit: Wir übersetzen die qualitative Struktur „Resonanz-Delay \rightarrow Bindung in kühlerer Phase“ in die im TSM verwendeten Größen ($t/\tau/\kappa$, Kohärenzfeld K , Phasenlage $\Delta\phi$, Resonanzfunktion F_{res} , Schwellen $\pi/\Delta/\Theta$) und leiten daraus prüfbare und auditierbare Hypothesen ab.

2. Minimaler Befundrahmen (externer Befund, ohne Detail-Replikation)

- Frühe Phase: sehr heißes, dichtes Medium (primärer „Feuerball“).
- Resonanz-Zwischenzustände: kurzlebige Baryon-Resonanzen werden reichlich produziert.
- Zeitliche Verzögerung: Resonanzen zerfallen nach endlicher Verweilzeit; dies wirkt als Zeitpuffer.
- Späte Phase: nach Abkühlung/Entdichtung werden Nukleonen frei und können koaleszieren.
- Messzugang: Deuteron–Pion-Impulskorrelationen (Femtoskopie) als direkter Hinweis auf den mikroskopischen Entstehungsweg.

- Ergebnis: der Großteil der (Anti)deuteronen stammt aus dem sekundären (verzögerten) Prozess.

3. TSM-Formalkern für die Brücke

3.1 Dreifache Zeitreferenz $t/\tau/\kappa$

TSM unterscheidet physikalische Zeit t , Tunnelzeit τ (Kairos/Resonanzzeit) und Zeitdichte κ als Zustandsdichte-nahes Maß. Ein formaler Ansatz ist ein Zeitvektorraum $Z=\mathbb{R}^3$ mit Basis $\{e_t, e_\tau, e_A\}$ und Zustand $z=t \cdot e_t + \tau \cdot e_\tau + a \cdot e_A$. Die Phasenlage $\phi(z)$ bestimmt Interferenz (in-phase \rightarrow Verdichtung; gegen-phase \rightarrow Verzögerung).

Für die Brücke wird τ über κ abgebildet (Arbeitsrelation): $\tau(x,t)=1/(\alpha \cdot \kappa(x,t))$. Damit kann „Zeitpuffer/Delay“ phänomenologisch als κ -Struktur (Zustandsdichte-Korridor) beschrieben werden.

3.2 Kohärenzfeld K , Phasenlage $\Delta\phi$ und Resonanzfunktion

Ein operatives Bindungskriterium lautet: stabile Projektionen/„Form“ treten auf, wenn $K \geq K^*$ und $\Delta\phi \leq \varepsilon$ (Minimalphase). Als Arbeitsformel dient:

$$\Delta\phi_\varepsilon = \max(\Delta\phi, \varepsilon)$$

$$\tau_{\text{eff}} = \|\tau \cdot e_\tau + a \cdot e_A\|$$

$$F_{\text{res}} = (K \cdot \tau_{\text{eff}}) / \Delta\phi_\varepsilon$$

3.3 Schwellen-Logik ($\pi/\Delta/\Theta$)

Für Brückeninterpretationen nutzt TSM Schwellen-Kombinatorik: π als Bindeschwelle/Gate, Δ als Transformations-/Kipp-Schwelle und Θ als Zeitschwelle (Öffnung eines Zeitfensters).

Interferenzkombinationen wie „ $\Delta+\Theta \Rightarrow$ zeitgetaktete Transformation“ dienen als strukturtreue Übersetzung zwischen Befundnarrativ und TSM-Vokabular.

4. Brücken-Mapping: Δ -Resonanz-Delay als Θ -Fenster, Bindung als π -Gate

Primärphase (heiß): Das System ist stark streuend/fragmentiert; ein stabiler Bindungsdurchtritt (π -Gate) ist unwahrscheinlich. TSM-analog entspricht dies instabiler Phasenlage (großes $\Delta\phi$) und fehlender Kohärenzbindung.

Resonanz-Zwischenzustand (Δ): Kurzlebige Resonanzen speichern Quanten-/Baryon-Information in einem Zwischenzustand. Strukturell ist dies ein Δ -Schwellenraum: transformativ, kurzlebig, aber mit endlicher Verweilzeit.

Zeitpuffer (Θ): Die endliche Verweilzeit wirkt als Θ -Gating. Erst nach Ablauf eines τ -Fensters werden Nukleonen freigesetzt und können in eine bindungsfähige Umgebung gelangen.

Späte Bindung (π): In der kühleren Phase kann Koaleszenz stattfinden: K ist hinreichend hoch und $\Delta\phi$ hinreichend klein, sodass π „öffnet“.

Kernsatz der Brücke: Resonanzen wirken als Zeitpuffer, der das Bindungs-Gate in eine spätere Phase verschiebt. Damit muss fragile Materie nicht „durch die Hölle“ getragen werden, sondern entsteht erst, wenn das System in ein bindungsfähiges Fenster eingetreten ist.

5. Prüfhypothesen (TSM-kompatibel, QCD-agnostisch)

- **H1 (Zeitfenster-Dominanz):** Der dominierende Anteil an (Anti)deuteronen entsteht in einem nachgelagerten Zeitfenster, das als effektive τ -Breite oder κ -Korridor parametrisiert werden kann.
- **H2 (Resonanz-Korrelation):** Die Stärke dieses Zeitfensters skaliert mit Population und Verweilzeit-Skala relevanter Resonanzzustände (Δ -Familie u. a.).
- **H3 (Multiplicity-Shift):** Mit steigender Ereignis-Multiplicity/Systemgröße verschiebt sich das wirksame τ -Fenster (Θ -Gate) und verändert die Koaleszenz-Effizienz.
- **H4 (Generalisierung):** Analoge Zeit-Gating-Mechanismen treten bei weiteren leichten Kernen (^3He , Triton) auf, ggf. über andere Resonanz-Zwischenzustände.
- **H5 (Mess-Brücke $\kappa \leftrightarrow \text{Delay}$):** Wenn ein experimenteller Proxy für Zeitverzögerung oder lokale Zustandsdichte verfügbar ist, sollte $\tau \approx 1/(\alpha \cdot \kappa)$ als phänomenologisches Mapping eine systematische Ordnung der Bindungsfenster erlauben.

6. Minimaler Dokumentations- und Audit-Rahmen (für Forschende)

TSM verlangt für Brücken-Integrationen eine klare Ebenentrennung (Physikmodell vs. TSM-Lesart) und Auditierbarkeit. Für die praktische Nutzung als Forschungsnotiz empfehlen wir ein minimales Protokoll:

Pflichtpunkt	Kurzbeschreibung	Artefakt/Output
Zeit-Deklaration	Alle Zeitgrößen als t , τ oder κ kennzeichnen; α -Normierung angeben.	Tabellarische Zeitnotation + α
Schwellen-Deklaration	ϵ (Minimalphase) und Gate-Kriterien offenlegen.	Parameterblock
Θ -Fenster	Start/Ende/Proxy-Definition des Delay-Fensters, Unsicherheiten.	Fenster-Log (JSON/CSV)

Externmodell-Spiegel	Coalescence/SHM/Transport inkl. Version/Parameter, getrennt von Brücke.	Auditblock external_model
Reproduzierbarkeit	Seeds, Config-Hashes, Schwellenwerte, Exportfelder.	Run-Manifest

7. Grenzen und Einordnung

- TSM ist ein Meta-Rahmen und „Strukturübersetzer“, nicht der Ersatz einer fundamentalen Theorie (z. B. QCD).
- Aussagen sind als Arbeits-Hypothese zu führen; konkurrierende Deutungen müssen im Audit gespiegelt werden.
- Der Nutzen liegt in einer klaren, dokumentierbaren Sprache für „Delay → Bindungsfenster“ und in testbaren Hypothesen.

8. KI-Transparenz und Governance

Für Publikationen oder Preprints empfehlen wir, den KI-Einsatz offen zu kennzeichnen und die Aussagen als interpretationspflichtig zu markieren. Zusätzlich sollte die Brücke als „Transfermodul · Arbeits-Hypothese“ gelabelt werden und ein Audit-Trail (Quellen/Versionen) beigefügt werden.

9. Literatur und interne Referenzen

- Petereit, D. (28.12.2025): „LHC löst Rätsel: Wie fragile Materie in der Hölle des Urknalls entsteht“ (t3n/MIT Technology Review, Online-Artikel).
- TSM-Korpus: „TSM-Module 6 und META-01 v67 – Teil 6“ (Zeitvektorraum; Resonanzfunktion; κ - τ -Korrespondenz; Schwellen/Interferenzen).
- TSM-Korpus: „TSM-METAs und KI-Synthese v41 – Teil 7“ (Zeit-Skalen-Regeln; Audit-Pflichten).
- TSM-Korpus: „Transparenz-Vorwort zum Tunnel-Schwingungs-Modell (TSM)“ (Einordnung; Datenanbindung).
- TSM-Korpus: „TSM-136D_recommended.json“ (Default-Schwellen; Dokumentationsfelder).
- ALICE Collaboration (2025): Observation of deuteron and antideuteron formation from resonance-decay nucleons. Nature 648, 306–311 (2025). DOI: 10.1038/s41586-025-09775-5.