Der Frame–Budget–Ansatz (FBA)

Wie Zeit, Dynamik und Geometrie aus Budgetflüssen entstehen

Eine operative Brücke zwischen Quantenmechanik und Allgemeiner Relativitätstheorie

Teil X: Vorhersagen, Falsifizierbarkeit & Brücke FBA → QM ↔ ART

Dipl. Wirt.-Inf. Jens Tetzner

21. Januar 2026

Inhaltsverzeichnis

X Vorhersagen, Falsifizierbarkeit & Brücke FBA → QM ↔ ART **2**

- **X.1 Einleitung & Zielbild** **2**
- **X.2 Vorangestellte Grundlagen & Konventionen (Import aus Teil I: FBA - Grundlagen)** **6**
- **X.3 Brückensatz FBA → QM ↔ ART** **9**
- **X.4 H-Gates & Proxy-Familien (Konsistenz- & Übergangskriterien)** **15**
- **X.5 Rechenkalkül: Vom FBA-Setup zu Observablen** **24**
- **X.6 Vorhersagen (Katalog, gruppiert)** **32**
- **X.7 Falsifizierbarkeit & Experimente** **39**
- **X.8 Einordnung & Vergleich mit Standard-QM/ART/ΛCDM** **46**
- **X.9 Fallstudien & Replikations-Blueprints (TDI & kosmische Dynamik eingeschlossen)** **51**
- **X.10 Schluss: Brückenstatus, Entscheidkriterien & offene Probleme** **56**
- **X.11 Anhang: Überblick über die FBA-Reihe (Teile I–X)** **60**

Teil X

Vorhersagen, Falsifizierbarkeit & Brücke FBA $\rightarrow$ QM $\leftrightarrow$ ART

X.1 Einleitung & Zielbild

X.1.1 Motivation

Diese Abhandlung bündelt die empirisch prüfbaren Konsequenzen des Frame-Budget-Ansatzes (FBA)[1] und formuliert eine explizite Brücke zwischen FBA, Quantenmechanik (QM) und Allgemeiner Relativität (ART). Der Fokus liegt dabei nicht auf einer weiteren Interpretationsschicht, sondern auf einem *Prüfgerüst*: Aus wohldefinierten Eingaben (Kanäle, Fronten, Kalibration) soll eine Auswertung entstehen, die in *beobachtbare Größen* mündet und deren Abgleich als klare Entscheidung formuliert werden kann.

Kernidee ist, dass *H-Gates* und eine Familie von *Proxies* (u. a. Hadamard-/Kreuzbasis-Struktur, Tolman-Redshift-Faktor, Budget-Closure & KMS-Nähe, QNEC-nahe Nullfluss-Bedingungen, Front-/Signal-Protokolle) als operative Übergangs- und Konsistenzkriterien dienen. Dabei ist „QNEC-nah“ rein *operativ* gemeint: als Klasse von Nullfluss-/Fokussierungs-*Proxies* im Budgetkalkül, ohne ein eigenständiges QFT-QNEC-Theorem vorauszusetzen. Diese Elemente sind notwendig, weil die Brücke QM$\leftrightarrow$ART sonst leicht in reine Modell- oder Koordinatenwahl kippt: Proxies binden die Übersetzung an Messprotokolle und liefern damit eindeutige Pass/Fail-Signaturen statt bloßer „Plausibilität“.

Ausgehend von den Abfolge- und Budgetprinzipien liefert der FBA so einen Rechenweg von Inputs zu Observablen im Labor, in der Astrophysik und in der Kosmologie. Der Logikpfad stützt sich auf importierte Bausteine und nutzt deren Konsequenzen für Eigenzeit, Minkowski-Limes, CPTP/GKLS-Dynamik und Lokalität.[2] [3] [4] [5] [6]

X.1.2 Logikpfad

Die Brücke wird so aufgebaut, dass jede Ebene eine konkrete operative Rolle hat: Jede neue Struktur wird erst eingeführt, wenn sie eine zuvor offene Übersetzungsfrage schließt, und am Ende sollen die Tests als Pass/Fail-Entscheidungen formulierbar sein.

1. **Abfolge & Budget.** Globale Frames und Minimalereignisse definieren eine strikte Ordnung und eine Budgetbilanz (intern/extern/irreversibel).
2. **Kalibration & Front.** Externe Fronten fixieren operative Grenzraten (Signalgeschwindigkeit) und koppeln Messprotokolle an eine Referenz.

[1] Ein Überblick über alle Teile der FBA-Abhandlung inklusive Downloadlinks findet sich in Kapitel X.11 dieses Dokuments.

[2] Siehe FBA Teil I: FBA - Grundlagen, Abschnitt I.1–I.3 „Abfolge, Budget & Kalibration“.

[3] Siehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Kap. II.3–II.8 „Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie“.

[4] Siehe FBA Teil III: Quantenkinematik & CPTP-Kanäle, Kap. III.3–III.5 „Quantenkinematik & CPTP-Kanäle“.

[5] Siehe FBA Teil IV: Dynamik & Messung (GKLS), Kap. IV.3–IV.7 „Dynamik, Messung & GKLS (offene Systeme)“.

[6] Siehe FBA Teil V: Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie, Kap. V.3–V.6 „Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie“.

3. **Brücke FBA→QM.** Zustands-/Kanalbeschreibung (CPTP) und Messung (Born/-Instrumente) liefern die operative QM-Ebene. GKLS-Semigruppen treten dabei *nur im unselektierten, Markov-/Semigruppen- und Coarse-Graining-Scope* als kanonisches Effektivmodell zulässiger offener Dynamik auf; selektive Messzweige sind im Allgemeinen CP und spur-nicht-erhöhend, aber nicht CPTP. DPI/Spohn liefert dabei (im unselektierten Scope) eine prüfbare Monotonie, die spätere Aussagen über Dissipation und Messkosten absichert.

4. **Brücke FBA→ART.** Die Budget-Quadrik erzeugt Lichtkegel und den Minkowski-Limes; inhomogene Budgetflüsse codieren *im Proxy-Regime* effektive Geometrie und Redshifts. Damit wird „Geometrie“ zur Kurzsprache für eine *kinematische* Abweichungsdiagnostik und nicht zu einer vorausgesetzten Bühne (insbesondere ohne Feldgleichungs-Commitment).

5. **H-Gates & Proxies.** Brückenelemente (H-Gates) und Proxy-Kriterien (Tolman, KMS/Closure, QNEC-nahe Bedingungen, Front-Protokolle) operationalisieren Konsistenz zwischen den Beschreibungen. Sie sind der Mechanismus, der Übersetzungen zwischen Regimen kontrolliert und Degeneranzen aufbricht.

6. **Rechenkalkül.** Algorithmische Skizzen (A-D) überführen FBA-Setups in Observablen (Kanalraten, Kausal-Tests, Redshift-/Lensing-Profile, TDI-getriebene Distanzleiter und Drifts).

7. **Pass/Fail.** Jede Proxy-Familie induziert binäre Tests und Falsifikationspfade.

X.1.3 Scope und Abgrenzung

Dieses Kapitel ist *operativ* ausgerichtet: Wir nehmen die in den Grundlagen festgelegten Definitionen und Lemmata als gegeben und bauen darauf die Brücken- und Teststruktur auf.[7] Das ist nicht nur eine Frage der Kürze, sondern eine Konsistenzentscheidung: Würden wir hier die Grundkonstruktionen erneut ableiten, entstünde Doppelung und die Pass/Fail-Logik würde durch Parallelbegründungen verwässert.

Die Rekonstruktion von Raumzeit, die Dynamik offener Systeme und die kosmische TDI-Kopplung werden daher nicht neu bewiesen, sondern nur soweit zusammengefasst, wie es für die Vorhersage- und Testmodule nötig ist. Details zu Geometrie aus Budgetflüssen, Skalen/Renormierung und zum klassischen Limes werden in den jeweiligen Teilen behandelt und hier als Input verwendet.[8] [9] [10] [11]

X.1.4 Beitrag gegenüber Standard-QM/ART/Kosmologie

Standardansätze *postulieren* Raumzeit- und Feldstrukturen bzw. setzen die Brücke QM↔ART über zusätzliche Prinzipien an. In der Reihe werden Lichtkegel, Kausalität, zulässige Dynamiken (im unselektierten Markov-Scope: GKLS als Effektivmodell) und Mess-Strukturen

---

[7] Siehe FBA Teil I: FBA - Grundlagen, Abschnitt I.1–I.3 „Abfolge, Budget & Kalibration“.

[8] Siehe FBA Teil VI: Gravitation & Geometrie aus Budgetflüssen, Kap. VI.3–VI.6 „Gravitation & Geometrie aus Budgetflüssen“.

[9] Siehe FBA Teil VII: Konstanten, Skalen & Renormierung, Kap. VII.1–VII.5 „Konstanten, Skalen & Renormierung“.

[10] Siehe FBA Teil VIII: Klassischer Limes, Thermodynamik & Altern, Kap. VIII.3–VIII.8 „Klassischer Limes, Thermodynamik & Altern“.

[11] Siehe FBA Teil IX: Kosmische Dynamik, Time Dilation & Inflation (TDI), Kap. IX.3–IX.7 „Kosmische Dynamik & Time-Dilation Inflation (TDI)“.

aus den Abfolge-/Budget- und Kanalprinzipien hergeleitet; Teil X *setzt* diese Resultate als importierte Bausteine voraus und organisiert sie zu einem Prüfprogramm. DPI/Spohn liefert dabei (wiederum im unselektierten Scope) nicht nur eine „Richtung", sondern eine operativ prüfbare Monotonie, die spätere Aussagen über Dissipation und Messkosten absichert. Der Mehrwert ist dabei nicht „andere Worte", sondern eine andere Fehlerkultur: Die Brücke wird so formuliert, dass sie an mehreren, voneinander unabhängigen Stellen scheitern kann.

Die eingeführten H-Gates/Proxies liefern darüber hinaus *messbare* Pass/Fail-Kriterien (z. B. Tolman-Profile als Budget-Proxy, KMS-Nähe als Stationaritäts-Proxy, QNEC-nahe Nullfluss-Tests) und damit Abweichungssignaturen jenseits reiner Modell-Fits. Der Ansatz priorisiert somit *falsifizierbare*, skalenbewusste Vorhersagen statt nachträglicher Parametrisierung.

X.1.5 Lesefaden

Teil X ist als *Prüfprogramm* gelesen: Von festgelegten Primitiven und Kalibrationen führt der Text über eine explizite Brücke (QM/Kanalrechnung $\leftrightarrow$ Geo/Kegel) zu H-Gates/Proxies, einem Rechenkalkül und schließlich zu klaren Pass/Fail-Experimenten. Der folgende Lesefaden markiert dabei nicht nur *wo* etwas steht, sondern *welche operative Rolle* es im Gesamt-Workflow spielt (Regime-Check $\rightarrow$ Auswertung $\rightarrow$ Entscheidung).

Kapitel X.2 - Vorangestellte Grundlagen & Konventionen: Fixiert die importierten Primitive, die Budget-/Front- und Eigenzeit-Konventionen sowie die Notation so, dass die Brücke in Kapitel X.3 nicht durch verdeckte Zusatzannahmen oder stillen Bedeutungsdrift unterlaufen werden kann.

Kapitel X.3 - Brückensatz FBA $\rightarrow$ QM $\leftrightarrow$ ART: Formuliert den eigentlichen Brückensatz (Mapping, Kommutativität, DPI/Spohn-Kompatibilität) und macht explizit, *was* zwischen Kanal-/POVM-Auswertung und Geo/Kegel-Auswertung gleich bleiben muss, damit spätere Tests nicht nur „kompatibel", sondern entscheidend sind.

Kapitel X.4 - H-Gates & Proxy-Familien (Konsistenz- & Übergangskriterien): Macht die Brücke operativ: H-Gates fixieren die zulässige Darstellungsfreiheit bis auf lokale Isometrien, Proxy-Familien definieren messbare Regimebedingungen als Pass/Fail-Kriterien (Tolman, KMS/Closure, QNEC-nah, Front/No-Signalling). Ohne diese Ebene wäre Kapitel X.3 formal korrekt, aber experimentell nicht greifbar.

Kapitel X.5 - Rechenkalkül: Vom FBA-Setup zu Observablen: Liefert den reproduzierbaren Rechenweg vom FBA-Setup (inkl. H, π, Kalibration) zu Observablen (Raten, Profile, Drifts) und propagiert Unsicherheiten konsistent über Proxy- und Kalibrationsparameter.

Kapitel X.6 - Vorhersagen (Katalog, gruppiert): Katalogisiert die Vorhersagen als Testmodule und gruppiert sie so, dass Failure-Modes (Geometrie, Stationarität, Nullfluss, Front) getrennt adressierbar bleiben und Degeneranzen nicht durch gemischte Datensichten verdeckt werden.

Kapitel X.7 - Falsifizierbarkeit & Experimente: Übersetzt die Vorhersagemodule in experimentelle Roadmaps, Entscheidungslogik und Degeneracy-Breaker, weil erst die Messkombinationen und Prioritäten klären, welche Proxies tatsächlich entscheiden und welche nur „kompatibel fitten".

Kapitel X.8 - Einordnung & Vergleich mit Standard-QM/ART/ΛCDM: Ordnet die Brücke gegenüber Standard-QM/ART/ΛCDM ein, trennt Äquivalenzregime von Abweichungsregimen und zeigt, wo die Proxy-Struktur echte Zusatztests und Abweichungssignaturen erzwingt.

Kapitel X.9 - Fallstudien & Replikations-Blueprints: Zeigt Fallstudien und Replikations-Blueprints als nachbaubares Prüfprogramm (Labor, Astro, Kosmo inkl. TDI), sodass die Architektur nicht abstrakt bleibt, sondern als Pipeline von Eingabeformat $\rightarrow$ Auswertung $\rightarrow$ Pass/Fail vorliegt.

Kapitel X.10 - Schluss: Brückenstatus, Entscheidkriterien & offene Probleme: Schließt mit Brückenstatus und Entscheidkriterien (binär + stetiges Gütemaß) und benennt offene Probleme so, dass klar bleibt, welche nächsten Messungen die stärkste Hebelwirkung für Pass/Fail haben.

X.2 Vorangestellte Grundlagen & Konventionen (Import aus Teil I: FBA - Grundlagen)

Warum ein Import? In Teil X geht es um eine konsolidierte Brücken- und Testarchitektur: H-Gates und Proxies sollen als operative Pass/Fail-Kriterien funktionieren, und das Rechenkalkül soll aus klaren Inputs zu Observablen führen. Damit diese Struktur nicht unbemerkt neue Zeitbegriffe, zusätzliche Dynamikpostulate oder verdeckte Geometrieannahmen einschmuggelt, müssen die Trägerbegriffe bereits fixiert sein: Abfolge, Bilanz, Kalibration, Eigenzeit, Zulässigkeit und Komposition. Genau diese Primitive und ihre ersten Konsequenzen sind in den Grundlagen ausgearbeitet; hier werden sie nicht noch einmal festgelegt, sondern als Werkzeuge verwendet, um die folgenden Kapitel ohne Zirkelschlüsse aufzubauen.[12]

Importierte Bausteine (unverändert)

Wir übernehmen die folgenden Bausteine *ohne* Neudefinition aus Teil I: FBA - Grundlagen und verweisen textlich auf Kapitel/Box und Überschrift/Titel:

- **Abfolge globaler Zustände & Minimalereignisse:** *FBA - Grundlagen, Kap. I.2 „Globale Zustände, Frame-Folge und Minimalereignis (ME)“; FBA - Grundlagen, Kap./Box I.2 „Koaktualität und Refinement-Invarianz“.*
- **Differenzfunktion & operative Minimaldifferenz:** *FBA - Grundlagen, Box I.2 „Differenzfunktion & operative Minimaldifferenz“.*
- **Budget-Kalkül (intern/extern/irreversibel) & Bilanz:** *FBA - Grundlagen, Kap./Box I.3 „Ein-Schritt-Budget & Zerlegung“; FBA - Grundlagen, Formelkasten I.3 „Bilanzgleichungen“; FBA - Grundlagen, Lemma I.3 „Refinement-Invarianz der Bilanz“.*
- **Externe Kalibration & Front:** *FBA - Grundlagen, Definition I.3 „Kalibration und Frontkosten“; FBA - Grundlagen, Lemma I.3 „Frontschranke“; FBA - Grundlagen, Korollar I.3 „Signalfront“.*
- **Eigenzeit & Altern, Minkowski-Limes:** *FBA - Grundlagen, Definition I.4 „Eigenzeit (proper time)“; FBA - Grundlagen, Formelkasten I.4 „Eigenschaften der Eigenzeit“; FBA - Grundlagen, Definition I.4 „Alterung (irreversibel)“; FBA - Grundlagen, Formelkasten I.4 „Minkowski-Limes & Quadrik“; FBA - Grundlagen, Lemma I.4 „Zeitdilatation“.*
- **Zulässige Dynamik (CPTP/GKLS), DPI/Spohn:** *FBA - Grundlagen, Definition I.5 „Admissible Channels (CPTP)“; FBA - Grundlagen, Formel I.5 „Kraus/Stinespring“; FBA - Grundlagen, Lemma I.5 „Messung als CPTP“ (hier stets: unselektierter Gesamtkanal)*; *FBA - Grundlagen, Definition I.5 „GKLS-Generatoren (offene Systeme)“; FBA - Grundlagen, Formel I.5 „Spohn-Monotonie“; FBA - Grundlagen, Lemma I.5 „Semigroup-Budget“; FBA - Grundlagen, Definition/Korollar I.5 „DPI-Pfeil & No-Recovery“.*
- **Komposition, Lokalität & No-Signalling:** *FBA - Grundlagen, Definition I.6 „Symmetrisch-monoidale Struktur“; FBA - Grundlagen, Formel I.6 „Budget-Additivität“; FBA - Grundlagen, Lemma I.6 „No-Wire-Inflation & lokale Operationen“; FBA - Grundlagen, Korollar I.6 „Kausalkegel & lokale GKLS“.*

Wozu dient dieser Import im Lesepfad? Die Box ist eine Zirkelschluss-Sperre: In Kapitel X.3 formulieren wir ein Mapping und Kommutativitätsaussagen zwischen FBA, QM und ART, in Kapitel X.4 definieren wir H-Gates und Proxies als operative Konsistenzkriterien, und in Kapitel X.5 wird daraus ein Rechenkalkül zu Observablen. Damit diese Schritte nicht rückwirkend ihre eigenen Voraussetzungen „erzeugen“, muss bereits hier klar sein, welche

[12] Siehe FBA Teil I: FBA - Grundlagen, Kap. I.2–I.6 „Primitive, Budget, Kalibration, Eigenzeit, Zulässigkeit, Komposition“.

Begriffe als Primitive aus den Grundlagen eingesetzt werden und welche Strukturen in Teil X tatsächlich neu hinzukommen.[13]

Nachdem die Basisbegriffe damit feststehen, fixieren wir die Notation, mit der in Teil X gerechnet und verglichen wird. Die Konventionen sind so gewählt, dass dieselben Symbole in Labor-, Astro- und Kosmologie-Modulen ohne Bedeutungswechsel verwendbar bleiben und die Proxy- und Kalibrationsabhängigkeiten später in Fehlerfortpflanzung und Pass/Fail-Regeln eingehen (siehe insbesondere Kapitel X.5 sowie die Testmodule ab Kapitel X.6).

[13] Siehe FBA Teil I: FBA - Grundlagen, Kap. I.2–I.6 „Primitive, Budget, Kalibration, Eigenzeit, Zulässigkeit, Komposition“.

Notation & Konventionen

- **Diskret vs. Kontinuum:** Schrittindex $n \in \mathbb{Z}$ für aufeinanderfolgende Frames; $\Delta(\cdot)$ für diskrete Inkremente, $d(\cdot)$ für differentielle Größen im Limes.

- **Budget-Zerlegung & Eigenzeit-Kalibration:** Pro Schritt δb_{ext} (extern) sowie intern die Zerlegung $\delta b_{\text{int}}^{\text{tot}} = \delta b_{\text{int}}^{\text{rev}} + \delta b_{\text{irr,int}}$ mit $\delta b_{\text{irr,int}} \geq 0$. Pfadsummen $\sum \delta(\cdot)$ bzw. Integrale $\int d(\cdot)$. Mit der Eigenzeit-Kalibration κ_τ (äquivalent $\alpha_\tau := 1/\kappa_\tau$) setzen wir

$$d\tau_{\text{geo}} := \frac{db_{\text{int}}^{\text{rev}}}{\kappa_\tau}\,, \qquad dA := \frac{db_{\text{irr,int}}}{\kappa_\tau} \geq 0\,, \qquad d\tau_{\text{tot}} = d\tau_{\text{geo}} + dA.$$

  Im reversiblen Grenzfall $db_{\text{irr,int}} = 0$ gilt $d\tau_{\text{tot}} = d\tau_{\text{geo}}$.

- **Kalibration:** c ist die *Kalibrationskonstante* der schnellsten zulässigen Fronten (metrologisch fixiert). Einheitenwahl erfolgt stets über das definierte Front-Protokoll.

- **Raumzeit-Sprache (flach, kinematisch):** Vierervektor $x^\mu = (ct, x, y, z)$; Minkowski-Signatur $\eta = \text{diag}(-1, 1, 1, 1)$. *Lichtkegel* durch $\eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = 0$.

- **Weltlinien & Pfade:** γ bezeichnet eine Weltlinie eines Systems durch die Frame-Abfolge; Konkatenation $\Gamma = \Gamma_1 \circ \Gamma_2$. Additivität aller integrierten Budgets entlang Γ.

- **Komposition/Lokalität:** Parallele Komposition $\otimes$; serielle Komposition $\circ$. Lokale CPTP-Operationen respektieren No-Signalling und Budget-Additivität.

- **Brückenelemente (H-Gates):** Symbol H für budgettreue Isometrien zwischen komplementären Darstellungen (FBA-Basis $\leftrightarrow$ Hilbertraum/Channel-Basis). Zusatzforderungen wie „lokale Tomographie“ werden *nicht* still vorausgesetzt, sondern als Teil der H-Gate-Definition und ihrer Tests in Kapitel 4 explizit geführt. Wo nötig Indizes: $\mathsf{H}_{\text{FBA}\to\text{QM}}$, $\mathsf{H}_{\text{QM}\to\text{ART}}$. Definitionen und Tests folgen in Kapitel 4.

- **Proxy-Familien & Parameter:** Sammelparameter $\pi \equiv (\pi_{\text{Tol}}, \pi_{\text{KMS}}, \pi_{\text{QNEC}}, \pi_{\text{Front}}, \ldots)$. Beispiele: π_{Tol} (Redshift-/Temperatur-Profile), $\pi_{\text{KMS}} = (\beta_{\text{mod}}, \mu_{\text{mod}})$ (Modular-/KMS-Nähe), π_{QNEC} (Nullfluss-/Fokussierungs-*Proxy*, nicht als QFT-Theorem verwendet), π_{Front} (Signal-/Kalibrationsparameter). Jede Proxy-Familie liefert Pass/Fail-Regeln in Kapitel 4 und wird in Kapitel 6–9 in konkrete Tests überführt.

- **DPI/Spohn-Monotone:** Relative Entropie $D(\rho\|\sigma)$ (und ggf. Rényi-Divergenzen D_α nur in Bereichen/Varianten, in denen DPI gilt) sowie zugehörige Produktionsraten $\sigma_{\text{Spohn}} \geq 0$ dienen als *operativ schätzbare* Monotone/Bounds für unselektierte Prozesse (Verwendung in Kapitel 5 und Kapitel 6).

- **Prädiktions-Schema:** Abbildung $\mathcal{P}$: FBA-Setup $\mapsto$ Observablen mit Ausgaben als Raten, Frequenzen, Drifts, Profilen. Unsicherheiten via $\mathbb{E}[\cdot]$, $\text{Var}[\cdot]$ und propagierten Fehlern aus Proxy- und Kalibrationsparametern (Details: Kapitel 5).

- **Zeichenkonventionen:** Vektornormen $\|\cdot\|$; euklidische Skalarprodukte „$\cdot$“ im Raum. c explizit (keine c=1-Einheiten in dieser Abhandlung). Erwartungswerte $\mathbb{E}[\cdot]$; Supremum sup; Indikator $\mathbf{1}[\cdot]$ für Pass/Fail.

X.3 Brückensatz FBA $\to$ QM $\leftrightarrow$ ART

Dieses Kapitel etabliert die Brücke in drei Schritten. Wir beginnen bewusst auf der *QM-Seite*, weil Laborvorhersagen praktisch immer als Aussagen über Kanäle, Messungen und Raten formuliert werden. Erst wenn klar ist, welche FBA-Daten in dieser Sprache als wohldefinierte Auswertung auftreten, lohnt die zweite Pfeilrichtung: die Rekonstruktion der kausalen und geometrischen Struktur aus denselben Primitiven. Der dritte Schritt bindet beide Beschreibungen zu einem Konsistenzschema zusammen, das nicht nur formal „übersetzt“, sondern eine operative Pass/Fail-Struktur ermöglicht.

X.3.1 FBA $\to$ QM: Kinematische Einbettung

Die kinematische Einbettung ist eine *Typisierung/Arbeitsdefinition* dafür, was später als Mess- und Kanalprotokoll ausgewertet wird. Sie ist damit kein „zusätzliches Dynamikpostulat“, sondern eine Festlegung des Auswertungsrahmens: Teil X arbeitet *konditional* auf denjenigen FBA-Setups, für die eine solche Einbettung (ggf. nach zulässigem Coarse-Graining) konsistent realisierbar ist. Die zugehörigen Konsistenzbedingungen werden in Kapitel 4 über H-Gates/Proxies operationalisiert.

Definition X.3.1.1: FBA→QM: Kinematische Einbettung

Sei **FBA** die Kategorie der FBA-Setups mit Objekten $(\mathcal{S}, \mathcal{B})$ (Systemträger $\mathcal{S}$, Budgetstruktur $\mathcal{B}$) und Morphismen durch Minimalereignisse und Protokolle. Eine *kinematische Einbettung* ist ein Funktor $\mathcal{Q}\colon \mathbf{FBA} \to \mathbf{Chan}$ in eine Kategorie **Chan** (Objekte: Zustandsräume; Morphismen: Kanäle), der zuweist:

1. jedem Objekt einen (effektiv) separablen Zustandsraum $\mathcal{H}$ mit Effektalgebra $\mathsf{Eff}(\mathcal{H})$,
2. jedem Morphismus einen *unselektierten* CPTP-Kanal Φ (bzw. im Markov-/Semigruppen-Scope ein GKLS-Semigruppenelement $\Phi_t = e^{t\mathcal{L}}$),
3. Messprotokollen POVMs $\{E_i\}$ mit Outcome-Verteilungen $p(i) = \mathrm{tr}[\Phi(\rho)E_i]$.

Zulässigkeit. Die zugewiesenen Prozesse sind *zulässig* im Sinne der budgetbeschränkten Kanaltheorie.[a]

[a]Siehe FBA Teil I: FBA - Grundlagen, Abschnitt I.5 „Zulässige Dynamik als budgetbeschränkte Kanäle“.

Zwei Punkte sind hier entscheidend. Erstens wird die QM-Seite auf CPTP (und im passenden Effektiv-Scope auf GKLS) festgelegt, damit „Dynamik“ als kontrollierbare Verarbeitung und nicht als verdeckte Koordinatenwahl in die Brücke eingeht. Zweitens bleibt offen, *wie* genau die konkrete Darstellung $\mathcal{H}$ gewählt wird. Diese Freiheit ist beabsichtigt: Sie wird später durch H-Gates und Proxy-Kriterien so eingeschränkt, dass am Ende nur lokale Isometrien als Restfreiheit übrig bleiben (siehe Kapitel X.4). Weitere Details zur operativen Herleitung von Zuständen, POVMs und Kanälen aus Frames finden sich in Teil III; die dynamische Seite (GKLS, Messung, Dissipation) in Teil IV.[14] [15]

[14]Siehe FBA Teil III: Quantenkinematik & CPTP-Kanäle, Kap. III.3–III.5 „Quantenkinematik & CPTP-Kanäle“.

[15]Siehe FBA Teil IV: Dynamik & Messung (GKLS), Kap. IV.3–IV.6 „Dynamik, Messung & GKLS (offene

X.3.2 FBA $\to$ ART: Geometrische Rekonstruktion

Die geometrische Pfeilrichtung ist notwendig, weil dieselben Beobachtungsfragen, die im Labor als Kanalauswertung erscheinen, im astro- und kosmologischen Regime als Aussagen über Kausalstruktur, Redshift und Profilverläufe auftreten. Wenn die Brücke konsistent sein soll, muss diese „Geometriesprache“ aus den FBA-Primitiven entstehen, statt als Bühne vorausgesetzt zu werden.

Definition X.3.2.1: FBA→ART: Geometrische Rekonstruktion

Sei **Geo** eine Kategorie kausaler Raumzeiten (Objekte: $(\mathcal{M}, g)$ mit Kegelstruktur; Morphismen: kausalerhaltende Abbildungen). Eine *geometrische Rekonstruktion* ist ein Funktor $\mathcal{G}\colon \mathbf{FBA} \to \mathbf{Geo}$, der zuordnet:

1. der Budget-Quadrik und Front-Kalibration einen lokalen Minkowski-Limes $(\mathbb{R}^{1,3}, \eta)$ mit Lichtkegeln,
2. inhomogenen Budgetgradienten effektive Rotverschiebungs- und Temperaturprofile als operative Proxies,
3. Weltlinien γ eine Eigenzeitfunktion $\tau[\gamma]$ als integriertes internes Budget entlang γ *gemäß der Eigenzeit-Kalibration κ_τ aus Kapitel X.2.*

Kausalität. Die induzierte Kegelkausalität folgt aus Frontschranke und Signalfront sowie der lokalen Kompositionsstruktur.[a] [b]

[a]Siehe FBA Teil I: FBA - Grundlagen, Abschnitt I.3 „Externe Kalibration & Front“.
[b]Siehe FBA Teil I: FBA - Grundlagen, Abschnitt I.6 „Komposition, Lokalität & No-Signalling“.

Damit wird „Geometrie“ im Brückenkontext zur Abkürzung für zwei operative Aussagen: (1) welche Ereignisse durch Fronten kausal erreichbar sind, und (2) wie interne Budgets entlang von Weltlinien als Eigenzeit und Redshift-Proxies in Messprotokollen auftauchen. Die Ausarbeitung der Kegelrekonstruktion und der lokalen Feldtheorie-Kompatibilität liegt in Teil V; die gravitativen Profile aus Budgetflüssen und ihre ART-Nähe in Teil VI.[16] [17]

X.3.3 Konsistenzschema: Eine Auswertung, zwei Darstellungen

Die beiden Funktoren $\mathcal{Q}$ und $\mathcal{G}$ wären als getrennte Konstruktionen wenig wert, wenn sie nur „nebeneinander existieren“. Die eigentliche Brücke beginnt dort, wo dieselbe Beobachtungsfrage $\mathcal{O}$ unabhängig von der Darstellung ausgewertet werden kann. Genau diese Forderung wird später zur Quelle von Pass/Fail-Kriterien: Wenn eine Proxy-Familie verletzt ist, muss die Auswertung auseinanderlaufen.

Systeme)“.

[16]Siehe FBA Teil V: Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie, Kap. V.3–V.6 „Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie“.

[17]Siehe FBA Teil VI: Gravitation & Geometrie aus Budgetflüssen, Kap. VI.3–VI.5 „Gravitation & Geometrie aus Budgetflüssen“.

Formelkasten X.3.3.1: Kommutatives Brückendiagramm (Konsistenzforderung)

Für jedes FBA-Setup X und jede Beobachtungsfrage $\mathcal{O}$ fordern wir im Gültigkeitsbereich der H-Gate-Bedingungen (siehe Definition X.4.1.1) die Konsistenz

$$\underbrace{\mathcal{P}_{\mathrm{QM}}(\mathcal{Q}(X), \mathcal{O})}_{\text{Kanal/POVM-Auswertung}} \quad \stackrel{!}{=} \quad \underbrace{\mathcal{P}_{\mathrm{Geo}}(\mathcal{G}(X), \mathcal{O})}_{\text{Geometrisch/kausal konsistente Auswertung}} \qquad ,$$

wobei $\mathcal{P}_{\mathrm{QM}}$ (resp. $\mathcal{P}_{\mathrm{Geo}}$) das in Kapitel X.5 spezifizierte Prädiktionsschema auf der QM- (resp. Geometrie-)Seite bezeichnet. Eine Verletzung dieser Forderung (bei kontrollierten Proxies/Kalibrationen) wird in den Testmodulen als Fail-Signatur verwendet.

X.3.4 Monotonien, Lokalität und Kegelkausalität

Kommutativität ist operativ nur dann belastbar, wenn zusätzliche lokale Verarbeitungsschritte die Auswertung nicht „nachträglich aufblasen“ können. Hier kommt die gerichtete Struktur aus DPI und Spohn ins Spiel: Sie liefert eine Kontrollinstanz dafür, dass Informationsmonotone durch zulässige Verarbeitung nicht zunehmen und dass Dissipation als Produktion messbar bleibt.

Lemma X.3.4.1: DPI/Spohn-Kompatibilität mit Lokalverarbeitung

Voraussetzungen.

1. *Zulässige Dynamik:* Eine unselektierte CPTP-Semigruppe $\{\Phi_t = e^{t\mathcal{L}}\}_{t\geq 0}$ (im Markov-/Semigruppen-Scope) bzw. allgemein eine CPTP-Gesamtdynamik Φ.
2. *Referenzzustand:* Ein Referenzzustand σ (typisch stationär), so dass $D(\cdot\|\cdot)$ wohldefiniert ist und (im Semigruppenfall) $\Phi_t(\sigma) = \sigma$ gilt.
3. *Lokalverarbeitung:* Zusätzliche lokale Schritte $\mathcal{J}$ sind CPTP (unselektiert); „raumartig“/„außerhalb des Zukunftskegels“ ist die operative Interpretation von $\mathcal{J}$ als unabhängig wählbarer Zusatzverarbeitung.

Aussage.

1. *DPI (Kontraktivität):* Für alle $t \geq 0$ gilt
$$D\big(\Phi_t(\rho)\|\Phi_t(\sigma)\big) \leq D(\rho\|\sigma).$$
2. *Spohn-Produktionsrate (Semigruppenfall):* Ist σ stationär, so ist
$$\sigma_{\text{Spohn}}(t) \equiv -\frac{d}{dt}D\big(\Phi_t(\rho)\|\sigma\big) \geq 0$$
(wo definiert).
3. *Monotonie unter Zusatzverarbeitung:* Für jede zusätzliche CPTP-Operation $\mathcal{J}$ gilt
$$D\big((\mathcal{J}\circ\Phi_t)(\rho)\,\|\,(\mathcal{J}\circ\Phi_t)(\sigma)\big) \;\leq\; D\big(\Phi_t(\rho)\,\|\,\Phi_t(\sigma)\big).$$

Gültigkeitsbereich & Grenzen.

- Aussagen gelten für unselektierte Prozesse (keine Post-Selection-Verstärkung).
- Nicht-Markov-Effekte können die punktweise Form von σ_{Spohn} modifizieren; die DPI-Kontraktivität bleibt für CPTP-Gesamtdynamik erhalten.

Quellenbasis (Import). Teil I fixiert die verwendeten Begriffe zu CPTP/GKLS, DPI/Spohn sowie Lokalität/No-Signalling.[a] [b]

[a] Siehe FBA Teil I: FBA - Grundlagen, Abschnitt I.5 „Zulässige Dynamik, GKLS, DPI/Spohn“.
[b] Siehe FBA Teil I: FBA - Grundlagen, Abschnitt I.6 „Komposition, Lokalität & No-Signalling“.

Beweisskizze X.3.4.1: DPI/Spohn-Kompatibilität mit Lokalverarbeitung

1. *DPI als Kernmechanismus:* CPTP-Verarbeitung kann Relativentropie nicht erhöhen; damit folgt (1) direkt.
2. *Spohn aus GKLS:* Für GKLS-Semigruppen und stationäre σ ist $t \mapsto D(\Phi_t(\rho)\|\sigma)$ monoton fallend; dies entspricht (2) (wo die Ableitung existiert).
3. *Zusatzverarbeitung:* Da $\mathcal{J}$ CPTP ist, ist auch $\mathcal{J} \circ \Phi_t$ CPTP; erneute Anwendung von DPI liefert (3). Die Kegel-/Raumartigkeits-Sprache ist hier die operative Deutung von $\mathcal{J}$ als „zusätzlich, lokal, unabhängig wählbar".

X.3.5 Brückensatz: Existenz, Restfreiheit und Kommutativität

Mit der DPI- und Lokalverarbeitungs-Verträglichkeit steht nun das Werkzeug bereit, um „Eindeutigkeit" sinnvoll zu formulieren: nicht als Behauptung, dass es nur eine Darstellung gibt, sondern als Aussage, dass alle *kompatiblen* Darstellungen dieselbe Auswertung liefern und sich nur durch lokal irrelevante Isometrien unterscheiden.

Lemma X.3.5.1: Brückensatz (Konsistenz & Restfreiheit bis Isometrie)

Voraussetzungen (Import & Brückendaten). Die Primitive zu Abfolge/Minimalereignis, Budgetbilanz und Front-Kalibration, Eigenzeit/Minkowski-Limes sowie Komposition/Lokalität sind in Teil I festgelegt.[a] Zusätzlich seien $\mathcal{Q}$ und $\mathcal{G}$ wie in Definitionen X.3.1.1 und X.3.2.1 gegeben, und die H-Gate-Bedingungen (Kapitel 4) seien erfüllt.

Aussage. Für alle lokal (kegelbeschränkt) implementierbaren Beobachtungsfragen $\mathcal{O}$ ist die Auswertung darstellungsunabhängig im Sinne der Konsistenzforderung Formelkasten X.3.3.1. Alle Darstellungen, die dieselbe operative Auswertung reproduzieren und die H-Gate-Proxies erfüllen, unterscheiden sich höchstens durch lokale Isometrien (Restfreiheit).

[a] Siehe FBA Teil I: FBA - Grundlagen, Abschnitt I.2–I.6 „Primitive, Budget, Eigenzeit, Zulässigkeit, Lokalität".

Die Beweisskizze trennt die drei Lastträger der Aussage: (i) Typisierung als CPTP/GKLS auf der QM-Seite, (ii) Kegel- und Eigenzeitrekonstruktion aus Front und Budget auf der Geo-Seite, (iii) Ausschluss von „Darstellungs-Tricks" durch Lokalität plus DPI/Spohn.

Beweisskizze X.3.5.1: Brückensatz (Konsistenz & Restfreiheit bis Isometrie)

1. *Wohldefiniertheit von $\mathcal{Q}$:* Minimalereignisse und Protokolle werden als CPTP-Verarbeitung dargestellt; Komposition wird durch serielle und parallele Kanalverknüpfung realisiert. Damit ist die QM-Auswertung als Kanal- und POVM-Rechnung eindeutig typisiert.
2. *Wohldefiniertheit von $\mathcal{G}$:* Front-Kalibration fixiert die lokale Grenzrate und damit die Kegelstruktur; die Budget-Quadrik liefert den Minkowski-Limes, und integrierte interne Budgets definieren Eigenzeiten entlang Weltlinien (gemäß κ_τ).
3. *Restfreiheit:* Verschiedene Repräsentationen, die dieselben operativen Wahrscheinlichkeiten und Raten reproduzieren, unterscheiden sich nur durch lokale Basis- und Isometriewahl. H-Gates schränken diese Freiheit über explizite, testbare Bedingungen (Kapitel 4) so ein, dass keine zusätzliche physikalische Aussagekraft in der Darstellung steckt.
4. *Konsistenz/Kommutativität:* Unter H-Gate-Bedingungen werden dieselben operativen Observablen $\mathcal{O}$ in beiden Darstellungen aus denselben budget- und frontfesten Invarianten berechnet. DPI/Spohn und die Stabilität unter Zusatzverarbeitung (Lemma X.3.4.1) schließen aus, dass zusätzliche zulässige lokale Verarbeitung die Monotone „aufbläst“ und damit die Auswertung darstellungsabhängig macht.

X.3.6 Flacher Grenzfall

Der flache Grenzfall ist nicht nur ein Konsistenzcheck, sondern die Basis dafür, dass Labor- und Nahfeldtests als echte Spezialfälle der Gesamtarchitektur behandelt werden können. Er fixiert, dass „lokal relativistisch“ und „GKLS-lokal“ dieselbe Kausalstruktur meinen.

Korollar X.3.6.1: Minkowski-Limes & lokale GKLS-Verträglichkeit

Im flachen (Minkowski-)Grenzfall sind zulässige $\mathcal{Q}$-Dynamiken (unselektiert, im Markov-Scope: GKLS-lokal) mit der durch $\mathcal{G}$ induzierten Kegel-/Frontkausalität verträglich. Insbesondere treten keine supra-frontalen ($> c$) Signalfronten im operativen Sinn auf, und informationsbasierte Monotone sind unter zulässiger lokaler Zusatzverarbeitung monoton im Sinne von Lemma X.3.4.1.

Ausblick. Kapitel X.4 macht die bislang „strukturelle“ Brücke prüfbar, indem es H-Gates und Proxy-Familien so definiert, dass Verletzungen als konkrete Pass/Fail-Signaturen auftreten. Kapitel X.5 liefert anschließend das Rechenkalkül $\mathcal{P}$, das aus einem FBA-Setup samt Proxies und Kalibration tatsächliche Observablen erzeugt, so dass die Konsistenzforderung Formelkasten X.3.3.1 praktisch ausgewertet werden kann.

X.4 H-Gates & Proxy-Familien (Konsistenz- & Übergangskriterien)

Kapitel X.3 formuliert die Brücke als Kommutativität einer Auswertung: Dieselbe Beobachtungsfrage $\mathcal{O}$ soll unabhängig von der Darstellung (Kanal/POVM vs. Geometrie/Kegel) zu denselben Observablen führen. Damit diese Forderung mehr ist als ein formales Diagramm, benötigen wir zwei operative Zutaten: Erstens ein Brückenelement, das die beiden Darstellungen *budgettreu* und *lokal* identifiziert. Zweitens Kriterien, die markieren, *wann* die geometrisch-thermodynamischen Abkürzungen (Redshift, Stationarität, Nullfluss, Mikrokausalität) tatsächlich als valide Proxy-Aussagen verwendet werden dürfen.

Die Struktur des Kapitels folgt dieser Logik:

- **H-Gates** fixieren die zulässige Darstellungsfreiheit so weit, dass die Restfreiheit nur noch lokale Isometrien sind.
- **Proxy-Familien** bündeln diejenigen Konsistenzbedingungen, deren Verletzung die Konsistenzforderung Formelkasten X.3.3.1 operativ brechen würde.

X.4.1 H-Gates als Brückenelemente

Ein H-Gate ist kein zusätzlicher physikalischer Postulatsträger, sondern ein *Identifikationswerkzeug*: Es legt fest, welche Aspekte der FBA-intrinsischen Beschreibung als inneres Produkt, als lokale Komposition und als tomographisch rekonstruierbare Struktur in der QM/Channel-Sprache wiederauftauchen. Ohne diese Fixierung wäre „Eindeutigkeit“ aus Kapitel X.3 inhaltsleer, weil unterschiedliche Repräsentationen dieselbe Datenlage beliebig unterschiedlich kodieren könnten.

Definition X.4.1.1: H-Gate (budgettreue Kreuzbasis)

Ein *H-Gate* H ist eine lineare Isometrie zwischen einer FBA-intrinsischen Darstellung $\mathcal{V}_{\text{FBA}}$ und einer QM/Channel-Darstellung $\mathcal{V}_{\text{QM}}$ mit folgenden Eigenschaften:

1. **Budgettreue:** Es existiert ein bilinearer Budget-Formfaktor $\langle\langle\cdot,\cdot\rangle\rangle_B$ auf $\mathcal{V}_{\text{FBA}}$, so dass
$$\langle\langle u,v\rangle\rangle_B = \langle \mathsf{H}u, \mathsf{H}v\rangle$$
gilt (inneres Produkt auf $\mathcal{V}_{\text{QM}}$). Damit werden die für das Rechenkalkül relevante „Kosten- und Distanzgrößen" nicht durch Darstellungswechsel verfälscht.

2. **Lokalität und Komposition:** Für parallele Kompositionen zerlegt sich H als Tensorkranz $\mathsf{H}_{XY} = \mathsf{H}_X \otimes \mathsf{H}_Y$ (nach Identifikation der lokalen Teilträger) und respektiert serielle Komposition $\circ$. Damit ist die Brücke auf zusammengesetzten Systemen wohldefiniert und kompatibel mit No-Signalling.

3. **DPI/Spohn-Kompatibilität (isometrischer Transport):** H induziert einen Transport von Zuständen/Maps (schematisch $\rho \mapsto \mathsf{H}\rho\mathsf{H}^\dagger$, $\Phi \mapsto \mathsf{H}\circ\Phi\circ\mathsf{H}^{-1}$, wo sinnvoll definiert), so dass informationsbasierte Monotone im unselektierten Scope darstellungsinvariant ausgewertet werden (z. B. $D(\rho\|\sigma) = D(\mathsf{H}\rho\mathsf{H}^\dagger\|\mathsf{H}\sigma\mathsf{H}^\dagger)$). Damit wird verhindert, dass die Richtung des Informationspfeils durch Repräsentationswahl „umetikettiert" werden kann.

4. **Tomographische Vollständigkeit (Kreuzbasis):** H ist durch eine vorab fixierte Familie erläutbarer, lokal implementierbarer Messsettings (komplementäre Basen) *operativ prüfbar*: Zustände/Kanäle/POVMs sind aus Messstatistiken bis auf lokale Isometrien rekonstruierbar (Tests in Formelkasten X.4.3.1).

Quellenbasis (Import). Zulässigkeit (CPTP/GKLS), DPI/Spohn sowie Komposition/Lokalität sind in Teil I fixiert.[a]

[a] Siehe FBA Teil I: FBA - Grundlagen, Abschnitt I.5–I.6 „Zulässige Dynamik, DPI/Spohn, Komposition & Lokalität".

Warum diese Eigenschaften genau so gewählt sind. Budgettreue ist die Sperre gegen „Skalen- oder Kosten-Drift" durch Darstellungswechsel. Lokalität verhindert, dass die Brücke auf zusammengesetzten Systemen heimlich neue Kommunikationskanäle erzeugt. DPI/Spohn-Kompatibilität bindet die Brücke an eine gerichtete, operativ prüfbare Monotonie (im unselektierten Scope). Tomographie ist schließlich das Kriterium, das H nicht nur als Begriff, sondern als experimentell rekonstruierbares Brückenelement festnagelt.

Lemma X.4.1.1: Eindeutigkeit bis lokale Isometrien (konditional)

Voraussetzung. Es existiert ein H-Gate H im Sinne von Definition X.4.1.1, das die tomographischen Checks Formelkasten X.4.3.1 im vorab festgelegten Toleranzkorsett besteht (empirische Fenster/Toleranzen δ_*, siehe Kapitel 5).
Aussage. Jede zulässige Wahl eines solchen H-Gates ist (für die gegebenen lokalen Teilträger) bis zu lokalen Isometrien eindeutig.

Die Skizze trennt die drei Sperren, die Darstellungsfreiheit reduzieren: (i) Isometrien aus Kanaltheorie, (ii) Fixierung der relevanten Skala über Budgettreue, (iii) Eliminierung nichtlokaler Restfreiheiten durch Lokalität und Tomographie.

Beweisskizze X.4.1.1: Eindeutigkeit bis lokale Isometrien (konditional)

1. *Isometrische Realisierung:* Stinespring- und Kraus-Darstellungen liefern Isometrien für CPTP-Prozesse.[a]
2. *Fixierung durch Budgettreue:* Budgettreue bindet das relevante innere Produkt an operative Kosten- und Distanzgrößen und eliminiert nicht-physikalische Skalierungen.
3. *Reduktion der Restfreiheit:* Lokalität und Tomographie schließen verbleibende Darstellungsfreiheiten bis auf lokale Isometrien ein.[b]

[a] Siehe FBA Teil I: FBA - Grundlagen, Formel I.5 „Kraus/Stinespring“.
[b] Siehe FBA Teil I: FBA - Grundlagen, Abschnitt I.6 „Symmetrisch-monoidale Struktur & Budget-Additivität“.

Damit ist der Darstellungswechsel kontrollierbar. Was noch fehlt, ist ein Katalog von Kriterien, die anzeigen, ob eine konkrete Situation wirklich in dem Regime liegt, in dem die geometrisch-thermodynamische Kurzbeschreibung $\mathcal{G}(X)$ dieselbe Auswertung tragen kann wie $\mathcal{Q}(X)$. Genau das leisten die Proxy-Familien.

X.4.2 Proxy-Familien als Pass/Fail-Kriterien

Ein Proxy ist hier nicht „ein weiteres Prinzip“, sondern ein *Messkriterium*: Er koppelt eine geometrisch oder thermodynamisch motivierte Konsistenzforderung an ein Funktional $\mathcal{J}$, das aus Daten geschätzt werden kann, und an ein empirisches Toleranz-/Fehlerband δ_*, das reale Messauflösung (Fenster/Bootstrap/Residuen) und Protokollrobustheit widerspiegelt. Die Proxies sind so gewählt, dass sie unterschiedliche Failure-Modes trennen: stationäre Redshift-Struktur (A), Stationarität/Thermik (B), Nullfluss/Fokussierung (C) und Mikrokausalität/Frontverträglichkeit (D).

Proxy-Familien & Mess-Parameter

Wir bündeln messbare Parameter als $\pi = (\pi_{\mathrm{Tol}}, \pi_{\mathrm{KMS}}, \pi_{\mathrm{QNEC}}, \pi_{\mathrm{Front}}, \ldots)$. Jede Proxy-Familie definiert (i) ein beobachtbares Funktional $\mathcal{J}_\bullet$, (ii) eine Pass/Fail-Regel mit Toleranz $\delta_{*,\bullet}$, (iii) eine Einbindung in das Prädiktionsschema $\mathcal{P}$ aus Kapitel X.5.

Proxy A - stationäre Rotverschiebung. Dieser Proxy ist die direkte Operationalisierung der Frage, ob „Geometrie als Lapse-Profil“ tatsächlich die beobachtete Frequenzverschiebung trägt. Er ist damit ein erster, besonders robuster Test, weil er ohne detaillierte Dynamikannahmen auskommt.

Definition X.4.2.1: Proxy A: Tolman/Redshift-Proxy (stationär)

Sei $N_B(x) > 0$ eine budgetinduzierte Lapse-Funktion (aus Front-Kalibration und Budgetgradienten) im Sinne des Proxy-Regimes, und ν eine lokal gemessene Frequenz. Wir fixieren die Konvention

$$\frac{\nu_{\text{obs}}}{\nu_{\text{emit}}} = \frac{N_B(x_{\text{obs}})}{N_B(x_{\text{emit}})} \qquad \Longleftrightarrow \qquad 1 + z_B := \frac{\nu_{\text{emit}}}{\nu_{\text{obs}}} = \frac{N_B(x_{\text{emit}})}{N_B(x_{\text{obs}})}.$$

Der zugehörige Misfit ist

$$\mathcal{J}_{\text{Tol}} = \left| \frac{\nu_{\text{emit}}}{\nu_{\text{obs}}} - \frac{N_B(x_{\text{emit}})}{N_B(x_{\text{obs}})} \right|.$$

Pass/Fail: $\mathbf{1}_{\text{Tol}} = \mathbf{1}[\mathcal{J}_{\text{Tol}} \le \delta_{*,\text{Tol}}]$.

Einordnung. Die Konstruktion von N_B aus Budgetflüssen und die Verbindung zu Redshift-Profilen werden in Teil VI vertieft.[a]

[a] Siehe FBA Teil VI: Gravitation & Geometrie aus Budgetflüssen, Kap. VI.3–VI.5 „Geometrie- und Redshift-Proxies aus Budgetflüssen".

Proxy B - Stationarität und Thermik. Kommutativität bricht typischerweise zuerst, wenn ein „stationäres" Regime nur scheinbar vorliegt. Daher koppelt Proxy B zwei unabhängige Anforderungen: KMS-Nähe misst echte thermische Stationarität in der Zustandssprache, Budget-Closure kontrolliert, ob externe Nettoströme klein genug sind, um eine stationäre Auswertung überhaupt zu rechtfertigen.

Definition X.4.2.2: Proxy B: Budget-Closure & KMS-Nähe

Für stationäre effektive Zustände mit modularer Dynamik α_t unterscheiden wir zwischen einer *Idealdefinition* (konzeptionell) und einer *Operationalisierung* (messbar).

(i) Idealdefinition (KMS-Abweichung).

$$\mathcal{J}_{\mathrm{KMS}}^{\mathrm{ideal}} \equiv \sup_{\|A\|\le 1,\ \|B\|\le 1,\ t\in[0,T]} \left|\langle A\,\alpha_t(B)\rangle - \langle \alpha_{t+i\beta_{\mathrm{mod}}}(B)\,A\rangle\right|.$$

Diese Form fixiert die Zielbedeutung „KMS-Nähe“, ist aber experimentell nur indirekt zugänglich.

(ii) Operationalisierung (spektrale KMS-Relation auf einer Testfamilie). Fixiere vor der Datensichtung eine endliche Testmenge lokaler Observablen $\mathcal{O}_{\mathrm{test}} = \{O_1, \ldots, O_M\}$ (z. B. lokale Dichten/Ströme) sowie ein Frequenzraster Ω. Schätze für $A, B \in \mathcal{O}_{\mathrm{test}}$ die stationären Zwei-Punkt-Funktionen $C_{AB}(t) = \langle A\,\alpha_t(B)\rangle$ und ihre (diskrete) Spektren $S_{AB}(\omega)$ (Fourier von C_{AB}). Um Einheiten eindeutig zu halten, interpretieren wir ω als (vorab fixiertes) Energieraster $E = \hbar\omega$; äquivalent:

$$S_{AB}(-\omega) = e^{-\beta_{\mathrm{mod}}\hbar\omega}\, S_{BA}(\omega).$$

Wir definieren daher die messbare Abweichung

$$\mathcal{J}_{\mathrm{KMS}} \equiv \max_{A,B\in\mathcal{O}_{\mathrm{test}},\ \omega\in\Omega} \left|S_{AB}(-\omega) - e^{-\beta_{\mathrm{mod}}\hbar\omega}\, S_{BA}(\omega)\right|.$$

(β_{mod} wird unabhängig kalibriert oder aus einem vorab fixierten Fit-Protokoll gewonnen.)

Budget-Closure. Zusätzlich fordern wir kleine externe Nettoströme über die (front-kalibrierte) Messdauer T:

$$\frac{|\sum \delta b_{\mathrm{ext}}|}{T} \le \delta_{*,\mathrm{clo}}.$$

Pass/Fail:

$$\mathbf{1}_{\mathrm{KMS}} = \mathbf{1}\Big[\mathcal{J}_{\mathrm{KMS}} \le \delta_{*,\mathrm{KMS}} \ \wedge\ \Big|\sum \delta b_{\mathrm{ext}}\Big|/T \le \delta_{*,\mathrm{clo}}\Big].$$

Einordnung. Die operative Rolle von GKLS, Dissipation und Spohn-Monotonie liegt in Teil IV; der thermodynamische und klassische Limes (inkl. Stationaritätsdiagnostik) in Teil VIII.[a] [b]

[a] Siehe FBA Teil IV: Dynamik & Messung (GKLS), Kap. IV.3–IV.6 „GKLS, Dissipation, Spohn“.
[b] Siehe FBA Teil VIII: Klassischer Limes, Thermodynamik & Altern, Kap. VIII.3–VIII.6 „Stationarität, Thermik & klassische Regime“.

Dokumentationsregel. Die Wahl von $\mathcal{O}_{\mathrm{test}}$, Ω, Fenster T und der Kalibration/Fit-Prozedur für β_{mod} wird vor der Datensichtung festgelegt und zusammen mit Rohdaten und Auswertung veröffentlicht (vgl. Abschnitt X.7.7).

Proxy C - Nullfluss und entropische Fokussierung. Dieser Proxy adressiert den Failure-Mode, in dem Geometriesprache zwar lokal passt, aber Nullrichtungen (Front-nahe Regime) inkonsistent werden. Er koppelt deshalb einen operativen Nullfluss an eine entropische Krümmungsgröße, die aus reduzierten Zuständen geschätzt werden kann.

Definition X.4.2.3: Proxy C: QNEC-nahe Nullfluss-Bedingung (operational)

Motiv. Dieser Proxy ist *QNEC-inspiriert*: Er testet, ob Nullrichtungen (frontnahe Regime) zugleich (i) budgetseitig „nullfluss-kompatibel“ und (ii) entropisch „fokussierend“ sind. Er ist damit ein Regime-Check, keine Identität im Sinn einer strikten Feldtheorie-Axiomatik.

(i) Operativer Nullfluss (diskretisiert). Entlang einer Nullrichtung k^μ (affiner Parameter λ) betrachten wir ein dünnes Null-„Blatt“ $\mathcal{N}_{A,\Delta\lambda}$ mit Querschnittsfläche A und Dicke $\Delta\lambda$. Wir definieren den Fluss-Schätzer

$$\widehat{\mathcal{F}}_k(\lambda) = \frac{\Delta b_{\text{ext}}(\mathcal{N}_{A,\Delta\lambda})}{A\,\Delta\lambda}, \qquad \text{mit kontrolliertem Grenzregime } A \downarrow 0,\ \Delta\lambda \downarrow 0,$$

wobei $\Delta b_{\text{ext}}(\mathcal{N}_{A,\Delta\lambda})$ als *externer Budgetzufluss durch das Null-Blatt* gemäß dokumentierter Bilanzprozedur geschätzt wird.

(ii) Entropische Krümmung (diskrete zweite Ableitung). Wähle vor der Datensichtung eine verschobene Regionenfamilie $R(\lambda)$, deren Rand entlang k um λ deformiert wird, und schätze die reduzierte Entropie $S(\lambda) = S(\rho_{R(\lambda)})$ (oder eine vorab festgelegte Surrogatentropie, z. B. S_2). Dann definieren wir den Krümmungs-Schätzer

$$\widehat{S}''_k(\lambda) \;=\; \frac{S(\lambda+\Delta\lambda) - 2S(\lambda) + S(\lambda-\Delta\lambda)}{\Delta\lambda^2},$$

mit demselben $\Delta\lambda$ wie in (i).

(iii) Kalibrationskonstante κ (vorab fixiert). κ ist kalibrationsabhängig und wird aus einem separaten Kalibrationsdatensatz X_{cal} durch ein vorab festgelegtes Fit-/Fixierverfahren bestimmt. Nach Festlegung bleibt κ im Testdatensatz unverändert.

Proxy-Funktional und Pass/Fail. Für eine vorab festgelegte endliche Testmenge von Nullrichtungen/Deformationen K_{test} definieren wir

$$\mathcal{J}_{\text{QNEC}} \;:=\; \max_{k\in K_{\text{test}},\,\lambda\in\Lambda_{\text{test}}} \Big(\kappa\,\widehat{S}''_k(\lambda) - \widehat{\mathcal{F}}_k(\lambda)\Big),$$

und setzen

$$\mathbf{1}_{\text{QNEC}} = \mathbf{1}[\mathcal{J}_{\text{QNEC}} \le \delta_{*,\text{QNEC}}]\,.$$

Einordnung. Die Nullstruktur und ihre operative Verankerung über Fronten und Kegel wird in Teil V ausgeführt.[a]

[a] Siehe FBA Teil V: Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie, Kap. V.3–V.6 „Kegel, Nullrichtungen & lokale Feldtheorie“.

Dokumentationsregel. Die Wahl von K_{test}, Λ_{test}, $\Delta\lambda$, der Regionenfamilie $R(\lambda)$, der Entropie-Schätzmethode (z. B. S oder S_2) sowie des Kalibrationsprotokolls für κ wird vor der Datensichtung festgelegt und zusammen mit Rohdaten, Unsicherheiten und Auswertung veröffentlicht (vgl. Abschnitt X.7.7).

Proxy D - Mikrokausalität und Frontverträglichkeit. Selbst wenn Redshift und Stationarität passen, kann Kommutativität scheitern, wenn effektive Korrelationen raumartig „zu groß“ werden. Proxy D ist deshalb ein direkter Test, dass Front-Kalibration und No-Signalling auch in der tatsächlich implementierten Dynamik nicht verletzt werden.

Definition X.4.2.4: Proxy D: Front-/No-Signalling-Proxy (operativ)

Motiv. Mikrokausalität in der Feldtheorie ist eine Operatoraussage; operativ testbar ist jedoch primär *No-Signalling* unter raumartiger Separation. Proxy D formuliert daher ein interventionales Front-Kriterium; Korrelationsmaße dienen als Diagnose, nicht als Äquivalenz.

(i) Operationales Front-Kriterium (Intervention → keine Wirkung). Fixiere vor der Datensichtung eine endliche Testfamilie lokaler Interventionen $\mathfrak{I}_A$ in Region A (z. B. lokale CPTP-Maps oder Mess-&-Reprepare-Prozeduren) sowie eine endliche Testfamilie von Messungen in Region B, $\mathfrak{M}_B$ (z. B. POVMs mit diskretem Outcomesatz b). Für raumartige Separation $\|\Delta x\| > c\,|\Delta t|$ definieren wir das No-Signalling-Funktional

$$\mathcal{J}_{\mathrm{NS}}(\Delta x, \Delta t) = \max_{\mathcal{I}_A \in \mathfrak{I}_A,\ \mathcal{M}_B \in \mathfrak{M}_B} \big\| p(b \mid \mathcal{I}_A, \mathcal{M}_B, t + \Delta t) - p(b \mid \mathrm{id}, \mathcal{M}_B, t + \Delta t) \big\|_1,$$

wobei t die front-kalibrierte Zeitmarke des Protokolls ist.

(i') Praktischer Schätzer (Erwartungswerte als Bound, optional). Für abgeleitete Testobservablen $\mathcal{O}_B$ auf B, die aus einer Testmessung $\mathcal{M}_B$ durch feste Klassik-Postprozessierung entstehen (d. h. $\mathcal{O}_B$ entspricht einem Score $g(b)$ mit $|g(b)| \le 1$), gilt für jede feste Wahl von $\mathcal{I}_A, \mathcal{M}_B$:

$$\Big| \langle \mathcal{O}_B(t{+}\Delta t) \rangle_{\mathcal{I}_A} - \langle \mathcal{O}_B(t{+}\Delta t) \rangle_{\mathrm{id}} \Big| \;\le\; \big\| p(b \mid \mathcal{I}_A, \mathcal{M}_B, t{+}\Delta t) - p(b \mid \mathrm{id}, \mathcal{M}_B, t{+}\Delta t) \big\|_1 \;\le\; \mathcal{J}_{\mathrm{NS}}(\Delta x, \Delta t).$$

Damit ist die Erwartungswert-Differenz eine zulässige Diagnose/Schätzung, ersetzt aber nicht das primäre No-Signalling-Kriterium.

(ii) Diagnostik (verbundene Korrelationen). Zusätzlich erfassen wir ein Korrelationsmaß als schnelle Systematik- und Modell-Diagnose:

$$\mathcal{R}_{\mathrm{front}}(\Delta x, \Delta t) = \max_{\mathcal{O}_A \in \mathcal{O}^{(A)}_{\mathrm{test}},\ \mathcal{O}_B \in \mathcal{O}^{(B)}_{\mathrm{test}}} \Big| \langle \mathcal{O}_A(t)\, \mathcal{O}_B(t + \Delta t) \rangle - \langle \mathcal{O}_A(t) \rangle \langle \mathcal{O}_B(t + \Delta t) \rangle \Big|.$$

Nichtverschwindende $\mathcal{R}_{\mathrm{front}}$ ist mit No-Signalling vereinbar (Entanglement), während $\mathcal{J}_{\mathrm{NS}} > 0$ bei raumartiger Separation eine operative Frontverletzung anzeigt.

Pass/Fail (preregistered grid): Fixiere vorab ein endliches Testgitter $\mathcal{G}_{\mathrm{test}} \subset \{(\Delta x, \Delta t)\}$. Dann setzen wir

$$\mathbf{1}_{\mathrm{Front}} = \mathbf{1}\left[\max_{(\Delta x, \Delta t) \in \mathcal{G}_{\mathrm{test}}:\ \|\Delta x\| > c|\Delta t|} \mathcal{J}_{\mathrm{NS}}(\Delta x, \Delta t) \le \delta_{*,\mathrm{front}} \right].$$

($\mathcal{R}_{\mathrm{front}}$ wird als Diagnosegröße mitgeführt und berichtet.)

Quellenbasis (Import). Front-Kalibration und Kegelkausalität sind in Teil I festgelegt.[a] [b]

[a] Siehe FBA Teil I: FBA - Grundlagen, Abschnitt I.3 „Kalibration, Frontschranke & Signalfront".
[b] Siehe FBA Teil I: FBA - Grundlagen, Abschnitt I.6 „No-Signalling & lokale Operationen".

Dokumentationsregel. Die Wahl von $\mathfrak{I}_A$, $\mathfrak{M}_B$ (inkl. Outcomesatz/POVM-Spezifikation),

$\mathcal{O}^{(A)}_{\text{test}}, \mathcal{O}^{(B)}_{\text{test}}$, sowie $\mathcal{G}_{\text{test}}$ und der Toleranz $\delta_{*,\text{front}}$ wird vor der Datensichtung festgelegt und zusammen mit Rohdaten und Auswertung veröffentlicht (vgl. Abschnitt X.7.7).

X.4.3 Tomographische Checks und Kopplung H-Gates $\leftrightarrow$ Proxies

Die Proxies allein testen das Regime, nicht die korrekte Identifikation der Darstellungen. Umgekehrt wäre ein tomographisch „gut aussehendes" H wertlos, wenn das Regime die geometrischen Abkürzungen nicht trägt. Darum koppeln wir beides: H-Gate-Checks sichern die Darstellungsseite, Proxies sichern die Regime-Seite.

Formelkasten X.4.3.1: H-Gate-Checks (tomographisch/kanaltheoretisch)

(T1) Kreuzbasis-Interferenz. Führe Messungen in zwei komplementären Basen via H aus; verifiziere Isometrie durch Nähe der rekonstruierbaren Verteilungen und stabilen Tomographie-Fit (mit vorab festgelegter Metrik und Toleranz δ_*).

(T2) Budgettreue. Prüfe Invarianz der relevanten Budgetfunktionale (z. B. $\sum \delta b_{\text{int}}$) sowie DPI-Kontraktivität von $D(\cdot\|\cdot)$ (und ggf. D_α nur in Varianten, in denen DPI gilt) unter dem Darstellungswechsel $\mathsf{H} \circ \Phi \circ \mathsf{H}^{-1}$.

(T3) Lokalität. Teste $\mathsf{H}_{XY} = \mathsf{H}_X \otimes \mathsf{H}_Y$ operativ über Produktzustände, lokale Störungen und die Abwesenheit raumartiger Einflussnahme.

Bestehen die Proxies, dann ist die geometrische Auswertung in dem Sinn zulässig, dass sie die gleichen operativen Invarianten verwendet wie die Kanalrechnung. Bestehen zusätzlich die H-Gate-Checks, dann ist auch die Identifikation der Darstellungen kontrolliert. Das fasst das folgende Korollar als „praktische Kommutativität" zusammen.

Korollar X.4.3.1: Kompatibilität H-Gates $\leftrightarrow$ Proxies

Gelten die H-Gate-Bedingungen aus Definition X.4.1.1 (tomographisch validiert durch Formelkasten X.4.3.1) und

$$\mathbf{1}_{\text{Tol}} = \mathbf{1}_{\text{KMS}} = \mathbf{1}_{\text{QNEC}} = \mathbf{1}_{\text{Front}} = 1,$$

so ist die Konsistenzforderung Formelkasten X.3.3.1 operativ erfüllt: Für alle lokal implementierbaren Observablen $\mathcal{O}$ stimmen die im Rechenkalkül Kapitel X.5 berechneten Ausgaben aus Kanal- und Geometrieseite bis auf eine durch $(\delta_{*,\text{Tol}}, \delta_{*,\text{KMS}}, \delta_{*,\text{QNEC}}, \delta_{*,\text{front}})$ kontrollierte Abweichung überein.

X.4.4 Pass/Fail als Minimal-Konsistenzsatz

Der Sinn des Pass/Fail-Schemas ist nicht, „alles zu beweisen", sondern Failure-Modes zu lokalisieren: Tolman-Fehler deuten auf Geometrie-/Kalibrationsinkonsistenz, KMS/Closure auf fehlende Stationarität, QNEC-nah auf Nullrichtungsprobleme, Front-Fehler auf Mikrokausalitäts-/Frontverletzung. Genau diese Trennschärfe wird in Kapitel X.6 und X.7 genutzt, um Degeneranzen zu brechen.

Pass/Fail-Regeln (kompakt)

$$\mathbf{1}_{\mathrm{Tol}} \wedge \mathbf{1}_{\mathrm{KMS}} \wedge \mathbf{1}_{\mathrm{QNEC}} \wedge \mathbf{1}_{\mathrm{Front}} = 1$$

ist der *Minimal-Konsistenzsatz* der Brücke. Eine Verletzung identifiziert einen konkreten Failure-Mode (Geometrie/Stationarität/Nullfluss/Front) und definiert den zugehörigen Falsifikationspfad.

Ausblick. Kapitel X.5 übersetzt nun ein konkretes FBA-Setup samt H-Kalibration und Proxy-Parametern π in Observablen (Raten, Profile, Drifts) und propagiert die Unsicherheiten. Kapitel X.6 bis X.9 verwenden genau diese Struktur, um Vorhersagen zu katalogisieren und Experimente so zu priorisieren, dass die Pass/Fail-Entscheidungen möglichst eindeutig werden.

X.5 Rechenkalkül: Vom FBA-Setup zu Observablen

Ziel dieses Kapitels ist ein *operatives* Prädiktionsschema, das ein gegebenes FBA-Setup in beobachtbare Größen überführt. Kapitel X.3 liefert das Konsistenzschema (Kommutativität) zwischen Kanal- (QM) und Geo/Kegel-Seite (ART); Kapitel X.4 macht diese Kommutativität über H-Gates und Proxies überhaupt testbar. Hier wird daraus ein Rechenweg: vier Module A–D, die je nach Regime (Labor, Kegeltests, gravitative Profile, Kosmologie/TDI) konkrete Observablen, Unsicherheiten und Pass/Fail-Indikatoren liefern.

Rahmen. Wir fassen die Auswertung als Abbildung $\mathcal{P}$: FBA-Setup $\mapsto$ Observablen auf, die wahlfrei über die QM- oder die Geo/Kegel-Seite implementiert werden kann. Die Übereinstimmung der Ergebnisse folgt aus der Kommutativität in Formelkasten X.3.3.1, sofern die H-Gate- und Proxy-Bedingungen erfüllt sind (siehe Kapitel X.4) und operativ im Sinne der Brücken-Diagnose $\Delta_{\text{bridge}} \le \delta_{*,\text{bridge}}$ geprüft wird (vgl. Formelkasten X.7.2.1).

X.5.1 Prädiktionsschema und Ausgaben

Wir starten mit einer kompakten Problemformulierung: Welche Daten gelten als Eingabe, welche Größen sollen herausfallen, und welche Konsistenz wird verlangt.

Definition X.5.1.1: Prädiktionsschema $\mathcal{P}$ (Problemstellung)

Eingabe. $\mathsf{X} = (\mathcal{S}, \mathfrak{N}, \mathsf{H}, \pi, \mathsf{Cal}, \mathcal{O})$ mit $\mathcal{S}$ (Träger/Subsysteme), $\mathfrak{N}$ (Kanalnetz/GKLS-Generatoren oder Front-/Budgetdaten), H (H-Gate-Wahl), π (Proxy-Parameter), Cal (Kalibrations-/Frontprotokoll, inkl. c), $\mathcal{O}$ (Beobachtungsfrage).

Ausgabe. Observablenvektor $Y = (y_1, \ldots, y_m)$ (Raten, Profile, Drifts), Unsicherheiten ΔY, Pass/Fail-Indikatoren $\mathbf{1}_{\text{Tol}}, \mathbf{1}_{\text{KMS}}, \mathbf{1}_{\text{QNEC}}, \mathbf{1}_{\text{Front}}$ (siehe Kapitel X.4).

Anforderung (Konsistenzforderung). $\mathcal{P}_{\text{QM}}(\cdot) \overset{!}{=} \mathcal{P}_{\text{Geo}}(\cdot)$ gemäß Formelkasten X.3.3.1, operativ geprüft über $\Delta_{\text{bridge}}(\mathsf{X}) \le \delta_{*,\text{bridge}}$ (vgl. Formelkasten X.7.2.1).

X.5.2 Eingabeformat, Toleranzen und Reproduzierbarkeit

Damit die Vorhersagen später nicht an impliziten Konventionen hängen, fixieren wir ein knappes Eingabeformat. Der Punkt ist nicht Bürokratie, sondern Kontrollierbarkeit: Wenn Pass/Fail scheitert, soll klar sein, ob die Ursache in H, in einem Proxy oder in der Kalibration liegt.

Eingabeformat & Konventionen

- **Träger $\mathcal{S}$:** Liste lokaler Teilträger, Topologie der Kopplungen (Graph G).
- **Kanalnetz $\mathfrak{N}$:** Kantenbeschriftungen Φ_e (CPTP) oder Generatoren $\mathcal{L}_v$ (GKLS) mit Schrittzeiten Δt bzw. Kontinuumsparametern.[a] [b]
- **Front-/Budgetdaten:** Budget-Quadrik, Front-Protokoll, Lapse N_B, Budgetgradienten ∇B.[c] [d]
- **H-Gate H:** Kreuzbasis-Festlegung und Tomographiekanon (siehe Definition X.4.1.1 und Formelkasten X.4.3.1).
- **Proxies π:** $(\pi_{\mathrm{Tol}}, \pi_{\mathrm{KMS}}, \pi_{\mathrm{QNEC}}, \pi_{\mathrm{Front}})$ mit empirischen Toleranzen/Fehlerbändern $\delta_{*,\bullet}$ gemäß Definitionen X.4.2.1 bis X.4.2.4.
- **Kalibration Cal:** Einheitenwahl via Front, Messfenster, Bandbreiten, Referenzzustände.
- **Observablen $\mathcal{O}$:** Laborraten, Kegel-Tests, Redshift-/Lensing-Profile, kosmische Distanzen und Drifts.

[a] Siehe FBA Teil III: Quantenkinematik & CPTP-Kanäle, Kap. III.3–III.5 „Kanal- und Protokollaufbau“.
[b] Siehe FBA Teil IV: Dynamik & Messung (GKLS), Kap. IV.3–IV.6 „GKLS, Messung, Dissipation“.
[c] Siehe FBA Teil V: Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie, Kap. V.3–V.6 „Kegel, Nullrichtungen, Lokalität“.
[d] Siehe FBA Teil VI: Gravitation & Geometrie aus Budgetflüssen, Kap. VI.3–VI.5 „Geometrie-/Redshift-Proxies aus Budgetflüssen“.

X.5.3 Module A–D

Die Module sind so gewählt, dass sie unterschiedliche Datenarten direkt verarbeiten: A arbeitet in der Kanal-/POVM-Sprache, B prüft Kausalverträglichkeit über Fronten, C produziert gravitative Profile aus Budgetgrößen, D koppelt die kosmische Dynamik (inkl. TDI) an Distanzleiter und Drifts. Je nach $\mathcal{O}$ wird ein Modul allein oder mehrere in Kombination genutzt.

Modul A - Labor/QM-Seite. Von Kanälen/Generatoren zu Outcome-Verteilungen, Monotonien und Raten. Das ist die natürliche Schnittstelle für kontrollierte Experimente und die Referenz, an der sich Proxy-Interpretationen messen lassen.

Algorithmus X.5.3.1: A (Labor): CPTP/GKLS → Raten & Signaturen

Eingabe: $(\mathcal{S}, \mathfrak{N}, \mathsf{H}, \mathsf{Cal}, \mathcal{O})$.
Schritte.

1. *Einbettung:* Wähle H gemäß Definition X.4.1.1; bestimme die QM-Repräsentation via $\mathcal{Q}$ aus Definition X.3.1.1.
2. *Dynamik:* Evolve $\rho \mapsto \rho_t = \Phi_t(\rho_0)$ oder $\dot{\rho}_t = \mathcal{L}(\rho_t)$ (unselektiert).
3. *Messung:* Wähle POVM $\{E_i\}$ zu $\mathcal{O}$; berechne $p_t(i) = \mathrm{tr}[\rho_t E_i]$.
4. *Monotonien/Raten:* Berechne $D_\alpha(\rho_t \| \sigma)$ (wo die verwendete DPI-Variante gilt) und $\sigma_{\mathrm{Spohn}}(t)$ sowie daraus abgeleitete Raten/Produktionen.
5. *Unsicherheiten:* Linearisierte Propagation und Kovarianzen gemäß Formelkasten X.5.4.1; Bootstrap/MC optional.
6. *Pass/Fail:* Prüfe $\mathbf{1}_{\mathrm{KMS}}$ und $\mathbf{1}_{\mathrm{Front}}$ gemäß Definitionen X.4.2.2 und X.4.2.4; falls $\mathcal{O}$ Redshift-/Profilgrößen enthält, zusätzlich $\mathbf{1}_{\mathrm{Tol}}$ gemäß Definition X.4.2.1.

Ausgabe: $Y_{\mathrm{lab}} = \{p_t(i),\, D_\alpha(t),\, \sigma_{\mathrm{Spohn}}(t),\, \text{Raten}\}$, ΔY, Indikatoren.

Modul B - Feld/Kegel-Seite. Direkte Kausaltests und Flugzeit-/Delay-Messungen im lokalen Minkowski-Limes. Dieses Modul ist der schnellste Weg, Front- und Mikrokausalitätsverletzungen zu isolieren, bevor man Profile oder kosmische Fits interpretiert.

Algorithmus X.5.3.2: B (Feld/Kegel): Front → Kausal-Observablen

Eingabe: Front-/Budgetdaten, Cal, π_{Front}, $\mathcal{O}$.
Schritte.

1. *Kegel-Rekonstruktion:* Bestimme Lichtkegel aus Budget-Quadrik und Front-Kalibration gemäß Definition X.3.2.1.
2. *Signalpfade:* Erzeuge erlaubte Pfade γ (zeitartig/null) zwischen Quellen und Detektoren; leite ToF- und Delay-Größen ab.
3. *Front-Funktionale:* Werte das interventional definierte No-Signalling-Funktional $\mathcal{J}_{\mathrm{NS}}(\Delta x, \Delta t)$ gemäß Definition X.4.2.4 auf dem vorab festgelegten Testgitter $\mathcal{G}_{\mathrm{test}}$ aus und bestimme
$$\max_{(\Delta x, \Delta t) \in \mathcal{G}_{\mathrm{test}}:\ \|\Delta x\| > c|\Delta t|} \mathcal{J}_{\mathrm{NS}}(\Delta x, \Delta t).$$
Führe zusätzlich $\mathcal{R}_{\mathrm{front}}(\Delta x, \Delta t)$ als Diagnosegröße mit. *(Hinweis:)* Für max/sup-Schätzer ist Resampling (Bootstrap/Permutation) und eine Korrektur für die Such-/Rasterung (Multiple Testing) der robuste Default.
4. *Grenzen:* Übersetze die Schranken in Obergrenzen für supra-kausale Effektstärken und in eine experimentelle Mindestauflösung für $\delta_{*,\mathrm{front}}$ (bezogen auf $\mathcal{J}_{\mathrm{NS}}$).

Ausgabe: $Y_{\mathrm{cone}} = \{\mathrm{ToF},\, \mathcal{J}_{\mathrm{NS}},\, \mathcal{R}_{\mathrm{front}},\, \text{Kegelgrenzen}\}$, ΔY, $\mathbf{1}_{\mathrm{Front}}$.

Modul C - Grav/Geometrie-Proxies. Redshift-, Temperatur- und Lensing-Profile aus Budgetgradienten. Dieses Modul ist dort sinnvoll, wo die Daten bereits als Profilverläufe vorliegen und die Frage ist, ob sie als budgetinduzierte Geometrie konsistent lesbar sind.

Algorithmus X.5.3.3: C (Grav/Geo): Proxy-Map → Redshift/Lensing

Eingabe: $N_B(x)$, ∇B, Geometriekonturen, $\pi_{\mathrm{Tol}}, \pi_{\mathrm{KMS}}$, $\mathcal{O}$.
Schritte.

1. *Nullgeodäten/Strahlen:* Integriere Strahlen auf Basis der Kegelstruktur (lokaler Minkowski-Limes).
2. *Redshift (Konvention wie Proxy A):* Verwende

$$\frac{\nu_{\mathrm{obs}}}{\nu_{\mathrm{emit}}} = \frac{N_B(x_{\mathrm{obs}})}{N_B(x_{\mathrm{emit}})} \quad \Longleftrightarrow \quad 1 + z_B = \frac{\nu_{\mathrm{emit}}}{\nu_{\mathrm{obs}}} = \frac{N_B(x_{\mathrm{emit}})}{N_B(x_{\mathrm{obs}})},$$

   und verifiziere den Tolman-Test über $\mathcal{J}_{\mathrm{Tol}}$ aus Definition X.4.2.1.
3. *Temperaturprofil:* Falls stationär, evaluiere $T(x)\, N_B(x) = \mathrm{const.}$ als Proxy-Ausgabe (zusammen mit $\mathbf{1}_{\mathrm{KMS}}$).
4. *Lensing/Deflektion:* Berechne $\hat{\alpha} \approx \int \nabla_{\perp} \ln N_B\, ds$ (schwaches Feld).
5. *Shapiro-/Budget-Delay:* $\Delta t_B = \int (N_B^{-1} - 1)\, ds$.
6. *Stationaritätscheck:* Prüfe KMS-Nähe und Closure gemäß Definition X.4.2.2.

Ausgabe: $Y_{\mathrm{geo}} = \{z_B(x),\, T(x),\, \hat{\alpha},\, \Delta t_B\}$, ΔY, $\mathbf{1}_{\mathrm{Tol}}, \mathbf{1}_{\mathrm{KMS}}$.

Modul D - Kosmologie/TDI. Dieses Modul implementiert die in Teil IX fixierte Trennung der Kanäle: *Distanzen* werden kinematisch über FRW-Größen $(a(t), H(t))$ im front-kalibrierten t ausgewertet, während der TDI-Faktor $\chi(t) = d\tau_{\mathrm{geo}}/dt \in (0, 1]$ *ausschließlich* in *Zeitobservablen* (Chronometer, Redshift-Drift, Lichtkurven-Dilatation, Altersintegrale) eintritt. Damit entstehen überbestimmte Nulltests durch Distanzkanal $\oplus$ Zeitkanäle.[18]

[18] Siehe FBA Teil IX: Kosmische Dynamik, Time Dilation & Inflation (TDI), Kap. IX.2–IX.7 „Distanzkanal, Zeitkanäle, TDI-Nulltests“.

Algorithmus X.5.3.4: D (Kosmologie/TDI): Distanzkanal $\oplus$ Zeitkanäle $\rightarrow$ $H_{\text{dist}}(z)$, $\chi(z)$, $dz/d\tau_{\text{geo},0}$, $R_{\text{SN}}(z)$

Eingabe: Distanzdaten (Kerzen/Sirenen/BAO) für $d_L(z)$ bzw. $D_M(z)$, Chronometerdaten $dz/d\tau_{\text{geo}}$, Driftdaten $dz/d\tau_{\text{geo},0}$, optional SN-Stretchdaten $\Delta\tau_{\text{geo,obs}}$ vs. $\Delta\tau_{\text{geo,em}}$, Kalibration Cal (inkl. c, H_0, Krümmung k im gewählten Konventionsschema), Proxy-/Systematikparameter in π.

Schritte.

1. *FRW-Rotverschiebung (geometrisch):*

$$1 + z := \frac{a(t_0)}{a(t_{\text{em}})} \quad \text{(Standard: } a(t_0) = 1\text{).}$$

2. *Distanzkanal $\Rightarrow H_{\text{dist}}(z)$:* Rekonstruiere $H_{\text{dist}}(z)$ aus Distanzen (glätten/fitten vor Differentiation als Default). Flach:

$$H_{\text{dist}}(z) = \frac{c}{\dfrac{d}{dz}\left(\dfrac{d_L(z)}{1+z}\right)}.$$

Mit Krümmung (in der hier verwendeten k-Konvention):

$$D_M(z) := \frac{d_L(z)}{1+z}, \qquad H_{\text{dist}}(z) = c\,\frac{\sqrt{1 - k\,D_M(z)^2}}{\dfrac{d}{dz}\left(\dfrac{d_L(z)}{1+z}\right)}.$$

3. *Chronometerkanal $\Rightarrow H_{\text{CC}}(z)$:* Chronometer messen τ_{geo}:

$$H_{\text{CC}}(z) := -\frac{1}{1+z}\frac{dz}{d\tau_{\text{geo}}}.$$

4. *χ-Schätzer (Überbestimmung):* Aus der Teil-IX-Identität $H(z) = \chi(z)\,H_{\text{CC}}(z)$ folgt der Schätzer

$$\widehat{\chi}(z) = \frac{H_{\text{dist}}(z)}{H_{\text{CC}}(z)}.$$

5. *Redshift-Drift (Zeitkanal bei t_0):* Vorhersage für die pro $\tau_{\text{geo},0}$ beobachtete Drift

$$\frac{dz}{d\tau_{\text{geo},0}} = \chi_0^{-1}\Big[(1+z)H_0 - H_{\text{dist}}(z)\Big], \qquad \chi_0 := \chi(t_0),$$

und daraus $\widehat{\chi}_0(z)$ als (idealerweise) z-unabhängiger Konsistenzcheck.

6. *SN-Lichtkurven-Dilatation (Zeitkanal):*

$$R_{\text{SN}}(z) = \frac{\Delta\tau_{\text{geo,obs}}}{(1+z)\Delta\tau_{\text{geo,em}}} = \frac{\chi_0}{\chi(z)}.$$

7. *Nulltests/Residuen:* Formuliere kanalweise Residuen (Drift–Distanz, Chronometer–Distanz, SN–Chronometer) und Schrankenchecks $0 < \chi \le 1$ sowie $\tau_{\text{geo}}(z) \le t(z)$ gemäß Teil IX; nutze diese als Pass/Fail-Entscheidung und Failure-Mode-Diagnostik.

Ausgabe: $Y_{\text{cosmo}} = \{H_{\text{dist}}(z), H_{\text{CC}}(z), \widehat{\chi}(z), dz/d\tau_{\text{geo},0}, R_{\text{SN}}(z), \text{Residuen/Nulltests}\}$, ΔY, Pass/Fail gemäß Proxy- und Schrankenprüfungen.

X.5.4 Unsicherheiten und Skalenbehandlung

Damit Pass/Fail nicht an uneinheitlicher Fehlerrechnung hängt, nutzen alle Module ein gemeinsames Unsicherheitsschema. Skalenabhängigkeiten von Proxy-Parametern werden nur so weit eingeführt, wie sie für robuste Fehlerbänder und für die Vergleichbarkeit zwischen Regimen nötig sind.

Formelkasten X.5.4.1: Unsicherheiten & RG-Propagation (einheitliches Schema)

Ziel. Wir behandeln Unsicherheiten in allen Modulen mit demselben Minimal-Standard: (i) lokale Fehlerfortpflanzung, (ii) konsistente Behandlung von Nuisance-Parametern, (iii) optionale Skalenabhängigkeit der Proxy-Parameter, (iv) numerische Diagnose der Brücken-Kohärenz.

Fehlerfortpflanzung (lokal). Sei $Y = f(X)$ mit $X = (\theta, \pi, \mathsf{Cal})$. Für kleine Schwankungen gilt mit $J_X = \partial f/\partial X$

$$\Delta Y \approx J_X\, \Delta X, \qquad \mathrm{Cov}(Y) \approx J_X\, \mathrm{Cov}(X)\, J_X^\top.$$

Profiling oder Marginalisierung. Seien $n \subset X$ Nuisance-Parameter und D die Daten. Dann verwenden wir entweder

$$\widehat{n} = \arg\max_n \mathcal{L}(\mathsf{D} \mid X), \qquad \widehat{Y} = f(\theta, \pi, \mathsf{Cal}, \widehat{n}) \quad \text{(Profiling)}$$

oder

$$p(Y \mid \theta, \pi, \mathsf{Cal}) = \int p\big(Y \mid X\big)\, p(n)\, dn \quad \text{(Bayes-Marginalisierung).}$$

Skalenfluss der Proxies. Für skalenabhängige Proxy-Parameter $\pi(\mu)$ mit

$$\frac{d\pi}{d\ln\mu} = \beta(\pi)$$

ergibt sich in erster Ordnung um μ_0

$$\pi(\mu) \approx \pi(\mu_0) + \beta\big(\pi(\mu_0)\big)\, \ln\frac{\mu}{\mu_0}.$$

Ist β um $\pi(\mu_0)$ linearisiert mit $B = \frac{\partial\beta}{\partial\pi}\Big|_{\mu_0}$, so folgt die geschlossene Näherung

$$\pi(\mu) \approx \pi(\mu_0) + \Big(\mathrm{e}^{B\ln(\mu/\mu_0)} - \mathbb{I}\Big)\, B^{-1}\beta\big(\pi(\mu_0)\big).$$

(Hintergrund: Teil VII.)[a]

Konsistenzdiagnose. Als praktische Konsistenzdiagnose prüfen wir numerisch

$$\Delta_{\text{bridge}}(\mathsf{X}) \le \delta_{*,\text{bridge}},$$

wobei Δ_{bridge} das kovarianzgewichtete Brücken-Residual gemäß Formelkasten X.7.2.1 ist. Verletzungen bei erfüllten Voraussetzungen interpretieren wir als Hinweis auf H-Gate- oder Proxy-Inkompatibilitäten im Sinne von Korollar X.4.3.1.

Extremwert-/sup-Funktionale (praktischer Default). Für Testgrößen vom Typ sup / max (z. B. Front- oder No-Signalling-Funktionale über Suchraster) sind Normalapproximationen im Allgemeinen nicht robust. Als Default verwenden wir Resampling (Bootstrap/Permutation) und kalibrieren die Schwellen unter Berücksichtigung der Rasterung (Multiple-Testing/Look-Elsewhere-Effekt).

[a] Siehe FBA Teil VII: Konstanten, Skalen & Renormierung, Kap. VII.2–VII.5 „Skalenfenster, RG, Kalibration".

X.5.5 Kohärenz und Modulkopplung

Die Module sind bewusst redundant genug, um Degeneranzen zu brechen: Wenn Profile (C) „passen", Kegeltests (B) aber scheitern, ist die Ursache nicht eine freie Fit-Wahl, sondern eine Frontinkonsistenz. Wenn Labor-Monotonien (A) stationär wirken, KMS/Closure (B) aber scheitert, liegt kein echtes stationäres Regime vor. Diese Logik wird im folgenden Kohärenzsatz als Minimalforderung zusammengefasst.

Korollar X.5.5.1: Kohärenzsatz des Rechenkalküls

Unter den Bedingungen

$$\mathbf{1}_{\mathrm{Tol}} = \mathbf{1}_{\mathrm{KMS}} = \mathbf{1}_{\mathrm{QNEC}} = \mathbf{1}_{\mathrm{Front}} = 1$$

(siehe Kapitel X.4) liefern die Module A–D konsistente Vorhersagen auf beiden Brückenseiten. Operativ heißt das: Das Kommutativitätsdiagramm Formelkasten X.3.3.1 besteht im Sinne der Brücken-Diagnose, d. h.

$$\Delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X}) \leq \delta_{*,\mathrm{bridge}}$$

mit Δ_{bridge} gemäß Formelkasten X.7.2.1 (und der dort festgelegten Kovarianz $\Sigma(\mathsf{X})$).

Umsetzungsleitfaden (praktisch)

Für Laboraufbauten empfiehlt sich die Reihenfolge A→B (Kegelkonstanz), optional C (Redshift-/Temperatur-Proxy). In astrophysikalischen Anwendungen startet man typischerweise mit C (Profile), prüft B (Front) und nutzt A zur Kanalinterpretation, wo kalibrierte Quantenverteilungen verfügbar sind. Kosmologisch liefert D die übergeordnete Distanz- und Driftstruktur, die mit C und B lokal konsistent sein muss, wenn die Brücke operativ gelten soll.

X.6 Vorhersagen (Katalog, gruppiert)

Dieses Kapitel bündelt *konkrete, falsifizierbare* Vorhersagen des FBA-Programms, geordnet nach Labor/Metrologie, Orbit/Astrophysik und Kosmologie/TDI. Jeder Block beginnt mit einem kurzen Rahmen und enthält präzise Boxen mit messbaren Funktionalen, erwarteten Beziehungen und Pass/Fail-Kriterien. Die Auswertung erfolgt über den Rechenkalkül in Kapitel X.5; Konsistenz mit der Brücke aus Kapitel X.3 setzt die H-Gate- und Proxy-Bedingungen aus Kapitel X.4 voraus.

X.6.1 Labor & Metrologie

Rahmen. Kanäle und GKLS-Generatoren sind hier primäre Eingaben. Gemessen werden Outcome-Verteilungen, informationsbasierte Monotone und Budget-Raten unter wohldefinierter Kalibration und Front-Kontrolle. Die Tests sind so formuliert, dass sie ohne Modell-Fit als Pass/Fail funktionieren und dadurch die „zulässige Prozessklasse" praktisch absichern.[19] [20]

Formelkasten X.6.1.1: L1 - DPI/No-Recovery als kanonische Monotonie-Schranke

Sei D_α eine *DPI-monotone* Informationsdivergenz (z. B. relative Entropie D, oder eine vorab festgelegte DPI-Variante D_α). Für jede unselektierte GKLS-Evolution Φ_t und jede Referenz σ gilt

$$D_\alpha(\Phi_t(\rho) \,\|\, \Phi_t(\sigma)) \;\leq\; D_\alpha(\rho\|\sigma).$$

Ist σ stationär (im verwendeten GKLS-Regime), so ist zudem

$$\sigma_{\mathrm{Spohn}}(t) \equiv -\frac{d}{dt} D(\Phi_t(\rho)\|\sigma) \geq 0 \quad \text{(wo definiert)}.$$

Test. Rekonstruiere D_α aus Tomographie (Rechenkalkül Kapitel X.5, Modul A Algorithmus X.5.3.1) an zwei Zeitpunkten $t_1 < t_2$.
Pass/Fail: $\mathbf{1}_{\mathrm{lab,DPI}} = \mathbf{1}[D_\alpha(t_2) \leq D_\alpha(t_1) + \delta_{*,\mathrm{DPI}}]$.

Messstrategie. Geeignet sind Ein- oder Zweiqubit-Kanäle mit wohldefinierter Referenz σ. Wichtig ist eine *unselektierte* Datenauswertung, damit Post-Selection-Gewinne als Scheinkompatibilität ausgeschlossen sind. Genau hier schließt L1 an die Brückendiagnose aus Lemma X.3.4.1 an.

[19] Siehe FBA Teil III: Quantenkinematik & CPTP-Kanäle, Kap. III.3–III.5 „CPTP/Instrumente/Protokolle".
[20] Siehe FBA Teil IV: Dynamik & Messung (GKLS), Kap. IV.3–IV.6 „GKLS, Messung, Dissipation".

Formelkasten X.6.1.2: L2 - GKLS-Strukturtest & irreversible Budget-Raten

Sei $\mathcal{L}$ lokal implementiert und im gewählten Effektivregime als GKLS-Generator parametrisiert. Dann sind die dissipativen (Kossakowski-)Blöcke positiv semidefinit (bis auf Rekonstruktionsfehler), und die *irreversible* Budgetrate erfüllt

$$\dot{A}(t) \geq 0 \quad \text{(im unselektierten, kalibrierten Regime).}$$

Test. Identifiziere $\mathcal{L}$ aus Prozess-Tomographie; prüfe PSD der dissipativen Blöcke bis auf Toleranz $\delta_{*,\mathrm{PSD}}$ und schätze $\dot{A}(t)$ über die vorab festgelegte Kalibration/Zuordnung (z. B. via $\sigma_{\mathrm{Spohn}}(t)$ in einem stationären/isothermen Protokoll).
Pass/Fail: $\mathbf{1}_{\mathrm{lab,GKLS}} = \mathbf{1}[\text{PSD bis } \delta_{*,\mathrm{PSD}} \ \wedge \ \dot{A}(t) \geq -\delta_{*,\mathrm{irr}}]$.

Interpretation. L2 ist ein Strukturtest mit Prozessbindung: Ein Fail kann nicht durch „bessere Fits“ kaschiert werden, sondern weist entweder auf eine Verletzung der lokalen GKLS-Struktur oder auf eine inkonsistente Implementierung/Kalibration hin.

Formelkasten X.6.1.3: L3 - Landauer-Kalibration (Budget $\leftrightarrow$ Entropiekosten)

Für eine logisch irreversible Operation mit Entropieänderung ΔS gilt im kalibrierten Protokoll ein Budget-Workbound

$$\Delta b_{\mathrm{irr}} \ \geq \ \Theta\, \Delta S,$$

wobei Θ durch Kalibration (Front- und Temperatur-Protokoll) festgelegt wird.[a]
Test. Reset-Experimente mit variierter ΔS; Regression von Δb_{irr} gegen ΔS unter vorab fixierter Auswertung (keine Post-Selection).
Pass/Fail: $\mathbf{1}_{\mathrm{lab,Landauer}} = \mathbf{1}[\Delta b_{\mathrm{irr}} - \Theta \Delta S \geq -\delta_{*,\mathrm{Lan}}]$.

[a]Siehe FBA Teil I: FBA - Grundlagen, Abschnitt I.3–I.5 „Kalibration, Budgetbilanz, zulässige Dynamik“.

Bemerkung. Θ ist hier kein freier Fit-Parameter, sondern der metrologische Koppler zwischen Informations- und Budget-Beschreibung. Gerade deshalb ist L3 ein harter Test, der nicht durch Reparametrisierung absorbiert werden kann.[21]

Formelkasten X.6.1.4: L4 - Pfad- und Sagnac-Signaturen (Rotation/Beschleunigung)

Für zwei Pfade $\Gamma_\pm$ in einem rotierenden Interferometer ergibt sich ein front-kalibrierter Zeitversatz

$$\Delta t_{\mathrm{Sag}} \approx \frac{4\,\Omega\,\mathcal{A}}{c^2},$$

mit Rotationsrate Ω und von den Pfaden eingeschlossener Fläche $\mathcal{A}$.
Test. Vergleich der Interferenzphasen (linear in Δt_{Sag}).
Pass/Fail: $\mathbf{1}_{\mathrm{lab,Sagnac}} = \mathbf{1}[|\widehat{\Delta t} - \frac{4\Omega\mathcal{A}}{c^2}| \leq \delta_{*,\mathrm{Sag}}]$.

[21]Siehe FBA Teil VIII: Klassischer Limes, Thermodynamik & Altern, Kap. VIII.3–VIII.6 „Stationarität, Thermik, klassische Regime“.

Schluss Labor. L1–L4 bilden zusammen einen robusten Labor-Prüfstand: Monotonie (L1), Dynamikstruktur (L2), thermodynamische Kopplung (L3) und inertiale Zeitversätze (L4). In Kombination liefern sie eine saubere Diagnose, ob ein Setup überhaupt im zulässigen Regime der Brücke arbeitet, bevor Profile oder kosmische Fits interpretiert werden.

X.6.2 Orbit & Astrophysik

Rahmen. Stationäre oder quasistationäre Konfigurationen erlauben Redshift- und Temperaturprofile, Delays und Timing-Residuen. Hier werden vor allem Proxy A/B/D aus Kapitel X.4 relevant: Tolman-Profile liefern einen Skalen-/Regimecheck für N_B, KMS/Closure kontrolliert die Stationaritätsannahme, Front-Tests schließen supra-kausale „Shortcuts" aus. Wir beginnen deshalb mit Profilen (A1) und binden anschließend Pfad-Observablen ein, die die N_B-Struktur integrativ testen. Die strikte Trennung von Rekonstruktion (Kalibration/Inference) und Out-of-sample-Test gehört operativ in die Protokolle (vgl. Kapitel X.7).

Formelkasten X.6.2.1: A1 - Tolman-Profile (stationäre Felder)

Mit budgetinduzierter Lapse-Funktion $N_B(x) > 0$ gilt (stationär) die Redshift-Konvention aus Proxy A:

$$\frac{\nu_{\text{obs}}}{\nu_{\text{emit}}} = \frac{N_B(x_{\text{obs}})}{N_B(x_{\text{emit}})} \qquad \Longleftrightarrow \qquad 1 + z_B = \frac{\nu_{\text{emit}}}{\nu_{\text{obs}}} = \frac{N_B(x_{\text{emit}})}{N_B(x_{\text{obs}})},$$

und zusätzlich

$$T(x)\, N_B(x) = \text{const.}$$

Test. Linienfrequenzen und Temperaturen zwischen zwei Niveaus $x_{\text{emit}}, x_{\text{obs}}$.
Pass/Fail. $\mathbf{1}_{\text{Tol}}$ gemäß Definition X.4.2.1 und Stationarität/Closure gemäß Definition X.4.2.2.

Anwendung. Spektroskopie in tiefen Potentialen (weiße Zwerge, Neutronensterne) und Temperaturgradienten in Akkretionsscheiben sind geeignete Testfelder.[22]

Formelkasten X.6.2.2: A2 - Shapiro- bzw. Budget-Delay auf Strahlenpfaden

Für eine Nullstrahlgeometrie liefert der FBA-Delay

$$\Delta t_B = \int_\gamma (N_B^{-1} - 1)\, ds.$$

Test. Zeitverzögerungen bei Echos oder Okklusionen; Vergleich mit Bahnparametern und einem aus Profilen (A1, möglichst disjunkte Daten) oder unabhängig geschätzten N_B.
Pass/Fail: $\mathbf{1}_{\text{astro,Delay}} = \mathbf{1}[|\widehat{\Delta t} - \Delta t_B| \le \delta_{*,\text{Del}}]$.

Brücke zu A1. A2 ist der Pfadtest zu A1: Ein konsistentes N_B muss zugleich Profile und Delays erklären. Auseinanderlaufen der beiden Diagnosen lokalisiert entweder Geometriefehler (falsches N_B) oder Kalibrations- bzw. Frontprobleme (inkonsistente Kegelstruktur).

[22] Siehe FBA Teil VI: Gravitation & Geometrie aus Budgetflüssen, Kap. VI.3–VI.5 „Redshift-/Temperatur-Proxies aus Budgetflüssen".

Formelkasten X.6.2.3: A3 - Pulsar-Timing-Budget (Timing-Residuen)

Für eine Quelle mit intrinsischer Periode P erzeugt ein Pfad $x(t)$ den Residuenprozess

$$R(t) = \int_0^t \left(\frac{1}{N_B(x(t'))} - 1 \right) \frac{dt'}{P}.$$

Test. Vergleich von $R(t)$ gegen Timing-Residuen mit N_B-Vorhersage (aus A1 oder unabhängig), gekoppelt an $\mathbf{1}_{\mathrm{Tol}}$ aus Definition X.4.2.1.
Pass/Fail: $\mathbf{1}_{\mathrm{astro,PTA}} = \mathbf{1}[\|R_{\mathrm{obs}} - R_{\mathrm{mod}}\| \le \delta_{*,\mathrm{PTA}}]$.

Bemerkung. PTA-Signale koppeln integrativ an N_B und sind daher besonders sensitiv auf großskalige Gradienten und Stau-Fronten. Gerade diese Integrationssensitivität macht A3 zu einem Degeneracy-Breaker gegenüber rein lokalen Profiltests.

Formelkasten X.6.2.4: A4 - KMS-Nähe an Horizont- und Stau-Fronten (Proxy-Test)

Sei $\kappa_B \equiv \frac{d}{d\lambda} \ln N_B$ entlang einer Nullgenerator-Parameterisierung λ. Als *Proxy-Erwartung* (nicht als Identität) dient: In Front-/Horizontnähe kann eine modulare Skala $\beta_{\mathrm{mod}}^{-1} \propto \kappa_B$ auftreten und sich als KMS-Nähe der Zwei-Punkt-Funktionen im Sinne von Definition X.4.2.2 manifestieren.
Test. Spektren und Autokorrelationen in Front- und Horizontnähe; prüfe $\mathbf{1}_{\mathrm{KMS}}$ und Budget-Closure gemäß Definition X.4.2.2.

Schluss Astrophysik. A1 liefert den Skalen-/Regimecheck für N_B, A2 und A3 sind Pfad- bzw. Timingtests derselben Struktur, A4 kontrolliert die Stationaritätsannahme. Ein gemeinsames Fail isoliert Front- oder Stationaritätsbrüche, statt nur „ungeeignete Modelle“ zu markieren.

X.6.3 Kosmologie & TDI

Rahmen. Im kosmischen Regime gelten zwei getrennte Beobachtungskanäle: (1) der *Distanzkanal* (Standardkerzen/-sirenen, BAO/Lensing) liefert kinematische Information über $H(z)$ via Distanzen, (2) die *Zeitkanäle* (Chronometer, Redshift-Drift, SN-Lichtkurven-Dilatation, Altersintegrale) messen τ_{geo} und damit den TDI-Faktor $\chi(t) = d\tau_{\mathrm{geo}}/dt \in (0,1]$. Der Kern ist Überbestimmung: χ wird nicht „gefittet“, sondern aus Kanal-Kreuzvergleichen geschätzt; Nulltests/Residuen liefern Pass/Fail.[23] Die zugehörige operative Auswertung erfolgt über Modul D des Rechenkalküls Algorithmus X.5.3.4.

[23]Siehe FBA Teil IX: Kosmische Dynamik, Time Dilation & Inflation (TDI), Kap. IX.2–IX.7 „Distanzkanal, Zeitkanäle, TDI-Nulltests“.

Formelkasten X.6.3.1: C1 - Distanzkanal: $H_{\mathrm{dist}}(z)$ aus Distanzen (kinematisch)

Aus Distanzen lässt sich $H(z)$ kinematisch rekonstruieren, ohne Feldgleichungen zu verwenden. Im flachen Fall gilt

$$H_{\mathrm{dist}}(z) = \frac{c}{\frac{d}{dz}\left(\frac{d_L(z)}{1+z}\right)}.$$

Mit Krümmung (in der verwendeten k-Konvention) gilt

$$D_M(z) := \frac{d_L(z)}{1+z}, \qquad H_{\mathrm{dist}}(z) = c\,\frac{\sqrt{1-k\,D_M(z)^2}}{\frac{d}{dz}\left(\frac{d_L(z)}{1+z}\right)}.$$

Test (robuster Default). Glätte/fitte $d_L(z)$ vor der Differentiation; prüfe Konsistenz verschiedener Distanztracer (Kerzen vs. Sirenen) im out-of-sample-Sinn.
Pass/Fail: $\mathbf{1}_{\mathrm{cosmo,dist}} = \mathbf{1}[\|H_{\mathrm{dist},1} - H_{\mathrm{dist},2}\| \le \delta_{*,\mathrm{dist}}]$ auf einem vorab fixierten Rotverschiebungsraster.

Formelkasten X.6.3.2: C2 - Zeitkanal: Chronometer-Skalierung und $\chi(z)$-Schätzer

Chronometer messen τ_{geo} und damit

$$H_{\mathrm{CC}}(z) := -\frac{1}{1+z}\frac{dz}{d\tau_{\mathrm{geo}}}.$$

Die Teil-IX-Identität verbindet beide Kanäle:

$$H(z) = \chi(z)\,H_{\mathrm{CC}}(z) \quad\Longrightarrow\quad \widehat{\chi}(z) = \frac{H_{\mathrm{dist}}(z)}{H_{\mathrm{CC}}(z)}.$$

Test. Schätze $H_{\mathrm{CC}}(z)$ aus Chronometerdaten und $\widehat{\chi}(z)$ aus Distanz$\oplus$Chronometer.
Pass/Fail (Schranken & Trends).

$$\mathbf{1}_{\mathrm{cosmo},\chi} = \mathbf{1}[0 < \widehat{\chi}(z) \le 1 \ \ \text{(bis auf Fehlerbänder } \delta_*\text{)}]\,,$$

zusätzlich Konsistenz/Glattheit von $\widehat{\chi}(z)$ unter vorab fixierter Regularisierung.

Formelkasten X.6.3.3: C3 - Überbestimmung: Drift, SN-Dilatation und Nulltests (Residuen)

Drift (Zeitkanal bei t_0). Die pro $\tau_{\rm geo,0}$ beobachtete Drift erfüllt

$$\frac{dz}{d\tau_{\rm geo,0}} = \chi_0^{-1}\Big[(1+z)H_0 - H_{\rm dist}(z)\Big], \qquad \chi_0 := \chi(t_0).$$

SN-Lichtkurven-Dilatation (Zeitkanal).

$$R_{\rm SN}(z) = \frac{\Delta\tau_{\rm geo,obs}}{(1+z)\Delta\tau_{\rm geo,em}} = \frac{\chi_0}{\chi(z)}.$$

Nulltests (kanalweise Konsistenz). Definiere Residuen (auf vorab fixiertem Raster) durch

$$\Delta_{\rm DR}(z) := H_{\rm dist}(z) - \Big((1+z)H_0 - \chi_0\,\frac{dz}{d\tau_{\rm geo,0}}\Big),$$

$$\Delta_{\rm CC}(z) := H_{\rm dist}(z) - \chi(z)\,H_{\rm CC}(z), \qquad \Delta_{\rm SNCC}(z) := H_{\rm dist}(z) - \frac{\chi_0}{R_{\rm SN}(z)}\,H_{\rm CC}(z).$$

Pass/Fail:

$$\mathbf{1}_{\rm cosmo,null} = \mathbf{1}[\max(\|\Delta_{\rm DR}\|, \|\Delta_{\rm CC}\|, \|\Delta_{\rm SNCC}\|) \le \delta_{*,\rm null}]\,,$$

zusätzlich Schrankenchecks (insbes. $0 < \chi \le 1$ und $\tau_{\rm geo}(z) \le t(z)$ im Teil-IX-Sinn).

Schluss Kosmologie. C1 liefert den Distanzkanal, C2 schätzt $\chi(z)$ aus Distanz$\oplus$Chronometer, C3 ist der Degeneracy-Breaker über Drift und SN-Dilatation. Ein Fail in den Nulltests ist besonders aussagekräftig, weil er nicht durch reine Profilanpassungen im Distanzkanal absorbiert werden kann, sondern explizit die Kanaltrennung (Distanz vs. Zeit) verletzt.

X.6.4 Verknüpfung und Kurzüberblick

Verknüpfung & Degeneracy-Breaker. Die Labor-Tests (L1–L4) fixieren die zulässige Kanalphysik und Kalibrationskopplungen; Orbit-Tests (A1–A4) mappen Budgetgradienten und Stationaritätsannahmen; kosmologische Tests (C1–C3) prüfen den Kanalvergleich Distanz $\oplus$ Zeit und damit χ über überbestimmte Nulltests. Orthogonale Observablen (Drift, KMS-Nähe, Front-Unterdrückung) dienen als Degeneracy-Breaker zwischen konkurrierenden Fits.

Katalog - Kurzüberblick & Zuordnung

- **Labor (L1–L4):** DPI/Spohn (L1), GKLS-Struktur und irreversible Raten (L2), Landauer-Kalibration (L3), Sagnac-Zeitversatz (L4).
- **Astro (A1–A4):** Tolman-Profile (A1), Shapiro- bzw. Budget-Delay (A2), Pulsar-Residuen (A3), KMS-Nähe an Fronten/Horizonten (A4).
- **Kosmo (C1–C3):** Distanzkanal $H_{\mathrm{dist}}(z)$ (C1), Chronometer-Skalierung $\widehat{\chi}(z)$ (C2), Drift/SN-Dilatation und Nulltests/Residuen (C3).

Auswertung. Implementiere den Rechenkalkül Kapitel X.5 und nutze die Module A–D (Algorithmen X.5.3.1 bis X.5.3.4); dokumentiere die Proxy-Indikatoren $\mathbf{1}_{\mathrm{Tol}}, \mathbf{1}_{\mathrm{KMS}}, \mathbf{1}_{\mathrm{QNEC}}, \mathbf{1}_{\mathrm{Front}}$ (Definitionen in Kapitel X.4) je Messreihe als Teil der Pass/Fail-Auswertung.

X.7 Falsifizierbarkeit & Experimente

Dieses Kapitel übersetzt die Brücke aus Kapitel X.3, die H-Gates und Proxies aus Kapitel X.4 und das Rechenkalkül aus Kapitel X.5 in *konkrete* Falsifikations- und Experimentierschemata. Leitidee: Jede Aussage wird als binärer, lokal auswertbarer Test formuliert; mehrere Tests werden so kombiniert, dass sie Degeneranzen brechen, statt sie durch Modell-Fits zu verdecken. Der Vorhersagekatalog aus Kapitel X.6 liefert die Zielgrößen, hier geht es um Protokolle und Entscheidungslogik.

Prinzip. Falsifizierbarkeit bedeutet hier nicht „Parameter ausschließen", sondern eine klare Operation: Bei erfüllten Schnittstellenbedingungen (Kalibration/Front, H-Tomographie, Proxy-Regime) liefert ein messbares Funktional ein Nichtbestehen. Damit die Tests nicht in Zirkelschlüssen enden, wird zuerst festgelegt, was als erfüllt gilt, und erst danach wird entschieden. Wo Rekonstruktionen (z. B. N_B oder H_{dist}) als Zwischenschritt benötigt werden, werden Kalibration/Inference und anschließende Out-of-sample-Prüfung explizit getrennt.

X.7.1 Pass/Fail-Semantik

Wir beginnen mit der allgemeinen Semantik, weil alle späteren Protokolle nur Varianten desselben Entscheidungsschemas sind.

Definition X.7.1.1: Falsifizierbarkeit (Pass/Fail-Semantik)

Ein FBA-Test ist ein Tripel $(\mathcal{O}, \mathcal{J}, \delta_*)$ aus Beobachtungsfrage $\mathcal{O}$, Funktional $\mathcal{J}$ (aus Kapitel X.4 und X.5) und empirischer Toleranz $\delta_* > 0$. Die *Entscheidung* ist $\mathbf{1}[\mathcal{J} \leq \delta_*] \in \{0, 1\}$.

Skalarisierung. $\mathcal{J}$ ist entweder (i) skalar, oder (ii) vektorwertig und wird durch eine vorab festgelegte Skalarisierung testbar gemacht (z. B. $\|\cdot\|_{\Sigma^+}$ wie in Formelkasten X.7.2.1 oder eine max-/sup-Aggregation mit eigener Schwellenkalibration).

Voraussetzungen. Zu jedem Test gehört ein (vorab fixiertes) Bündel von Voraussetzungskriterien $\mathbf{1}_{\mathrm{pre}} \in \{0, 1\}$, das Eingabekonventionen und Schnittstellenbedingungen abdeckt (insb. Kalibration/Front, H-Gate-Validierung, Proxy-Regime; vgl. Kapitel X.4). Operativ kann man $\mathbf{1}_{\mathrm{pre}}$ als Konjunktion dokumentieren, z. B.

$$\mathbf{1}_{\mathrm{pre}} = \mathbf{1}_{\mathrm{Cal}} \wedge \mathbf{1}_{\mathrm{Hgate}} \wedge \mathbf{1}_{\mathrm{Proxy}} \wedge \mathbf{1}_{\mathrm{Data}},$$

wobei $\mathbf{1}_{\mathrm{Data}}$ u. a. Unselektiertheit (Labor) bzw. Stationarität/Path-Definition (Astro/-Kosmo) umfasst. Für Funktionale vom Typ sup / max gehört zur Voraussetzung außerdem eine robuste Schwellenkalibration (Resampling/Multiple-Testing, siehe Abschnitt X.7.4).

Falsifikation (domänenlokal). Ein Programmteil (Brücke, Proxy-Familie oder Auswertemodul) ist in einer Domäne *falsifiziert*, wenn mindestens ein zugeordneter Test $\mathbf{1} = 0$ liefert, *obwohl* die Voraussetzungen $\mathbf{1}_{\mathrm{pre}} = 1$ erfüllt waren.

Regime-/Schnittstellenverletzung. Wenn $\mathbf{1}_{\mathrm{pre}} = 0$, dann ist der entsprechende Test in dieser Domäne *nicht lizenziert* (Regime- oder Schnittstellenverletzung); dies ist ein eigenständiges Fail-Signal, wird aber nicht als Brückenfalsifikation im engeren Sinn gezählt.

Damit sind drei Dinge explizit: (i) Pass/Fail ist eine lokale Datenentscheidung, (ii) „Falsifikation“ meint die getestete Domäne, nicht ein globales Urteil, (iii) Proxy-/Front-/Kalibrations-Fails sind *Voraussetzungs-Fails* und werden von Brücken-Fails getrennt ausgewertet.

X.7.2 Brücken-Kriterium als generisches Falsifikationssignal

Zentral ist die Kommutativität der Auswertung aus Formelkasten X.3.3.1. Sie liefert ein generisches Kriterium, das unabhängig vom konkreten Experiment formuliert werden kann.

Formelkasten X.7.2.1: Generisches Brücken-Falsifikationskriterium

Seien $\mathcal{P}_{\mathrm{QM}}, \mathcal{P}_{\mathrm{Geo}}$ das Prädiktionsschema aus Kapitel X.5 und $\delta_{*,\mathrm{bridge}} > 0$ eine numerische Toleranz. Wir definieren zuerst das *Brücken-Residual* (objektwertig)

$$\delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X}) \;\equiv\; \mathcal{P}_{\mathrm{QM}}(\mathsf{X}) - \mathcal{P}_{\mathrm{Geo}}(\mathsf{X}),$$

und daraus den *Brücken-Abstand* (skalar, testbar) als metrisiertes Residuum

$$\Delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X}) \;\equiv\; \left\|\delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X})\right\|_{\Sigma^+} \;:=\; \sqrt{\delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X})^\top\,\Sigma(\mathsf{X})^+\,\delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X})}\,,$$

wobei $\|v\|_{\Sigma^+} \;:=\; \sqrt{v^\top \Sigma(\mathsf{X})^+ v}$. Hier ist $\Sigma(\mathsf{X})$ die (vorab festgelegte) Kovarianz im Datenraum der betrachteten Ausgabengrößen (z. B. aus Bootstrap/Jackknife oder aus einem Messmodell; vgl. Formelkasten X.5.4.1); $(\cdot)^+$ bezeichnet die (ggf. regulärisierte) Pseudoinverse (im vollrangigen Fall gilt $\Sigma^+ = \Sigma^{-1}$).
Die *Brücke* ist operativ verletzt, wenn

$$\Delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X}) \;>\; \delta_{*,\mathrm{bridge}},$$

unter erfüllten H-Gate- und Proxy-/Precondition-Bedingungen aus Kapitel X.4 (siehe den domänenspezifischen Entscheider in Korollar X.7.6.1). In diesem Fall ist das Kommutativitätsdiagramm Formelkasten X.3.3.1 in der getesteten Domäne widerlegt.

Designrichtlinie. Protokolle müssen so konstruiert werden, dass Δ_{bridge} nicht durch triviale Reparametrisierungen oder durch Front- und Einheiten-Drift absorbiert wird. Genau deshalb koppeln die folgenden Protokolle immer eine Messauswertung an eine explizite Kalibrations- und Regimeprüfung.

X.7.3 Experimentprotokolle als Degeneracy-Breaker

Wir geben drei Standardprotokolle, die unterschiedliche Datenwelten abdecken. Sie sind so gewählt, dass sie jeweils einen anderen Failure-Mode treffen: (A) Informationspfeil und Unselektiertheit, (B) Profil- und Pfadkonsistenz von N_B, (C) kosmische Kanal-Überbestimmung (Distanzkanal vs. Zeitkanäle inkl. Drift).

Algorithmus X.7.3.1: E-A (Labor): DPI/Spohn-Monotonie als Pass/Fail-Protokoll

Eingabe: Kanalnetz/GKLS $\mathfrak{N}$, H-Gate H, Kalibration/Front Cal, Beobachtung $\mathcal{O}$ (Rechenkalkül Kapitel X.5, Modul A Algorithmus X.5.3.1).
Schritte.

1. Tomographie der Anfangszustände ρ_0 und Referenzen σ; Festlegung einer unselektierten Evolution Φ_t.
2. Messung von Outcome-Verteilungen in zwei Zeitpunkten $t_1 < t_2$ unter identischer Kalibration.
3. Rekonstruktion von $D_\alpha(\rho_{t_i}\|\sigma)$ (oder der vorab festgelegten DPI-monotonen Divergenz) und Schätzung von $\sigma_{\text{Spohn}}(t)$, soweit im Protokoll lizenziert.
4. Entscheidung: $\mathbf{1}_{\text{lab,DPI}} = \mathbf{1}[D_\alpha(t_2) \le D_\alpha(t_1) + \delta_{*,\text{DPI}}]$.

Ausgabe: Pass/Fail, Effektgröße $\Delta D_\alpha = D_\alpha(t_2) - D_\alpha(t_1)$, Unsicherheit $\Delta(\Delta D_\alpha)$.

Kommentar. Ein Fail ist (bei erfüllten Voraussetzungen: unselektierte Implementierung, H-Gate/Front-Kalibration) ein Hinweis auf eine Verletzung des DPI-Pfeils bzw. der lizenzierten Spohn-Monotonie. Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt, ist das Signal als Regime-/Schnittstellen-Fail zu klassifizieren (vgl. Abschnitt X.7.1) und blockiert eine Brücken-Interpretation in dieser Domäne.

Algorithmus X.7.3.2: E-B (Astro): Tolman–Shapiro–PTA Triangulation

Eingabe: Spektrallinien und Temperaturen (A1), Strahlen-Delays (A2), Timing-Residuen (A3), Kalibration Cal (siehe Abschnitt X.6.2).
Schritte.

1. *Kalibration/Inference:* Schätze eine N_B-Rekonstruktion aus A1 (Redshift und Temperatur) und dokumentiere explizit, welche Daten dafür verwendet werden (Trainings-/Kalibrationsmenge).
2. *Out-of-sample Tests:* Sage $\Delta t_B[\gamma]$ (A2) und $R(t)$ (A3) mit demselben N_B auf disjunkten Daten/Beobachtungen vorher (Hold-out bzw. unabhängige Datensätze, soweit verfügbar).
3. *Entscheidung:* Berichte $\mathbf{1}_{\text{Tol}}$ separat; zähle A1 nicht als unabhängigen Test, wenn dieselben Daten zur N_B-Rekonstruktion dienten. Der Triangulationsentscheid ist dann
$$(\mathbf{1}_{\text{astro,Delay}} \wedge \mathbf{1}_{\text{astro,PTA}}) \;\wedge\; \mathbf{1}_{\text{Tol}}$$
(mit $\mathbf{1}_{\text{Tol}}$ als Regime-/Skalencheck).

Ausgabe: Konsistenz-Score $S_{\text{astro}} \in [0,1]$ (Anteil bestandener Tests), Residuen und Unsicherheiten.

Kommentar. Die Kombination unterdrückt Degeneranzen: A1 fixiert Skalen (Regime-/Proxy-Check), A2 testet Pfad-Integrale, A3 testet zeitliche Akkumulation. Ein Fail in A2/A3 (bei erfüllten Voraussetzungen) falsifiziert die N_B-Proxy-Lesart in der betrachteten Domäne

(Regime-/Proxy-Fail), statt nur ein Profilmodell „schlecht fitten“ zu lassen.

Algorithmus X.7.3.3: E-C (Kosmo): Distanzkanal $\oplus$ Zeitkanäle als Nulltest-Kette

Eingabe: Standardkerzen oder Standardsirenen (für d_L), BAO oder Linsen (für d_A), Spektrallinien $z \equiv z_{\text{obs}}$ (geometrische FRW-Rotverschiebung als Kanal-Label), Chronometer $dz/d\tau_{\text{geo}}$, Langzeit-Driftmessungen $dz/d\tau_{\text{geo},0}$ und (optional) SN-Lichtkurven-Dilatation $R_{\text{SN}}(z)$ (siehe Abschnitt X.6.3).
Schritte.

1. *Distanzkanal:* Rekonstruiere $H_{\text{dist}}(z)$ aus Distanzen (vgl. Vorhersage C1 in Kapitel X.6).
2. *Chronometerkanal:* Schätze $H_{\text{CC}}(z) := -\frac{1}{1+z}\frac{dz}{d\tau_{\text{geo}}}$ und daraus $\widehat{\chi}_{\text{CC}}(z) = \frac{H_{\text{dist}}(z)}{H_{\text{CC}}(z)}$ (vgl. Vorhersage C2).
3. *Driftkanal (bei t_0):* Schätze $\widehat{\chi}_0$ aus
$$\frac{dz}{d\tau_{\text{geo},0}} = \chi_0^{-1}\Big[(1+z)H_0 - H_{\text{dist}}(z)\Big],$$
und prüfe die erwartete z-Unabhängigkeit von $\widehat{\chi}_0$ (vgl. Vorhersage C3).
4. *SN-Dilatation (optional, Zeitkanal):* Prüfe $R_{\text{SN}}(z) = \chi_0/\chi(z)$ und konsolidiere $\widehat{\chi}_{\text{SN}}(z) = \widehat{\chi}_0/R_{\text{SN}}(z)$.
5. *Nulltests/Residuen:* Bilde $\Delta_{\text{DR}}, \Delta_{\text{CC}}, \Delta_{\text{SNCC}}$ gemäß Vorhersage C3 und entscheide Pass/Fail über vorab festgelegte Schwellen.

Entscheidung: $\mathbf{1}_{\text{cosmo,null}} = 1$ (und Schranken $0 < \chi \leq 1$, $\tau_{\text{geo}} \leq t$, soweit im Datensatz lizenziert).
Ausgabe: Konsistenz-Score S_{cosmo}, Residuenprofile und Unsicherheiten.

X.7.4 Teststatistik und Fehlerkontrolle

Die Protokolle liefern Schätzer $\widehat{\mathcal{J}}$ für Funktionale $\mathcal{J}$. Damit Pass/Fail über Datensätze hinweg vergleichbar bleibt, nutzen wir ein einheitliches Teststatistik-Schema, inklusive Fehlerkontrolle und Power-Skizze.

Formelkasten X.7.4.1: Teststatistik, Fehlerkontrolle & Power

Ziel. Ein Minimalstandard für vergleichbare Pass/Fail-Entscheidungen ist: (i) wohldefinierter Schätzer $\widehat{\mathcal{J}}$, (ii) robuste Unsicherheiten (Resampling oder Messmodell), (iii) vorab fixierte Schwelle δ_*, (iv) dokumentierte Fehlerkontrolle.

Option A (asymptotisch/linearisiert): Z-Test. Sei $\widehat{\mathcal{J}}$ ein Schätzer eines (skalarisierten) Funktionals $\mathcal{J}$ mit Standardfehler $\sigma_{\mathcal{J}}$. Wir testen einseitig $H_0 : \mathcal{J} \leq \delta_*$ gegen $H_1 : \mathcal{J} > \delta_*$ mit

$$Z = \frac{\widehat{\mathcal{J}} - \delta_*}{\sigma_{\mathcal{J}}}, \quad \text{Pass/Fail: } \mathbf{1} = \mathbf{1}[Z \leq z_{1-\alpha}],$$

Signifikanz α (typisch 0.05).

Power (Heuristik). Für erwartetes Signal $\Delta_{\text{sig}} > 0$ gilt Power $\approx \Phi\Big(\frac{\Delta_{\text{sig}}}{\sigma_{\mathcal{J}}} - z_{1-\alpha}\Big)$.

Kombination. Mehrere Tests via Fisher- oder Tippett-Methoden; bei Korrelationen nutze Kovarianzen aus Formelkasten X.5.4.1.

Option B (Default bei Nicht-Normalität): Resampling/Likelihood. Kalibriere die Entscheidungsgrenze durch Bootstrap/Permutation oder (wo vorhanden) über ein explizites Likelihood- bzw. Simulation-basiertes Messmodell; berichte dann p-Werte/konfidente Bänder konsistent mit der vorab festgelegten δ_*-Semantik.

Sup/Max-Funktionale (Front- und Rastertests). Für Funktionale vom Typ sup / max (z. B. $\sup \mathcal{J}_{\text{NS}}$ über Suchraster) ist die Normalapproximation im Allgemeinen nicht robust. Als Default kalibrieren wir Schwellenwerte durch Resampling (Bootstrap/-Permutation) und berücksichtigen die Rasterung (Multiple-Testing/Look-Elsewhere-Effekt) über geeignete Familienfehler- oder FDR-Kontrolle.

X.7.5 Degeneracy-Breaker als Entkopplungsprinzip

Degeneracy-Breaker entstehen durch Observablen, die in möglichst orthogonale Sensitivitätsrichtungen zeigen. Das ist hier keine abstrakte Optimalität, sondern eine operative Regel: Zeitkanäle, Front-Tests und Profile sollen nicht dieselbe Unsicherheitsschraube drehen.

Formelkasten X.7.5.1: Degeneracy-Breaker-Heuristik (orthogonale Sonden)

Sei $\theta = (\pi, \text{nuisance})$ und $Y = f(\theta)$. Wähle Observablen $Y_1, \ldots, Y_k$ so, dass die Spalten des Jacobians $J = \partial Y / \partial \theta$ möglichst orthogonal sind:

$$\max_{\mathcal{O}_1, \ldots, \mathcal{O}_k} \lambda_{\min}(J^\top J) \quad \text{unter} \quad \text{Kosten- und Zeitbudget.}$$

Praktisch: kombiniere den Drift-/Zeitkanal $dz/d\tau_{\text{geo},0}$ (zeitartige Sensitivität) mit dem interventionalen Front-Kriterium $\mathcal{J}_{\text{NS}}$ (raumartige Sensitivität) und statischen Profilen (z. B. Tolman z_B) als Skalen-/Regimecheck, um $\pi_{\text{Tol}}, \pi_{\text{Front}}, \chi$ zu entkoppeln. ($\mathcal{R}_{\text{front}}$ wird dabei als Diagnosegröße mitgeführt, aber nicht als Front-Pass/Fail verwendet; siehe Definition X.4.2.4.)

X.7.6 Minimaler Entscheidungsbaum und Pipelines

Aus Proxy- und Brückenlogik folgt ein minimales Paket an Kriterien, das unabhängig vom konkreten Datenfeld formuliert werden kann. Wichtig ist die saubere Trennung zwischen (i) Regime-/Schnittstellen-Fails (Proxy/Front/Kalibration) und (ii) Brücken-Fails im engeren Sinn (Δ_{bridge} bei erfüllten Voraussetzungen).

Korollar X.7.6.1: Minimaler Entscheidungsbaum (Proxy-Fail vs. Brücken-Fail)

(A) Regime-/Proxy-Fail. Wenn $\mathbf{1}_{\text{pre}} = 0$, dann ist die Auswertung als *Voraussetzungs-Fail* zu klassifizieren; ein Brücken-Test nach Formelkasten X.7.2.1 ist in dieser Domäne nicht lizenziert. Insbesondere: Wenn mindestens einer der Indikatoren $\mathbf{1}_{\text{Tol}}, \mathbf{1}_{\text{KMS}}, \mathbf{1}_{\text{QNEC}}, \mathbf{1}_{\text{Front}}$ Null ist (siehe Abschnitt X.4.4), dann ist die zugehörige Proxy-Familie (bzw. das angenommene Regime/Schnittstellenbündel) in der getesteten Domäne verletzt.

(B) Brücken-Falsifikation (enger Sinn). Wenn $\mathbf{1}_{\text{pre}} = 1$ *und* alle Proxy-Indikatoren aus (A) Eins sind *und* zusätzlich $\Delta_{\text{bridge}}(\mathsf{X}) > \delta_{*,\text{bridge}}$ nach Formelkasten X.7.2.1, dann ist das Brückenschema aus Kapitel X.3 in der getesteten Domäne falsifiziert.

Die folgenden Beispiel-Flows zeigen, wie Protokolle typischerweise an Datenquellen gekoppelt werden, ohne dass die Entscheidungskriterien nachträglich angepasst werden müssen.

Experimentelle Pipelines (Beispiele)

Labor: E-A $\rightarrow$ (optional) Landauer-Kalibration $\rightarrow$ Sagnac-Modul, jeweils mit Front-Kalibration und H-Gate-Tomographie.

Astro: E-B mit Spektroskopie (A1 als Skalen-/Regimecheck) $\rightarrow$ VLBI-Delays (A2) $\rightarrow$ PTA-Residuen (A3), wobei Kalibration/Inference (A1) und anschließende Out-of-sample-Tests (A2/A3) explizit getrennt dokumentiert werden; Front/No-Signalling-Checks über $\mathbf{1}_{\text{Front}}$ (siehe Definition X.4.2.4).

Kosmo: E-C mit Sirenen oder Kerzen $\rightarrow$ BAO oder Linsen $\rightarrow$ Langzeit-Drift (Zeitkanal); Rückkopplung lokaler Proxies (Tolman, Front) für Niedrig-z.

X.7.7 Roadmap und Dokumentationsstandard

Zum Abschluss geben wir eine Priorisierung nach technischem Reifegrad und erwarteter Aussagekraft. Wichtig ist nicht die Jahreszahl, sondern die Abfolge: zuerst harte Labor- und Frontdiagnostik, dann triangulierte Profile, dann Drift/Nulltests als kosmischer Degeneracy-Breaker.

Roadmap & Priorisierung

- *Kurzfrist (1–3 Jahre):* Labor E-A (DPI/Spohn) auf Ionenfallen oder Spin-Qubits; Sagnac-Signaturen; Astro A1/A2 an bestehenden Datensätzen.
- *Mittel (3–5 Jahre):* Vollständige E-B-Triangulation mit PTA-Daten; erste konsistente N_B-Karten in ausgewählten Systemen; kosmische Distanzkanal-Rekonstruktionen $H_{\mathrm{dist}}(z)$ mit verbesserten Standardsirenen.
- *Langfrist (>5 Jahre):* Präzise Drift-/Zeitkanal-Messungen $dz/d\tau_{\mathrm{geo},0}$ und überbestimmte Nulltests/Residuen (Distanz $\oplus$ Zeitkanäle); großskalige Konsistenzprüfungen $\{H_{\mathrm{dist}}, H_{\mathrm{CC}}, \widehat{\chi}, \mathrm{Drift}, R_{\mathrm{SN}}\}$ mit lokalen Proxy-Rückkopplungen; systematische Brücken-Stress-Tests über Δ_{bridge}.

Dokumentation. Jedes Experiment veröffentlicht X gemäß Eingabeformat Abschnitt X.5.2, die Roh- und Ausgabedaten $Y, \Delta Y$ sowie die binären Indikatoren.

Hinweis. Für alle Protokolle gilt: c bleibt explizit kalibriert (keine $c{=}1$-Setzung ohne Front-Protokoll). Die Pass/Fail-Schwellen δ_* werden vor der Datensichtung festgelegt, um nachträgliche Schwellenanpassungen zu vermeiden.

X.8 Einordnung & Vergleich mit Standard-QM/ART/ΛCDM

Dieses Kapitel ordnet die FBA-Brücke aus Kapitel X.3, H-Gates und Proxies aus Kapitel X.4 und das Rechenkalkül aus Kapitel X.5 gegenüber den Standardansätzen der Quantenmechanik, der Allgemeinen Relativität und der kosmologischen ΛCDM-Referenz ein. Leitfragen sind: Wo ist FBA im passenden Regime äquivalent? Was ist zusätzlicher Gehalt in Form messbarer Proxies? Wodurch entstehen Abweichungen und wie werden sie als Pass/Fail diagnostiziert (siehe Kapitel X.6 und X.7)?

Rahmen. Wir trennen drei Ebenen: (i) Kernäquivalenzen im geeigneten Limes (flach, lokal, stationär), (ii) zusätzliche Struktur durch Budget- und Front-Proxies, (iii) Abweichungsregime (Nichtstationarität, starke Gradienten, TDI). Diese Trennung ist nötig, damit „Zusatzstruktur“ nicht mit „Abweichung“ verwechselt wird: Die Proxies sollen im Äquivalenzregime nicht neue Physik behaupten, sondern genau markieren, wann die Standardabkürzungen operativ zulässig sind.

Kernäquivalenzen (flach, lokal, stationär)

- **QM (offene Systeme):** Lokale GKLS-Dynamik, CPTP-Kanäle und POVMs decken sich mit dem Labor-Modul A des Rechenkalküls (Algorithmus X.5.3.1). DPI- und Spohn-Monotonien sind mit Kegelkausalität verträglich (Lemma X.3.4.1 und Korollar X.3.6.1). *Quelle (Überblick):* FBA Teil IV, Kap. IV.3–IV.6.
- **ART (lokaler Minkowski-Limes):** Lichtkegel und Eigenzeit folgen aus Budget-Quadrik und Front-Kalibration; Tolman-Relationen (Proxy A, Definition X.4.2.1) reproduzieren gravitative Rotverschiebung im stationären Feld. *Quelle (Überblick):* FBA Teil VI, Kap. VI.3–VI.5.
- **Kosmologie (ohne TDI):** Für $\chi \equiv \text{const.}$ (und insbesondere $\chi \equiv 1$ nach Kalibration) fallen Distanzkanal und Zeitkanäle zusammen: $H_{\text{dist}}(z) = H_{\text{CC}}(z) = H(z)$, die geometrische Rotverschiebung ist $1+z = a_0/a$, und Etherington-Dualität gilt im lizenzierten Regime (vgl. Abschnitt X.6.3).

Die Kernäquivalenzen sind der Referenzpunkt für alles Weitere: Erst wenn klar ist, dass die Standardregime reproduziert werden, haben Proxy-Fails und TDI-Signaturen die richtige Bedeutung, nämlich als gezielte, lokalisierbare Verletzungen der Regimeannahmen.

Kinematik. Wir beginnen mit der Minkowski-Kinematik, weil sie die gemeinsame Sprache für Labor- und Nahfeldtests liefert und gleichzeitig erklärt, warum Front-Kalibration in FBA nicht optional ist, sondern die operative Fixierung der Lichtkegelstruktur.

Formelkasten X.8.1: Lorentz-Kinematik aus Budget-Quadrik (Minkowski-Limes)

Im flachen Grenzfall mit Front-Kalibration gilt

$$d\tau_{\text{geo}}^2 \;=\; -\eta_{\mu\nu}\, dx^\mu dx^\nu / c^2, \qquad \gamma = \frac{dt}{d\tau_{\text{geo}}} \;=\; \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

wobei $d\tau_{\text{geo}}$ der reversible interne Budgetanteil ist (Notation und Zerlegung in Kapitel X.2). Die totale Eigenzeit $\tau_{\text{tot}} = \tau_{\text{geo}} + A$ separiert irreversible Alterung $A \geq 0$.
Folge. Zeitdilatation γ und Lichtkegelstruktur stimmen mit der Standard-SR überein. Irreversible Beiträge treten als beobachtbare Raten und Entropieproduktionen auf, nicht als Änderung der Kegelgeometrie.

Damit ist zugleich klar, wie FBA Standardbegriffe einordnet: „Geometrie“ meint die kegel- und eigenzeitbezogene Struktur aus b_{int}, während Irreversibilität als eigener, messbarer Kanal in b_{irr} geführt wird. Diese Trennung ist später entscheidend, weil sie verhindert, dass Dissipationssignaturen als „Geometrieeffekte“ umetikettiert werden können.

Mikrokausalität. Standard-QFT formuliert Mikrokausalität als (approximate) Kommutativität raumartig separierter Operatoren. Im FBA-Kontext ist die relevante Frage operativ: Kann eine raumartig platzierte Zusatzoperation die Auswertung messbar beeinflussen? Genau diese (No-Signalling-)Aussage wird durch den Front-Proxy als Datenkriterium überprüfbar.

Formelkasten X.8.2: Mikrokausalität operativ: No-Signalling-Front-Proxy + Korrelation als Diagnose

Für zwei raumartig getrennte Regionen A, B ($|\Delta x| > c|\Delta t|$) definieren wir ein interventionales No-Signalling-Funktional $\mathcal{J}_{\text{NS}}(\Delta x, \Delta t)$ (vgl. Proxy D in Definition X.4.2.4):

$$\mathcal{J}_{\text{NS}}(\Delta x, \Delta t) = \sup_{\mathcal{I}_A \in \mathfrak{I}_A,\ \mathcal{M}_B \in \mathfrak{M}_B} \left\| p(b \mid \mathcal{I}_A, \mathcal{M}_B, t + \Delta t) - p(b \mid \text{id}, \mathcal{M}_B, t + \Delta t) \right\|_1,$$

wobei $\mathcal{I}_A$ Interventionen/zusätzliche lokale Operationen auf A bezeichnet, $\mathcal{M}_B$ eine festgelegte Test-POVM auf B und b deren Outcomes.

Pass/Fail (Proxy D). $\mathbf{1}_{\text{Front}} = 1$ genau dann, wenn das in Definition X.4.2.4 festgelegte No-Signalling-Kriterium (inkl. Schwelle/Toleranz) im vorab registrierten Testgitter besteht.

Einordnung. Dieses Kriterium ist die operative Form von „keine raumartige Einflussnahme“ und ist kompatibel mit der Standardintuition von Mikrokausalität als Signal-/Einflussverbot.

Diagnostik. Zusätzlich können raumartige Korrelationen über $\mathcal{R}_{\text{front}}(\Delta x, \Delta t)$ (siehe Definition X.4.2.4) berichtet werden, aber $\mathcal{R}_{\text{front}}$ ist *keine* No-Signalling-Größe: nichtverschwindende Korrelationen können durch gemeinsame Ursachen/Entanglement entstehen, ohne dass Signalbarkeit vorliegt.

Der Vorteil dieser Formulierung ist, dass sie die Standardforderung nicht ersetzt, sondern als Messprotokoll greifbar macht: Mikrokausalität ist dann kein reines Axiom, sondern ein Pass/Fail-Kriterium mit expliziter Fehlerkontrolle und klarer Interventionssemantik.

Übersetzungsverzeichnis. Damit Vergleiche nicht an Symbolik scheitern, halten wir ein kurzes Wörterbuch fest. Es ist bewusst knapp: Es soll den Abgleich ermöglichen, ohne eine zweite Notationswelt einzuführen.

FBA $\leftrightarrow$ Standardgrößen (Wörterbuch)

- $N_B(x)$ (budgetinduzierte Lapse) $\leftrightarrow$ gravitativer Rotverschiebungsfaktor bzw. Tolman-Lapse (Proxy A, Definition X.4.2.1).
- $\Delta b_{\rm irr}$, $\dot{A}$ $\leftrightarrow$ Entropieproduktion bzw. Irreversibilitätsmaß (Labor-Kopplung über Landauer, Formelkasten X.6.1.3; Produktionsraten via DPI/Spohn, Formelkasten X.6.1.1).
- H (H-Gate) $\leftrightarrow$ tomographisch fixierte Kreuzbasis/Isometrie zwischen FBA- und Hilbertraumdarstellung (Definition X.4.1.1).
- $\mathcal{J}_{\rm NS}$ bzw. $\mathbf{1}_{\rm Front}$ $\leftrightarrow$ operative No-Signalling-/Frontprüfung (Proxy D, Definition X.4.2.4); $\mathcal{R}_{\rm front}$ als ergänzende Diagnosegröße (Korrelationen, nicht Signalbarkeit).
- χ (TDI-Faktor) $\leftrightarrow$ effektive Zeitskalenmodulation, die nicht über „z-Umdefinition“ eingeführt wird, sondern über *Kanalvergleich* testbar ist:

$$\widehat{\chi}(z) = \frac{H_{\rm dist}(z)}{H_{\rm CC}(z)}$$

  (Distanzkanal $H_{\rm dist}$ vs. Chronometerkanal $H_{\rm CC}$, plus Drift-/Nulltests; siehe Kapitel X.7).

Stationäre Felder. Im stationären Regime soll FBA nicht „abweichen“, sondern die Standardrelationen reproduzieren. Der zusätzliche Gehalt liegt hier darin, dass Stationarität und Rotverschiebung nicht nur angenommen, sondern über Proxies als Regimebedingung geprüft werden können.

Korollar X.8.1: Tolman- und KMS-Äquivalenz im stationären Regime

Sind $\mathbf{1}_{\rm Tol} = \mathbf{1}_{\rm KMS} = 1$ (siehe Definitionen X.4.2.1 und X.4.2.2), so reproduziert FBA die Standardrelationen stationärer Felder:

$$1 + z_B = \frac{N_B(x_{\rm obs})}{N_B(x_{\rm emit})}, \qquad T(x)N_B(x) = \text{const.}$$

Zudem sind zweipunktige Spektren im beobachteten Bereich KMS-kompatibel im Sinn der Proxy-Definition.

Damit ist klar, was „Mehrwert“ hier bedeutet: nicht neue Gleichungen im stationären Grenzfall, sondern die Möglichkeit, das Grenzfall-Regime selbst als Pass/Fail zu belegen.

Abweichungsregime. Abweichungen sind im FBA-Kontext keine nachträglichen Freiheitsgrade, sondern entstehen als Konsequenz klar benannter Regimeverletzungen (Proxy-Fails) oder als großskalige Kopplung (TDI). Die folgende Karte dient als Diagnosehilfe, weil sie Failure-Modes voneinander trennt.

Abweichungen & Signaturen (diagnostische Karte)

Nichtstationär oder starke Gradienten. Verletzung von $\mathbf{1}_{\mathrm{KMS}}$ (Proxy B): nichtthermische Spektren, driftende effektive Temperaturen, Asymmetrien in Autokorrelationen (siehe Definition X.4.2.2).

Front-nahe Dynamik. Verletzung von $\mathbf{1}_{\mathrm{Front}}$ (Proxy D) im interventionalen Sinn: das No-Signalling-Funktional $\mathcal{J}_{\mathrm{NS}}$ liegt oberhalb der in Definition X.4.2.4 vorab festgelegten Toleranz; dies legt nahe, lokale Generatoren und/oder Front-Protokolle zu revidieren (siehe Definition X.4.2.4 und Kapitel X.7). $\mathcal{R}_{\mathrm{front}}$ ist in diesem Kontext eine ergänzende Diagnosegröße, aber keine Signalbarkeitsentscheidung.

Budget-Lecks (fehlende Closure). Verletzung der Closure-Bedingung in Proxy B: diskrepante Shapiro- oder Timing-Delays bei ansonsten passenden Tolman-Profilen; typischerweise ein Hinweis auf unterschätzte externe Nettoströme (siehe Definition X.4.2.2 und die Astro-Protokolle in Kapitel X.7).

TDI-Kopplung (Kanal-Überbestimmung statt z-Re-Labeling). $\chi \not\equiv$ const. erscheint operativ als *Auseinanderlaufen* von Distanz- und Zeitkanälen:

$$\widehat{\chi}(z) = \frac{H_{\mathrm{dist}}(z)}{H_{\mathrm{CC}}(z)} \neq 1 \quad \text{(nach Kalibration).}$$

Zusätzliche Orthogonalität liefert der Drift-/Zeitkanal am Beobachter:

$$\frac{dz}{d\tau_{\mathrm{geo},0}} \overset{\text{(TDI)}}{\approx} \chi_0^{-1}\Big[(1+z)H_0 - H_{\mathrm{dist}}(z)\Big],$$

wobei ein z-unabhängiger χ_0-Schätzer (und konsistente $\widehat{\chi}(z)$) als Nulltest-Kette fungiert (vgl. Kapitel X.7).

Beispiele und Checks. Die wichtigste praktische Frage ist nicht, ob ein einzelnes Observable abweicht, sondern ob mehrere, logisch gekoppelte Sonden zusammenpassen. Das folgende Tripel ist deshalb ein Standardcheck: Profile fixieren N_B, Delays und Timing prüfen dieselbe Struktur als Pfad- bzw. Akkumulationsgröße.

Formelkasten X.8.3: Kohärenz-Check: Profile $\leftrightarrow$ Delays $\leftrightarrow$ Timing

Mit $N_B(x)$ aus Profilen gilt für Strahlenpfade γ

$$\Delta t_B[\gamma] = \int_\gamma (N_B^{-1} - 1)\, ds, \quad R(t) = \int_0^t \left(\frac{1}{N_B(x(t'))} - 1\right) \frac{dt'}{P}.$$

Kriterium. Pass aller drei (Profile, Delays, Timing) $\Rightarrow$ konsistentes N_B im getesteten Bereich. Fail in einem $\Rightarrow$ lokalisierbare Proxy-Verletzung mit Experimentlogik aus Kapitel X.7.

Kosmologische Ebene. Ohne TDI ist der Vergleich mit ΛCDM eine Grenzfallprüfung. Mit TDI liefert FBA zusätzliche, orthogonale Tests, weil Drift und Zeitkanäle nicht durch dieselbe Parametrik absorbiert werden wie Distanzfits.

Formelkasten X.8.4: ΛCDM-Limes und TDI-Signaturen (Kanalvergleich)

Ohne TDI (Grenzfall). $\chi \equiv \text{const.}$ (und nach Kalibration $\chi \equiv 1$) $\Rightarrow$ Distanzkanal und Zeitkanäle stimmen überein:

$$H_{\text{dist}}(z) = H_{\text{CC}}(z) = H(z), \qquad \frac{dz}{d\tau_{\text{geo},0}} = (1+z)H_0 - H(z).$$

Etherington-Dualität gilt im lizenzierten Regime (vgl. Abschnitt X.6.3).

Mit TDI (Zusatztests).

$$\widehat{\chi}(z) = \frac{H_{\text{dist}}(z)}{H_{\text{CC}}(z)}, \qquad \frac{dz}{d\tau_{\text{geo},0}} \approx \chi_0^{-1}\Big[(1+z)H_0 - H_{\text{dist}}(z)\Big].$$

Diagnostik. (1) $\widehat{\chi}(z)$ ist ein direkter, datengetriebener Kanalvergleich; (2) der Drift-/Zeitkanal liefert eine orthogonale Konsistenzbedingung über χ_0. Zusammen bilden sie Degeneracy-Breaker gegenüber reinen Distanz- oder Ratefits (siehe Kapitel X.7).

Interpretation. FBA ersetzt keine Standardtheorie. Es begründet Standardregime aus Abfolge- und Budgetprinzipien, liefert eine operative Brücke und ergänzt eine testbare Regime- und Konsistenzstruktur. Abweichungen sind deshalb nicht „frei“, sondern an konkrete Proxy-Verletzungen oder an die kosmische Kanal-Überbestimmung (TDI) gekoppelt und damit als Pass/Fail adressierbar.

Merkliste (Vergleich & Praxis)

- **Äquivalenzen:** SR-Kinematik (Formelkasten X.8.1), lokale GKLS und DPI/Spohn (Lemma X.3.4.1), stationäre Rotverschiebung und KMS (Proxy A/B, Definitionen X.4.2.1 und X.4.2.2), ΛCDM-Limes bei $\chi \equiv \text{const.}$ über Kanalgleichheit (Formelkasten X.8.4).
- **Mehrwert:** Operative Proxies (Tolman, KMS/Closure, Front, QNEC-nah) und Brücken-Kohärenz $\mathcal{P}_{\text{QM}} = \mathcal{P}_{\text{Geo}}$ als Pass/Fail-Tests (Formelkasten X.7.2.1).
- **Abweichungen:** Lokalisierbar über Proxy-Fails und kosmische Kanal-Nulltests (Distanzkanal vs. Zeitkanäle plus Drift; Formelkasten X.8.4); Degeneracy-Breaking durch Zeitkanäle und Front-Tests (siehe Kapitel X.7).
- **Workflow:** Wörterbuch anwenden (Kapitel X.8) $\to$ Profile und Delays koppeln (Formelkasten X.8.3) $\to$ Labor-Monotonien prüfen (Formelkästen X.6.1.1 und X.6.1.2) $\to$ kosmische Kanal-Überbestimmung als Abschluss (Distanz $\oplus$ Zeitkanäle $\oplus$ Drift; Kapitel X.7).

X.9 Fallstudien & Replikations-Blueprints (TDI & kosmische Dynamik eingeschlossen)

Dieses Kapitel bringt die Brücke (Kapitel X.3), die H-Gates und Proxies (Kapitel X.4) und das Rechenkalkül (Kapitel X.5) in konkrete Fallstudien. Ziel ist ein reproduzierbarer Blueprint von Datenerhebung bis Pass/Fail-Entscheid. Die Logik ist dabei bewusst immer gleich: (1) Eingabe nach der Grammatik aus Abschnitt X.5.2, (2) Auswertung über die Module aus Kapitel X.5, (3) Entscheidung über die Indikatoren aus Abschnitt X.4.4 plus Brücken-Diagnose.

Wir beginnen im Labor (maximale Kontrolle über Unselektiertheit und Kalibration), gehen über Orbit- und Astro-Anwendungen (Profile plus Pfadintegrale), und schließen mit kosmischen TDI-Signaturen (Distanzleiter plus Drift). Am Ende stehen ein minimales Datenpaketformat, eine Systematik-Landkarte und ein stetiges Brücken-Gütemaß.

X.9.1 Labor-Fallstudie: Unselektierte Zweiniveau-Dekohärenz

Erzählrahmen. Ein Ein- oder Zweiqubit-Setup (Ionenfalle oder supraleitendes Qubit) ist der direkteste Ort, an dem die Brücke operativ „Zähne“ bekommt: DPI/Spohn-Monotonien sind hier keine Interpretation, sondern eine harte Pass/Fail-Schranke unter unselektierter Auswertung. Die Prozedur nutzt das Labor-Modul A (Algorithmus X.5.3.1) und entscheidet über Formelkasten X.6.1.1 sowie die Strukturprüfung Formelkasten X.6.1.2. *Quelle (Überblick):* FBA Teil III, Kap. III.3–III.5; FBA Teil IV, Kap. IV.3–IV.6.

Algorithmus X.9.1.1: Blueprint L: DPI/Spohn auf Zweiniveausystem

Eingabe: Kanalnetz $\mathfrak{N}$ (Amplitude- oder Phase-Dämpfung), H-Gate H (Definition X.4.1.1), Kalibration Cal, Beobachtung $\mathcal{O}$ (Outcome-Verteilungen, Monotonien).
Prozedur.

1. *Tomographie:* Rekonstruiere ρ_0 und Referenzen σ; dokumentiere explizit, dass die Auswertung unselektiert ist (keine Post-Selection).
2. *Evolution:* Implementiere Φ_t für zwei Zeiten $t_1 < t_2$ unter identischer Front- und Zeitkalibration.
3. *Messung:* Erhebe $\{p_{t_i}(j)\}$ in zwei komplementären Basen (Kreuzbasis via H, siehe Formelkasten X.4.3.1).
4. *Auswertung:* Schätze $D_\alpha(\rho_{t_i}\|\sigma)$ (in der vorab fixierten DPI-Variante) und $\sigma_{\text{Spohn}}(t)$ soweit im Protokoll lizenziert (Modul A, Algorithmus X.5.3.1).
5. *Entscheid:* $\mathbf{1}_{\text{lab,DPI}}$ gemäß Formelkasten X.6.1.1 und $\mathbf{1}_{\text{lab,GKLS}}$ gemäß Formelkasten X.6.1.2.

Ausgabe: ΔD_α, $\sigma_{\text{Spohn}}(t)$, $\mathbf{1}_{\text{lab,DPI}}, \mathbf{1}_{\text{lab,GKLS}}$, Unsicherheiten gemäß Formelkasten X.5.4.1.

Messhinweise. Front-Kalibration stabilisiert Zeitbasen. Wenn zusätzlich eine metrologische Kopplung zwischen Budget und Informationsarbeit benötigt wird, ergänze Reset-Experimente und nutze Formelkasten X.6.1.3.

X.9.2 Astro-Fallstudie: Tolman–Shapiro–PTA-Triangulation

Erzählrahmen. Im Astro-Regime ist das Ziel nicht ein „besserer Fit“, sondern die Konsistenz derselben N_B-Struktur über drei logisch verschiedene Abtastungen: Profile (lokal, stationär), Delays (Pfadintegral entlang Nullstrahlen) und Timing (zeitliche Akkumulation). Diese Kombination ist ein Degeneracy-Breaker, weil sie N_B aus unterschiedlichen Datenprojektionen gegeneinander testet. Operativ wird dabei strikt zwischen (i) Rekonstruktion/Kalibration von N_B und (ii) anschließenden Out-of-sample-Tests unterschieden. *Quelle (Überblick):* FBA Teil VI, Kap. VI.3–VI.5.

Algorithmus X.9.2.1: Blueprint A: Konsistentes N_B aus Profilen, Delays, Timing

Eingabe: Spektrallinien und Temperaturen (Tolman), Strahlenpfade γ (Echos, Okklusion, VLBI, Lensing), Timingdaten t_k (Pulsar/Residuen), Kalibration Cal.
Prozedur.

1. *Kalibration/Inference (Profil-Schritt):* Rekonstruiere eine N_B-Schätzung aus Formelkasten X.6.2.1 zwischen $(x_{\text{emit}}, x_{\text{obs}})$. Dokumentiere explizit, welche Daten hierfür verwendet werden (Trainings-/Kalibrationsmenge), und protokolliere $\mathbf{1}_{\text{Tol}}$ (Regime-/Skalencheck).
2. *Out-of-sample Delay-Test:* Berechne $\Delta t_B[\gamma]$ über Formelkasten X.6.2.2 mit demselben N_B, und vergleiche gegen *disjunkte* Delay-Daten (Hold-out bzw. unabhängige Ereignisse/Quellen, soweit verfügbar).
3. *Out-of-sample Timing-Test:* Berechne $R(t)$ über Formelkasten X.6.2.3 mit demselben N_B, und vergleiche gegen *disjunkte* Timing-Residuen (Hold-out bzw. unabhängige Datensätze).
4. *Entscheid:* Berichte $\mathbf{1}_{\text{Tol}}$ separat; zähle Profile nicht als unabhängigen Test, wenn dieselben Profildaten zur N_B-Rekonstruktion dienten. Der Triangulationsentscheid ist dann
$$(\mathbf{1}_{\text{astro,Delay}} \wedge \mathbf{1}_{\text{astro,PTA}}) \;\wedge\; \mathbf{1}_{\text{Tol}}$$
(mit $\mathbf{1}_{\text{Tol}}$ als Regime-/Skalencheck).

Ausgabe: Konsistenz-Score S_{astro}, Residuen $\{\widehat{\Delta t} - \Delta t_B,\, R_{\text{obs}} - R_{\text{mod}}\}$, (optional, in-sample/kalibrationsbezogen) $\{\widehat{z}_B - z_B\}$, Unsicherheiten gemäß Formelkasten X.5.4.1.

Diagnostik. Ein Fail ist hier besonders aussagekräftig, weil er eine konkrete Inkonsistenz markiert: Ein Fail von $\mathbf{1}_{\text{Tol}}$ deutet auf Tolman-/Stationaritäts- oder Kalibrationsprobleme (Regime-/Proxy-Fail). Ein Fail in $\mathbf{1}_{\text{astro,Delay}}$ weist auf Pfad-/Geometrieinkonsistenz oder Front-/Kalibrationsprobleme hin. Ein Fail in $\mathbf{1}_{\text{astro,PTA}}$ ist sensitiv auf großskalige Gradienten oder Stau-Fronten (integrativer Test). (Optional) In frontnahen Regimen kann zusätzlich $\mathbf{1}_{\text{QNEC}}$ als Nullfluss-/Fokussierungscheck berichtbar sein (Definition X.4.2.3). Falls interventional zugängliche Front-/No-Signalling-Checks verfügbar sind, berichte $\mathbf{1}_{\text{Front}}$ gemäß Definition X.4.2.4 als separaten Gegencheck.

X.9.3 Kosmologie-Fallstudie: Distanzkanal $\oplus$ Zeitkanäle $\oplus$ Drift (TDI)

Erzählrahmen. Der TDI-Faktor $\chi(t)$ ist kosmologisch nur dann sinnvoll testbar, wenn er nicht in Kalibrationsfreiheiten „verschwindet". Darum wird die Kette bewusst geschlossen: Der Distanzkanal liefert $H_{\text{dist}}(z)$ (C1), der Chronometerkanal liefert $H_{\text{CC}}(z)$ und damit $\widehat{\chi}(z)$ (C2), und der Driftkanal (C3) liefert eine orthogonale Konsistenzbedingung über χ_0 und Nulltests/Residuen. *Quelle (Überblick):* FBA Teil IX, Kap. IX.3–IX.6.

Algorithmus X.9.3.1: Blueprint C: Distanz $\oplus$ Chronometer $\oplus$ Drift (Nulltest-Kette)

Eingabe: Distanzdaten $d_L(z)$ (Kerzen/Sirenen) und ggf. $d_A(z)$ (BAO/Linsen), Chronometerdaten $dz/d\tau_{\text{geo}}$, Driftmessungen $dz/d\tau_{\text{geo},0}$, (optional) SN-Lichtkurven-Dilatation $R_{\text{SN}}(z)$, Kalibration Cal (inkl. c, H_0, ggf. k im verwendeten Konventionsschema).
Prozedur.

1. *Distanzkanal:* Rekonstruiere $H_{\text{dist}}(z)$ aus $d_L(z)$ (Modul D, Algorithmus X.5.3.4; Vorhersage C1, Formelkasten X.6.3.1) und berichte $\mathbf{1}_{\text{cosmo,dist}}$ gemäß Formelkasten X.6.3.1.
2. *Chronometerkanal:* Schätze $H_{\text{CC}}(z) := -\frac{1}{1+z}\frac{dz}{d\tau_{\text{geo}}}$, bilde $\widehat{\chi}(z) = \frac{H_{\text{dist}}(z)}{H_{\text{CC}}(z)}$, und berichte $\mathbf{1}_{\text{cosmo},\chi}$ gemäß Formelkasten X.6.3.2.
3. *Drift-/Zeitkanal & Nulltests:* Nutze $dz/d\tau_{\text{geo},0}$ (und optional $R_{\text{SN}}(z)$) zur Bildung der Residuen $\Delta_{\text{DR}}, \Delta_{\text{CC}}, \Delta_{\text{SNCC}}$ und entscheide $\mathbf{1}_{\text{cosmo,null}}$ gemäß Formelkasten X.6.3.3.

Ausgabe: $\{H_{\text{dist}}(z), H_{\text{CC}}(z), \widehat{\chi}(z)\}$, Nulltest-Residuen $\{\Delta_{\text{DR}}, \Delta_{\text{CC}}, \Delta_{\text{SNCC}}\}$, Konsistenz-Score S_{cosmo}, Unsicherheiten gemäß Formelkasten X.5.4.1.

Niedrig-z-Gegencheck. Um Kalibrationsaliasing zu vermeiden, kombiniere kosmische Auswertungen im Niedrig-z-Bereich mit lokalen Proxies (Tolman und Front, Definitionen X.4.2.1 und X.4.2.4).

X.9.4 Datenpaket & Reproduzierbarkeit

Erzählrahmen. Damit Replikation nicht an Pipeline-Details scheitert, definieren wir ein minimales Paketformat, das Eingabe, Rohdaten, Kovarianzen und Entscheidungen so enthält, dass die Brücken-Diagnose und die Proxy-Entscheide aus genau denselben Dateien nachgerechnet werden können.

Datenpaket FBAKIT (minimal)

Inhalt.

- `setup.yaml`: $\mathsf{X} = (\mathcal{S}, \mathfrak{N}, \mathsf{H}, \pi, \mathsf{Cal}, \mathcal{O})$ gemäß Eingabeformat Abschnitt X.5.2.
- `observations.csv`: Roh-Observablen $\{y_i\}$ mit Zeit- und Ortstempeln, Binnings, sowie Einheiten aus Cal.
- `covariance.npy`: Kovarianzmatrix $\mathrm{Cov}(Y)$ oder Blockstruktur plus Metadaten, wie sie in Formelkasten X.5.4.1 verwendet wird.
- `proxies.json`: Toleranzen ε, geschätzte Proxy-Funktionale $\widehat{\mathcal{J}}_\bullet$ und die binären Indikatoren $\mathbf{1}_{\mathrm{Tol}}, \mathbf{1}_{\mathrm{KMS}}, \mathbf{1}_{\mathrm{QNEC}}, \mathbf{1}_{\mathrm{Front}}$ (Definitionen: Kapitel X.4).
- `bridge.json`: $\delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X}) = \mathcal{P}_{\mathrm{QM}}(\mathsf{X}) - \mathcal{P}_{\mathrm{Geo}}(\mathsf{X})$, $\Sigma(\mathsf{X})$ (Kovarianz im Datenraum der betrachteten Ausgabengrößen; vgl. Formelkasten X.7.2.1), $\Delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X}) = \|\delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X})\|_{\Sigma^+}$ (mit Σ^+ als ggf. regulärisierte Pseudoinverse; im vollrangigen Fall $\Sigma^+ = \Sigma^{-1}$), sowie $\varepsilon_{\mathrm{bridge}}$ aus Formelkasten X.7.2.1.

Ziel. Nachrechnung von $\delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X})$, $\Delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X})$ und aller Proxy-Entscheide ohne proprietäre Zwischenschritte.

X.9.5 Brücken-Güte & Systematiken

Erzählrahmen. Binäre Entscheide sind für Falsifikation ausreichend, aber für Diagnose zu grob. Darum ergänzen wir ein stetiges Gütemaß, das (i) die Größe der Brücken-Abweichung relativ zu Fehlern bewertet und (ii) als Vergleichswert zwischen Datensätzen dienen kann.

Formelkasten X.9.5.1: Brücken-Gütemaß $\mathcal{G}_{\mathrm{bridge}}$ (stetig)

Sei

$$\delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X}) \;=\; \mathcal{P}_{\mathrm{QM}}(\mathsf{X}) - \mathcal{P}_{\mathrm{Geo}}(\mathsf{X})$$

das (komponentenweise) Brücken-Residual im Datenraum der betrachteten Ausgabengrößen. Sei $\Sigma(\mathsf{X})$ die Kovarianz von $\delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X})$ (aus Fehlerfortpflanzung gemäß Formelkasten X.5.4.1 oder aus Bootstrap/Jackknife); falls Σ nicht vollrangig ist, verwende eine (ggf. regulärisierte) Pseudoinverse Σ^+. (Im vollrangigen Fall gilt $\Sigma^+ = \Sigma^{-1}$.)
Wir definieren den kovarianzgewichteten Brücken-Abstand

$$\Delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X}) \;:=\; \|\delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X})\|_{\Sigma^+} \;=\; \sqrt{\delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X})^\top \, \Sigma(\mathsf{X})^+ \, \delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X})}$$

und daraus das stetige Gütemaß

$$\mathcal{G}_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X}) \;=\; \exp\Big(-\tfrac{1}{2}\,\Delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X})^2\Big) \;\in\; (0,1]\,.$$

Interpretation. $\mathcal{G}_{\mathrm{bridge}} \approx 1$ entspricht hoher Kohärenz (Residual klein relativ zu Fehlern), kleine Werte entsprechen einer statistisch relevanten Brücken-Abweichung.

Ein niedriger Score ist als Diagnose nur dann nützlich, wenn typische Systematiken als Gegenchecks mitgeführt werden. Die folgende Karte bündelt die häufigsten Failure-Quellen und ihren schnellsten Gegencheck.

Systematiken & Gegenchecks

Front- oder Zeitdrift: Kalibration Cal wiederholt prüfen; ToF-Checks plus Sagnac als Gegenanker (Formelkasten X.6.1.4).

No-Signalling-/Front-Verletzung: Interventionalen Front-Test $\mathcal{J}_{\mathrm{NS}}$ bzw. $\mathbf{1}_{\mathrm{Front}}$ prüfen (Definition X.4.2.4); $\mathcal{R}_{\mathrm{front}}$ nur als Diagnose interpretieren.

Selektionsartefakte: Unselektiertheit erzwingen und dokumentieren (Labor-Blueprint, Schritt 1; DPI-Test Formelkasten X.6.1.1).

Pfadunsicherheiten (Astro): γ-Bündel streuen, Mehrfachechos für Δt_B nutzen (Formelkasten X.6.2.2).

Photometrische Skalen (Kosmo): Kerzen und Sirenen kreuzkalibrieren; Chronometer- und Drift-Nulltests gemeinsam berichten (Formelkästen X.6.3.2 und X.6.3.3).

Nullrichtungs-/Frontnähe (optional): Bei frontnahen Daten die QNEC-nahe Nullflussdiagnostik (Proxy C) als separaten Regimecheck dokumentieren (Definition X.4.2.3).

X.9.6 Checkliste (operativ)

Erzählrahmen. Die folgende Liste bündelt die minimalen Schritte zur vollständigen Brückenprüfung je Domäne. Sie ist so strukturiert, dass erst die Regimebedingungen (Proxies) und dann die Brücken-Kohärenz geprüft werden.

Pass/Fail-Checkliste pro Domäne

Labor: $\mathbf{1}_{\mathrm{lab,DPI}}$ und $\mathbf{1}_{\mathrm{lab,GKLS}}$ (optional: Landauer-Kopplung über Formelkasten X.6.1.3).

Astro: $\mathbf{1}_{\mathrm{Tol}}$ als Regime-/Skalencheck (Profil-/Tolman-Schritt; vgl. Abschnitt X.9.2), sowie die Out-of-sample Tests $\mathbf{1}_{\mathrm{astro,Delay}}$ und $\mathbf{1}_{\mathrm{astro,PTA}}$ (Triangulation über Pfad- und Timingdaten, Abschnitt X.9.2). (optional) $\mathbf{1}_{\mathrm{Front}}$ falls interventional messbar (Definition X.4.2.4); (optional) $\mathbf{1}_{\mathrm{QNEC}}$ in frontnahen Regimen (Definition X.4.2.3).

Kosmo: $\mathbf{1}_{\mathrm{cosmo,dist}}$, $\mathbf{1}_{\mathrm{cosmo},\chi}$, $\mathbf{1}_{\mathrm{cosmo,null}}$ (Nulltest-Kette Distanz $\oplus$ Chronometer $\oplus$ Drift, Formelkästen X.6.3.1 bis X.6.3.3; Blueprint Algorithmus X.9.3.1).

Brücke: Der Brücken-Test ist nur bei erfüllten Voraussetzungen $\mathbf{1}_{\mathrm{pre}} = 1$ lizenziert (insb. erfüllte Proxy-/Frontbedingungen; siehe Pass/Fail-Semantik und Entscheidungsbaum in Abschnitt X.7.1 und Korollar X.7.6.1). Dann gilt: $\Delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X}) \leq \varepsilon_{\mathrm{bridge}}$ (siehe Formelkasten X.7.2.1) und hoher Score $\mathcal{G}_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X})$ (siehe Formelkasten X.9.5.1).

Ausblick. Für reale Datensätze empfehlen wir, `FBAKIT` (Abschnitt X.9.4) beizulegen und $\mathcal{G}_{\mathrm{bridge}}$ stets gemeinsam mit den binären Indikatoren zu berichten. So bleiben sowohl harte Falsifikationsentscheide als auch Diagnoseinformation reproduzierbar verfügbar.

X.10 Schluss: Brückenstatus, Entscheidkriterien & offene Probleme

Dieses Schlusskapitel fixiert den *Status* der Brücke als operatives Prüfgerüst und macht die *Entscheidlogik* explizit: Was wird binär als bestanden/nicht bestanden bewertet, welche stetigen Größen werden als Diagnose mitgeführt, und welche offenen Punkte bestimmen die nächste Messpriorität? Damit schließt das Kapitel den Kreis von der formalen Brücke (Kapitel X.3) über H-Gates/Proxies (Kapitel X.4) zum Rechenkalkül (Kapitel X.5) und den Vorhersage- und Protokollmodulen (Kapitel X.6, X.7 und X.9).

X.10.1 Kernresultate & Brückenstatus

Zum Abschluss fassen wir die tragenden Resultate zusammen und verorten sie im Gefüge der Kapitel X.3 bis X.7 und X.9. Der Erzählfaden ist bewusst knapp: zuerst die drei Pfeiler der Brücke, danach die operativen Bausteine, die daraus eine Pass/Fail-Struktur machen.

Pfeiler. Drei interne Aussagen tragen die Brücke: DPI- und Kegelkompatibilität (Lemma X.3.4.1), Brückensatz (Existenz und Restfreiheit bis Isometrie) (Lemma X.3.5.1) und GKLS-Kegelverträglichkeit im Minkowski-Limes (Korollar X.3.6.1). H-Gates (Definition X.4.1.1 und Lemma X.4.1.1) fixieren die Darstellungsfreiheit, Proxies (Definitionen X.4.2.1 bis X.4.2.4) liefern die Übergangs- und Regimebedingungen (bei Proxy D: Pass/Fail über das interventional definierte Kriterium $\mathcal{J}_{\mathrm{NS}}$; $\mathcal{R}_{\mathrm{front}}$ ist Diagnosegröße, siehe Definition X.4.2.4).

Executive Summary (fachlich, knapp)

- **Brücke.** Funktoren $\mathcal{Q}$ (FBA→QM) und $\mathcal{G}$ (FBA→Geo) existieren, sind bis lokale Isometrien eindeutig und kommutieren operativ im Gültigkeitsbereich der H-Gates und Proxies (Lemma X.3.5.1 und Formelkasten X.3.3.1).
- **Monotonie & Kegel.** DPI- und Spohn-Monotonien sind mit Kegelkausalität verträglich (Lemma X.3.4.1); im flachen Grenzfall existieren keine supra-luminalen effektiven Kanäle (Korollar X.3.6.1).
- **Operativ.** Proxies A–D definieren Pass/Fail-Regeln (Abschnitt X.4.4); Algorithmen aus Kapitel X.5 liefern Observablen und Unsicherheiten; Vorhersagen sind in Kapitel X.6 katalogisiert und in Kapitel X.7 und X.9 als Protokolle und Blueprints replikationsfest gemacht.

X.10.2 Entscheidkriterien: Binär und stetig

Die Gesamtbewertung kombiniert einen binären Brückentest mit einem stetigen Gütemaß. Der binäre Test ist das minimale Falsifikationskriterium. Der Score ist Diagnose- und Vergleichsgröße, damit unterschiedliche Datensätze nicht nur als Pass/Fail, sondern auch hinsichtlich der Größe und Struktur ihrer Brückenabweichung bewertet werden können.

Formelkasten X.10.2.1: Brücken-Entscheider (binär) & Gütemaß (stetig)

Binär. Die Brücke gilt in der getesteten Domäne $\mathcal{D}$ als bestanden, wenn

$$\mathbf{1}_{\text{pre}}^{(\mathcal{D})}(\mathsf{X}) = 1 \quad \text{und} \quad \Delta_{\text{bridge}}(\mathsf{X}) \le \varepsilon_{\text{bridge}},$$

wobei $\Delta_{\text{bridge}}(\mathsf{X})$ das kovarianzgewichtete Brücken-Distanzmaß aus Formelkasten X.7.2.1 ist (mit vorab festgelegter $\Sigma(\mathsf{X})$, ggf. Pseudoinverser/Regularisierung) und die Auswertungsidentität konzeptionell durch Formelkasten X.3.3.1 festgelegt wird.

Hierbei ist $\mathbf{1}_{\text{pre}}^{(\mathcal{D})}(\mathsf{X})$ der domänenspezifische *Precondition-Indikator*:

$$\mathbf{1}_{\text{pre}}^{(\mathcal{D})}(\mathsf{X}) := \bigwedge_{p \in \mathcal{P}(\mathcal{D})} \mathbf{1}_p(\mathsf{X}),$$

wobei $\mathcal{P}(\mathcal{D})$ die in der Domäne $\mathcal{D}$ *anwendbaren* Proxy-/Setup-Indikatoren auswählt (gemäß den Pass/Fail-Regeln in Abschnitt X.4.4 und den Domänen-Blueprints in Kapitel X.9). Nicht anwendbare Indikatoren werden als `N/A` dokumentiert und gehen nicht in die Konjunktion ein.

Stetig. Zusätzlich ist der Score $\mathcal{G}_{\text{bridge}}(\mathsf{X}) \in (0, 1]$ aus **??** zu berichten.

Praktische Lesart. Der binäre Entscheider ist „harte Kante“ (Falsifikation bei erfüllten Voraussetzungen). Das stetige Maß $\mathcal{G}_{\text{bridge}}$ ist die diagnoseorientierte Ergänzung: Es erlaubt, zwischen „knapp bestanden“, „komfortabel bestanden“ und „klar verletzt“ zu unterscheiden, ohne die Pass/Fail-Logik aufzuweichen.

X.10.3 Reviewer-Flow (Replikation)

Für Peer-Review und Drittreplikation braucht es einen klaren, reproduzierbaren Ablauf, der Datenpaket, Proxy-Entscheide und Brückendiagnose zusammenführt. Der Flow ist so gewählt, dass er zuerst Regime- und Kalibrationskonsistenz prüft und erst danach die Brücke selbst bewertet. Damit wird vermieden, dass Brückenabweichungen durch bereits verletzte Proxy-Voraussetzungen fehlinterpretiert werden.

Algorithmus X.10.3.1: Reviewer-Flow (minimal, reproduzierbar)

Eingabe: Datenpaket `FBAKIT` (**??**), Algorithmen aus Kapitel X.5, Proxy-Schwellen aus Kapitel X.4.
Schritte.

1. *Integrität.* Validierung von `setup.yaml` und `observations.csv`; Rekonstruktion und Plausibilisierung der Kovarianzen (Schema aus Formelkasten X.5.4.1).
2. *Proxies & Preconditions.* Auswertung der Proxy-Indikatoren (inkl. expliziter Kennzeichnung `N/A`) gemäß Definitionen X.4.2.1 bis X.4.2.4 sowie aller domänenspezifischen Setup-Indikatoren aus Kapitel X.9. Daraus Bestimmung des domänenspezifischen Precondition-Indikators $\mathbf{1}_{\mathrm{pre}}^{(\mathcal{D})}(\mathsf{X})$ (siehe Formelkasten X.10.2.1).
3. *Brücke.* Berechne $\mathcal{P}_{\mathrm{QM}}(\mathsf{X})$ und $\mathcal{P}_{\mathrm{Geo}}(\mathsf{X})$, daraus $\delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X})$, $\Sigma(\mathsf{X})$ und $\Delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X})$ (Kriterium Formelkasten X.7.2.1) sowie $\mathcal{G}_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X})$ (**??**).
4. *Entscheid.* Binärtest über $\mathbf{1}_{\mathrm{pre}}^{(\mathcal{D})}(\mathsf{X})$ und $\Delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X})$ plus Score berichten (siehe Formelkasten X.10.2.1); Abweichungen entlang der Proxy-Kanäle diagnostizieren und den passenden Protokollen aus Kapitel X.7 und X.9 zuordnen.

Ausgabe: Pass/Fail, $\mathcal{G}_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X})$, Fehlerbudget und Diagnosepfad.

X.10.4 Offene Probleme & Forschungsagenda

Die Brücke legt gezielt testbare Annahmen offen. Offen bleibt nicht, *ob* man testen kann, sondern *wie robust* die Tests in Grenzregimen sind und welche Messstrategien dort die Proxy- und Brückenentscheidungen stabil halten.

Offene Probleme & Forschungsfragen

(O1) Nicht-Markov-Regime. Robustheit von Lemma X.3.4.1 unter stark zeitnichtlokalen Dynamiken bei nur stückweise CPTP-Evolution; Operationalisierung von „unselektiert“ bei nichttrivialen Record-/Memory-Kanälen.

(O2) Starke Fronten und Horizonte. Kalibration und Proxy-Bestimmung nahe starker Stau-Fronten; konsistente Wahl von N_B bei großen Gradienten, inklusive kontrollierter Pfadunsicherheiten in Delay-Integralen.

(O3) QNEC-Proxy. Rauschrobuste Schätzer für S_k'' (oder Surrogatentropien) und kalibrationsstabile Bestimmung von κ in Definition X.4.2.3; Trennung von Schätzfehlern und echter Nullflussverletzung.

(O4) H-Gate-Kreuzbasen. Eindeutigkeit jenseits lokaler Isometrien in stark gekoppelten Vielteilersystemen und kontrollierbare Tomographie-Schemata für Definition X.4.1.1 bei begrenzter Messauflösung.

(O5) TDI-Entkopplung. Gemeinsamer Fit $\{H_\chi, d_L, d_A, \dot{z}_\chi\}$ mit lokalen Proxies; systematische Degeneracy-Breaker im Niedrig-z-Regime und robuste Trennung von Photonenverlusten/Frontproblemen vs. echter χ-Dynamik (siehe Formelkästen X.6.3.2 und X.6.3.3 und Definition X.4.2.4).

X.10.5 Roadmap (nächste Meilensteine)

Aus den offenen Punkten und den experimentellen Kapiteln folgt eine priorisierte Abfolge mit klaren Deliverables. Der gemeinsame Nenner ist immer derselbe: eine veröffentlichte Eingabespezifikation, Pass/Fail-Indikatoren und eine dokumentierte Brückendiagnose.

Roadmap - nächste Meilensteine

- **Labor (zuerst).** DPI- und Spohn-Tests mit strikter Unselektiertheit; GKLS-Strukturcheck (PSD); H-Gate-Kreuzcheck über Formelkasten X.4.3.1; (optional) Landauer-Kalibration Θ über zwei Plattformen zur Metrologie-Robustheit.
- **Astro (danach).** Triangulation N_B: Profil $\to$ Delay $\to$ Timing (out-of-sample, Kapitel X.9); KMS/Closure als Stationaritätsanker; (optional) QNEC-nahe Checks in frontnahen Regimen.
- **Kosmo (abschließend, sobald verfügbar).** Gemeinsame Berichterstattung von $\{H_\chi, d_L, d_A, \dot{z}_\chi\}$ inklusive Dualitäts- und Drift-Residualen; Aggregation von $\mathcal{G}_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X})$ über Datensätze mit explizitem Niedrig-z-Proxy-Gegencheck (Tolman/Front).

X.10.6 Meta-Kohärenz & Schlussbemerkung

Im Gültigkeitsbereich der Proxies und bei kleiner Brückenabweichung reproduziert die Brücke die Standardrelationen. Abweichungen sind dann keine Deutungsspielräume, sondern präzise lokalisierbare Konsequenzen: entweder Proxy-Verletzungen (Regimeproblem) oder eine echte Brückeninkonsistenz (Kommutativitätsbruch).

Korollar X.10.6.1: Meta-Kohärenzsatz (programmatisch)

Gilt $\mathbf{1}_{\mathrm{pre}}^{(\mathcal{D})}(\mathsf{X}) = 1$ und $\Delta_{\mathrm{bridge}}(\mathsf{X}) \le \varepsilon_{\mathrm{bridge}}$, dann ist die FBA-Auswertung im getesteten Regime empirisch äquivalent zur Standard-QM und Standard-ART. Die zusätzliche FBA-Struktur (Budgets und Proxies) wirkt dann als testbare Diagnostik, ohne Widerspruch zu Standardvorhersagen zu erzeugen.

Schluss. Die Brücke FBA $\to$ QM $\leftrightarrow$ ART ist hier nicht als Interpretation, sondern als Rechen- und Prüfarchitektur formuliert: $\mathcal{P}$ erzeugt Observablen, Proxies lizenzieren Regime, und Δ_{bridge} entscheidet die Kommutativität domänenspezifisch. Damit ist klar, was „Fortschritt“ im Programm bedeutet: nicht mehr Parametrik, sondern *mehr unabhängige, orthogonale* Pass/Fail-Tests, die Failure-Modes trennen und Replikation ermöglichen.

X.11 Anhang: Überblick über die FBA-Reihe (Teile I–X)

Klick auf den Titel zum Download des PDF

1. ***Teil I*: FBA-Grundlagen: Abfolge, Budget, Eigenzeit & Pfeile.** *Ziel:* Basisschicht bereitstellen: Abfolge, Budget, Eigenzeit/Alterung, Front und operativer Zeitpfeil (DPI); Minkowski-Limes aus der Budget-Quadrik; zulässige Dynamik und Lokalität/No-Signalling. *Import:* – (Referenz für alle Folgeteile). *Erweiterung:* Schnittstellenverträge, Pass/Fail-Checklisten, Lesefaden.
2. ***Teil II*: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie.** *Ziel:* Eigenzeit/Quadrik operativ fassen und Geodäten ableiten. *Import:* Grundlagen (Abfolge, Budget, Eigenzeit, Front/DPI). *Erweiterung:* glatter Limes, Variationsprinzip auf Weltlinien, Kalibration κ_τ.
3. ***Teil III*: Quantenkinematik & CPTP-Kanäle.** *Ziel:* Zustandsräume und Kanäle (CPTP) samt Komposition. *Import:* Grundlagen (Budget, Kanalsicht, Komposition). *Erweiterung:* konkrete Divergenzen/Kostenfunktoren $\mathcal{C}$, Messungen und Klassik-Register.
4. ***Teil IV*: Dynamik, Messung & GKLS (offene Systeme).** *Ziel:* Kontinuierliche offene Dynamik (GKLS) und operativer Zeitpfeil. *Import:* Kanäle/DPI. *Erweiterung:* Spohn-Monotonie, stationäre/NESS-Referenzen, Flüsse $b^{\mathrm{rev}}, b^{\mathrm{irr}}, b^{\mathrm{ext}}$.
5. ***Teil V*: Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie.** *Ziel:* Lokale Feldgleichungen unter Front/Lokalität. *Import:* Front, Komposition, No-Signalling. *Erweiterung:* lokale GKLS-Generatoren, Lieb–Robinson-artige Schranken, effektive Lichtkegel.
6. ***Teil VI*: Gravitation & Geometrie aus Budgetflüssen.** *Ziel:* Geometrisierung von Budgetflüssen. *Import:* Budget-Quadrik/Eigenzeit. *Erweiterung:* effektive Metriken aus Kalibrationen (κ_t, κ_x) und internen Spannungen; Kopplung an Krümmung.
7. ***Teil VII*: Konstanten, Skalen & Renormierung.** *Ziel:* Skalenführung der Kalibrationssätze. *Import:* $c = \kappa_t/\kappa_x$, κ_τ. *Erweiterung:* Flow-Gleichungen für $\kappa_t, \kappa_x, \kappa_\tau$; Stabilität von c.
8. ***Teil VIII*: Klassischer Limes, Thermodynamik & Altern.** *Ziel:* Makroskopik aus $A[\gamma]$ (Alterung) und DPI. *Import:* Eigenzeit/Alterung, Spohn. *Erweiterung:* Entropieproduktion, Euler–Lagrange-Formen für irreversible Flüsse, effektive Transportgleichungen.
9. ***Teil IX*: Kosmische Dynamik, Time Dilation & Inflation (TDI).** *Ziel:* Kosmische Abfolge & Kalibrationsfluss. *Import:* Budget, Eigenzeit/Front. *Erweiterung:* Budgetgleichungen auf großskaligen Slices; Time-Dilation-Inflation als Kalibrationsdynamik.
10. ***Teil X*: Vorhersagen, Falsifizierbarkeit & Brücke FBA → QM ↔ ART.** *Ziel:* Testbare Differenzen und Brücken FBA ↔ QM/ART. *Import:* alle Grundlagenbausteine. *Erweiterung:* Protokolle, Grenzfalltests, überbestimmte Konsistenzrelationen (Pass/Fail).

Alle Teile der FBA-Reihe sind in deutscher und englischer Sprache verfügbar unter

https://www.frame-budget-approach.eu