

Der Frame–Budget–Ansatz (FBA)
Wie Zeit, Dynamik und Geometrie aus Budgetflüssen entstehen
Eine operative Brücke zwischen Quantenmechanik und Allgemeiner Relativitätstheorie

Teil I: FBA - Grundlagen

Dipl. Wirt.-Inf. Jens Tetzner

21. Januar 2026

Inhaltsverzeichnis

I	FBA - Grundlagen	7
I.1	Einordnung, Geltungsbereich, Notation	7
I.2	Primitive & Grundannahmen des FBA	13
I.3	Budget-Kalkül pro Schritt	18
I.4	Eigenzeit und Altern	24
I.5	Zulässige Dynamik als budgetbeschränkte Kanäle	30
I.6	Komposition, Lokalität & No-Signalling	37
I.7	Einordnung zu Standard-Sichten	43
I.8	Schnittstellen zu den Fachabhandlungen (Teile II bis X)	47
I.9	Zusammenfassung & Checkliste (Pass/Fail)	53
I.10	Anhang: Überblick über die FBA-Reihe (Teile I–X)	61

Was ist Zeit?

Zeit begegnet uns als etwas Selbstverständliches und entzieht sich doch jeder einfachen Definition. Im Alltag ist sie für die einen eher ein Fluss im Hintergrund, für die anderen ein elementarer Taktgeber; in der Erfahrung trennt sie unser „Jetzt“ von einem „Davor“ und einem „Danach“; im Denken wirkt sie bisweilen wie Schicksal. Wir reden von ihr, als wäre sie ein Ding („Zeit ist Geld“), fantasieren von ihr als einer – zumindest theoretisch – bereisbaren Dimension und akzeptieren sie doch meist als etwas, das eben *einfach da* ist.

Aber muss Zeit überhaupt zum Wesen der Existenz gehören? Ließe sie sich getrennt von unserer Realität, unabhängig von allem Seienden denken? Oder anders gefragt: Würde Zeit auch dann „vergehen“, wenn nichts existierte, und gäbe es umgekehrt *etwas*, wenn es keine Zeit gäbe? Gleicht sie eher einem Fluss im Hintergrund unserer Welt, oder ist sie die Bühne, auf der alles, was geschieht, überhaupt erst möglich wird? Sprechen wir zurecht von einer mit dem *Raum* verknüpften vierten Dimension? Und falls ja: Ist ihre Richtung fundamental oder könnte sie in geeigneten Beschreibungen sogar umkehrbar sein?

Klassische Antworten und offene Fragen

In der Physik stehen drei vertraute Lesarten nebeneinander: (i) Newtons universelle Außenzeit, (ii) Einsteins Raumzeit mit relativer Gleichzeitigkeit und Eigenzeit entlang von Weltlinien, (iii) das Blockuniversum, das die Vierdimensionalität „auf einmal“ betrachtet.

Fruchtbar sind sie alle und doch bleiben fundamentale Fragen offen: Woher kommen die für uns erlebbare Richtung und die (scheinbar) unumstößliche Irreversibilität? Warum gibt es eine maximale Ausbreitungsgeschwindigkeit und die Lichtkegelstruktur? Wie entsteht relativistische Geometrie aus operativen Ressourcen statt als Metrikpostulat? Und wie lässt sich das Ganze konsistent mit Quantenmechanik zusammendenken?

Intuition – und wie wir sie formalisieren

Um diesen offenen Fragen auf eine neue Art zu begegnen, wählen wir einen Perspektivwechsel, der bei einer schlichten Beobachtung ansetzt: **Zeit und Veränderung gehören zusammen.** Wo sich etwas ändert, ordnen wir in „vorher“ und „nachher“. Umgekehrt gilt: Wo sich nichts ändert, verschwindet Unterscheidbarkeit – und damit verliert das Wort „Zeit“ seinen *operativen* Sinn. Zeit zeigt sich so in zwei Gestalten: als Ausdruck von *Ordnung* (was folgt auf was?) und als *Maß* (wie viel hat sich getan?).

Anstatt weiterhin auf eine mögliche „kleinste Zeiteinheit“ zu schauen, fragen wir daher: *Was ist die denkbar kleinste Veränderung, die überhaupt noch als Veränderung zählt?*

Denn jede Veränderung lässt sich gedanklich weiter zerlegen – bis zu einer Grenze: zu einem Punkt, an dem ein „Schritt“ gerade eben noch einen Zustand von seinem Nachfolger unterscheidbar macht. Ein Schritt kleiner, und wir hätten Ununterscheidbarkeit.¹

Denken wir Veränderungen also hinreichend fein, landen wir bei *minimal unterscheidbaren* Zuständen, die in ihrer Abfolge überhaupt erst ein „Jetzt“ von einem „Davor“ und einem „Danach“ trennen. Wie die Einzelbilder eines Films hat ein solcher Zustand keine „Dauer“ im narrativen Sinn: Er *ist* – bis er durch eine gerade eben noch unterscheidbare Aktualisierung

¹Wichtig ist: Bei allem philosophischen Potenzial dieser Sichtweise ist diese Grenze keine metaphysische Behauptung über das „Wesen der Welt“, sondern in der Realität vielmehr eine *operative* Aussage, die daran hängt, was ein konkretes Mess- und Kalibrationsschema als Unterschied überhaupt *registrieren* kann.

in einen neuen Zustand übergeht. Nicht weil die Welt „in Bilder zerfällt“, sondern weil unsere Beschreibung dort eine natürliche Auflösung erreicht, wo „gleich“ und „anders“ nicht mehr sinnvoll trennbar sind.

Gerahmt von ihrem jeweiligen Vorgänger und Nachfolger bilden solche Zustände eine Abfolge monoton verknüpfter, minimal unterscheidbarer Aktualisierungen – die Grundbausteine dessen, was wir „Vorher, Jetzt und Nachher“ nennen.

Unsere Sicht auf einen solchen (operativ als gleich erkannten) Zustand nennen wir – in Anlehnung an die Film-Analogie – einen *Frame*: ein „Schnappschuss“ der Welt relativ zu einer vorab festgelegten Auflösung. Den Übergang von einem Frame in den nächsten nennen wir ein *Minimalereignis* (ME): die kleinste im Protokoll unterscheidbare Veränderung, die aus „gleich“ ein „anders“ macht.

Nun kommt der zweite, entscheidende Schritt hinzu: In der von uns beobachtbaren Welt ist kein Übergang völlig kostenlos. Auch das Minimalereignis hat einen Preis – nicht im ökonomischen Sinn, sondern als Aufwand an Realisierbarkeit: Das Potenzial, überhaupt einen Unterschied hervorzubringen, ist ein knappes Gut, das wir *Budget* nennen. Typischerweise fließt ein Teil dieses Budgets *intern* (Selbstveränderung) und ein Teil *extern* (Änderung von Bezügen: Lage, Relation, Ordnung). Außerdem kann ein Anteil des internen Einsatzes irreversibel sein – was uns später zur *Alterung* im physikalischen Sinn führt.

In dieser Lesart ist Zeit keine Substanz, sondern die *aufaddierte, budgetierte innere Leistung* entlang eines Weges durch die Folge der Frames: der „**Frame-Budget-Ansatz**“ (FBA).

Und genau hier zeigt die Idee Zähne – noch bevor irgendeine Metrik postuliert wird: Aus sauberer Kalibration und Budgetbilanz folgen zwei harte Konsequenzen. Erstens gibt es eine praktische Grenze, wie schnell sich Veränderungen von A nach B durchsetzen können – eine *Front*, festgelegt durch Kalibration. Zweitens ergibt sich die Richtung des Geschehens nicht aus einem vorgegebenen Pfeil, sondern aus der Tatsache, dass bestimmte Anteile des Einsatzes nicht kostenlos rückgängig zu machen sind.

Wenn man es in drei knappen Sätzen festhalten will: (i) Realität erscheint *operativ* als Abfolge von Frames; Unterscheidbarkeit entsteht durch Minimalereignisse. (ii) Jeder Übergang kontiert Budget, intern wie extern – und kann irreversibel sein. (iii) Aus Kalibration und Budgetbilanz folgen Front, Eigenzeit und (im geeigneten Limes) die relativistische Geometrie.

Was genau bringt uns das?

Dieser Perspektivwechsel „erzählt nicht nur anders“, sondern „trägt operativ anders“:

- **Ordnung ohne Uhr:** Der Index zählt Aktualisierungen, nicht Sekunden. „Zeit“ als Messgröße entsteht erst aus integriertem *internem* Budgetfluss.
- **Front statt Postulat:** Eine Grenzgeschwindigkeit fällt als Kalibrationsverhältnis aus Messprotokollen heraus – nicht als metaphysisches Axiom.
- **Pfeil aus Monotonie:** Irreversibilität wird als Budget- und Informationsmonotonie operational fassbar (unselektiv; Selektion/Feedback markieren einen Protokollwechsel).

Der Punkt ist: Der FBA will nicht einfach „alles umbenennen“. Vielmehr will er dort *ableiten*, wo bisher oft *gesetzt* wird – und dort eine *gemeinsame operative Grammatik* anbieten, wo bisher *zwei Sprachen* gesprochen werden (QM vs. Geometrie).

Vorgriff: Was der FBA erklärt – und woran er scheitern kann

Und hier kommt nun der „Spoiler“: Ziehen wir das wirklich durch, nehmen Frames, Minimalereignisse und Budget tatsächlich ernst *und* kalibrieren sauber, dann müssen Lichtkegel, Eigenzeit, Zeitpfeil und zulässige Dynamik nicht als getrennte Postulate eingeführt werden, sondern ergeben sich als eine zusammenhängende Bilanzlogik.

Das ist mehr als nur ein schönes Bild: Es erzeugt *überbestimmte* Konsistenzrelationen zwischen Geometrie, Dynamik und Dissipation. Genau daran kann der Ansatz scheitern – und genau dadurch wird er physikalisch interessant: Entweder die Relationen schließen sich in realistischen Protokollen, oder der FBA ist schlicht falsch.

Damit werfen wir als kurzen Vorgriff einen Blick auf die wichtigsten Implikationen des FBA. Die zugehörigen Details werden in den Teilen II–X dargelegt;² hier zunächst nur einige Schlaglichter:

- **Kalibration zuerst:** „Kosten pro Dauer/Distanz“ fixieren operativ, was als c messbar wird und wie Auflösung an Protokolle gebunden ist. Damit wird c nicht länger nur postuliert, sondern als Kalibrationsverhältnis *ableit- und erklärbar*.
- **Lichtkegel als Bilanz:** Front + Eigenzeit-Kontierung \Rightarrow Minkowski-Struktur im reversiblen Limes; Krümmung erscheint als Inhomogenität von Flüssen und Kalibrationen.
- **QM aus zulässigen Kanälen:** Dynamik als budgetbeschränkte Prozesse (diskret CPTP, kontinuierlich GKLS); Messung als kontrolliertes Coarse-Graining statt Mystik.
- **Zeitpfeil & Thermodynamik:** Der zweite Hauptsatz wird *operativ* fassbar als Monotonie (DPI/Spohn) für *unselektive* Beschreibungen; „Altern“ erscheint als integrierte Irreversibilität – zusätzlich zur Eigenzeit.
- **Effektive Gravitation:** Geometrie und Dynamik sind nicht nur durch „Massendichte“ (im naiven Sinn) bestimmt, sondern erscheinen als Konsequenz von Budget-Geometrie; Horizonte lassen sich als „Budget-Schnittflächen“ mit Entropiesignaturen lesen.
- **Kosmische Skalen:** Zeitdilatations-induzierte Kalibrationseffekte liefern Nulltests jenseits des Standardbildes (Expansion, Drift, Dualitäten) und erlauben eine Frühphasen-Beschleunigung *ohne* postulierte Inflation. In derselben Logik wird der „Singularitätsdruck“ entschärft: Der Ursprung erscheint als Regime-/Kalibrationsgrenze statt als zwingender „Punkt der Erklärungsnot“.
- **Konstanten als Regime-Kalibrationen:** \hbar, c, G gelten als Normierungen im jeweiligen Regime; „Laufen“ bedeutet Skalenabhängigkeit der Kalibrationsätze, nicht zwingend eine „Zeitvariation der Natur“.
- **Brückentests:** Abbildungen $\text{FBA} \rightarrow \text{QM}$ und $\text{FBA} \rightarrow \text{Geo}$ liefern kommutative/in-kommutative Diagnosen – gebaut für Falsifikation statt Folklore.

²Ein Überblick über alle Teile der FBA-Abhandlung inklusive Downloadlinks findet sich in Kapitel I.10 dieses Dokuments.

Wer eine schnelle Landkarte will, kann hier schon querlesen: ^{3 4 5 6 7 8 9}. Ein Überblick über alle Teile der FBA-Abhandlung inklusive Downloadlinks findet sich in Kapitel I.10 dieses Dokuments.

Was diese Abhandlung leistet

Der vorliegende Teil I schafft die formalen Grundlagen des FBA so, dass die späteren Teile darauf aufbauen können, ohne neue Meta-Annahmen einzuführen. Bei allem nötigen Formalismus versuchen wir, erzählerisch überzuleiten und zu motivieren, *warum* der nächste Schritt nötig, sinnvoll oder gar zwingend ist, und fassen dann präzise, *was* genau behauptet wird.

Ein kurzer Wegweiser:

- **Kapitel I.1** Einordnung, Geltungsbereich, Notation.
- **Kapitel I.2** Primitive: Zustände, Minimalereignisse, partielle Kausalordnung.
- **Kapitel I.3** Budget-Kalkül pro Schritt; Vorbereitung der Frontschränke.
- **Kapitel I.4** Eigenzeit aus internem Budget; Alterung aus Irreversibilität; Quadrik im Limes.
- **Kapitel I.5** Zulässige Dynamik als budgetbeschränkte Kanäle; operativer Zeitpfeil.
- **Kapitel I.6** Komposition, Lokalität, No-Signalling.
- **Kapitel I.8** Schnittstellen zu den Teilen II–X;
- **Kapitel I.9** Pass/Fail-Checkliste.

Erwartungsmanagement

An dieser Stelle sollte vielleicht noch einmal klar gezogen werden: Der FBA behauptet nicht, dass Zeit „nur“ Information sei. Er bietet vielmehr ein Denkmodell an, bei dem *die Messgröße Zeit* als *integrierter interner Budgetfluss* entsteht. Damit werden Mikrodynamik (Kanäle, Divergenzen, Dissipation) und Makrogeometrie (Eigenzeit, Lichtkegel) in einem operativen Rahmen gekoppelt. Die Minkowski-Struktur im reversiblen Limes ist dann keine Überraschung, sondern eine Bilanzidentität (unter den jeweils angegebenen Kalibrations- und Regularitätsannahmen). Umgekehrt ist jede Verletzung der Budgetbilanz ein rotes Tuch: operativ sichtbar als Superluminalität, als „kostenlose“ Wiederherstellung von Unterscheidbarkeit oder als nicht-physikalische Ressourcenvermehrung.

³Siehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Minkowski & Kalibration.

⁴Siehe FBA Teil III: Quantenkinematik & CPTP-Kanäle, Kanäle/QM.

⁵Siehe FBA Teil V: Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie, Lokalität & Feldtheorie.

⁶Siehe FBA Teil VI: Gravitation & Geometrie aus Budgetflüssen, Gravitation.

⁷Siehe FBA Teil VIII: Klassischer Limes, Thermodynamik & Altern, Thermo & Limes.

⁸Siehe FBA Teil IX: Kosmische Dynamik, Time Dilation & Inflation (TDI), Kosmologie.

⁹Siehe FBA Teil X: Vorhersagen, Falsifizierbarkeit & Brücke FBA → QM ↔ ART, Tests/Brücke.

Von der Theorie zur Physik: Kalibration und Vorhersagen

Durch *Kalibration* der Budgets an Messprozeduren wird die Theorie experimentierbar. Externe Kontierung koppelt Koordinatendauer und Reichweitzuwachs und definiert so c ; interne Kontierung koppelt an Freiheitsgrade und Dynamik (Hamilton- und Lindblad-Anteile). Daraus folgen überprüfbare Signaturen: Zeitdilatation als Budgetumverteilung zwischen extern und intern; Alterung als integrale Dissipation; Lieb–Robinson-artige Ausbreitungsschranken als makroskopische Manifestation der Front.

Wie geht es weiter?

Direkt nach diesem Vorwort beginnen wir mit klaren Definitionen und darauf aufbauenden Ableitungen. Wir sprechen bewusst von *Primitiven* und *operativen Grundannahmen*, motiviert aus einfacher Intuition und anschließend formal belastbar gefasst. Jede formale Box wird gerahmt: kurz genug, um den Lesefaden zu halten; präzise genug, um später nichts „nachzutragen“. Wir starten mit der Bühne (Zustände, Ereignisse, Ordnung) und entwickeln daraus Schritt für Schritt Buchhaltung, Pfeil – und schließlich die Geometrie der Zeit.

Ein Überblick über alle auf diesem Grundlagen-Teil aufbauenden Inhalte der Teile II bis X (inklusive Downloadlinks) findet sich in Kapitel I.10 dieses Dokuments.

Teil I

FBA - Grundlagen

I.1 Einordnung, Geltungsbereich, Notation

I.1.1 Ziel & Lesefaden

Zeit verstehen wir im Frame-Budget-Ansatz (FBA) als *Bilanzgröße*: Die Welt aktualisiert sich in diskreten *Aktualisierungsschritten*; ein Schritt kann aus einer oder mehreren kleinsten realisierten Änderungen (Minimalereignissen) bestehen. Jeder Schritt verbraucht ein Budget, das wir in *intern* (Eigenfortschritt) und *extern* (Neuordnung von Relationen/Ort) gliedern. Ein irreversibler Teil des internen Budgets akkumuliert als *Alterung*. Dieser Kopfteil liefert die Begriffe und die minimale Mathematik, um diese Idee präzise und anschlussfähig zu machen – ohne Vorausgriff auf spezielle Modelle aus den Folgeabhandlungen.

Bevor wir in Definitionen springen, skizzieren wir den roten Faden dieses Kapitels: Zunächst wird die Bühne (globale Zustände und Sprünge) gesetzt, dann werden Akteure und Messgrößen eingeführt und schließlich die metrologische Kalibration verankert.^{10 11}

Was man aus diesem Kapitel mitnehmen sollte

1. **Bühne:** Globale Zustände U_n bilden eine Abfolge; jeder Sprung $U_n \rightarrow U_{n+1}$ ist ein Aktualisierungsschritt, der eine oder mehrere minimale Änderungen (ME) bündeln kann.
2. **Akteure:** Subsysteme S tragen *Weltlinien* γ (Folgen von Schritt-Beteiligungen).
3. **Messgrößen:** Es gibt eine Differenzfunktion $d(U_{n+1}, U_n)$ und ein Schrittbudget ΔB_n mit Zerlegung in intern/extern; Eigenzeit und Alterung sind Summen/Integrale über interne bzw. irreversible Anteile entlang γ .
4. **Kalibration:** Messverfahren setzen „Kosten pro Dauer/Distanz“; daraus folgt eine Frontschränke und im Limes die Minkowski-Quadrik – ohne c zu postulieren.^a

^aSiehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Kap. II.5–II.7.

Die Punkte oben geben die Logikspur vor. Im nächsten Abschnitt liefern wir die Minimalbegriffe in kurzer, operativer Form; die eigentliche Kalibration (und damit die Front) folgt erst später, um nicht unbemerkt zusätzliche Annahmen hineinzumischen.

I.1.2 Begriffe (Kurzüberblick)

Die nächsten drei Boxen definieren „Bühne“, „Akteure“ und „Messgrößen“. Wir trennen bewusst die operative Lesart (was wird *gemacht*?) von der metrologischen Einbindung (wie *messen* wir es?), die erst später kalibriert wird.

¹⁰Siehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Kap. II.5–II.7.

¹¹Siehe FBA Teil V: Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie, Kap. V.4.

Globale Zustände, Abfolge, Minimalereignis

Globale Zustände U_n sind vollständige Weltkonfigurationen (operativ: alles Relevante für den nächsten Schritt ist darin kodiert).

Die **Abfolge** $\{U_n\}$ ordnet die Aktualisierung der Realität in diskrete Sprünge.

Ein **Minimalereignis (ME)** ist eine der kleinsten realisierten Änderungen; ein Schritt $U_n \rightarrow U_{n+1}$ kann ein oder mehrere MEs umfassen.

Damit ist die Bühne gesetzt; im nächsten Schritt benennen wir die Träger, entlang derer Summen/Integrale (Eigenzeit/Alterung) gebildet werden, und markieren die Beobachterrolle, ohne bereits Messprotokolle zu fixieren.

Subsysteme, Weltlinien, Beobachterperspektive

Ein **Subsystem** S ist ein wohldefinierter Teil der Weltbeschreibung (z. B. ein Feldausschnitt, ein Atom, ein Messgerät).

Eine **Weltlinie** γ von S ist die Folge der Schritte, in denen S beteiligt ist.

Beobachter sind spezielle Subsysteme mit Zugriff auf Kalibrationsprozeduren (vgl. Abschnitt I.1.4).

Nachdem Träger und Abfolge feststehen, definieren wir die Größen, die bilanziert werden. Hier wird bereits angelegt, was später als thermodynamischer Pfeil und Altersmaß präzisiert wird.¹²

Differenzfunktion, Budget, Eigenzeit, Alterung

Differenzfunktion $d(U_{n+1}, U_n) \geq 0$: misst die realisierte Änderung pro Schritt; sie ist (mindestens) subadditiv und verschwindet nur, wenn keine realisierte Änderung vorliegt.

Schrittbudget $\Delta B_n \geq 0$: kontiert die „Ressourcen“ des Schritts und zerfällt in ΔB_n^{int} (Eigenfortschritt) und ΔB_n^{ext} (Relation/Ort).

Eigenzeit $\tau[\gamma]$: Summe/Integral der internen Anteile entlang einer Weltlinie.

Alterung $A[\gamma]$: Summe/Integral des *irreversiblen* Teils der internen Anteile entlang γ .

Kommentar. Die Begriffe oben sind bewusst „modellarm“. Die formale Einbettung in zulässige Kanäle (CPTP), den Datenverarbeitungspfeil (DPI) und GKLS-Flüsse erfolgt später.^{13 14}

I.1.3 Notation & Minimalannahmen

Zwischen Begriffsrahmen und Kalibration ist es hilfreich, die Schreibweise zu fixieren; so vermeiden wir, dass argumentative Last in eine Notationskonvention rutscht.

¹²Siehe FBA Teil VIII: Klassischer Limes, Thermodynamik & Altern, Kap. VIII.6–VIII.8.

¹³Siehe FBA Teil III: Quantenkinematik & CPTP-Kanäle, Kap. III.4–III.5.

¹⁴Siehe FBA Teil IV: Dynamik & Messung (GKLS), Kap. IV.3–IV.7.

Anmerkung I.1.3.1: Notation auf einen Blick

Indizes n zählen Aktualisierungsschritte; ΔX_n meint die Größe „im Schritt $n \rightarrow n + 1$ “.

\mathbf{x} bezeichnet Orts-/Relationsanteile; $\|\cdot\|$ ist die euklidische Norm.

Zusammenhänge über viele Schritte schreiben wir als Summen $\sum_{n \in \gamma}$ (diskret) bzw. Integrale $\int d\tau$ (Limes).

d bezeichnet Differentiale im Limes; die Differenzfunktion $d(\cdot, \cdot)$ ist davon notational getrennt.

ε reservieren wir für Modell-/Schließungs-/Approx-Parameter (z. B. $\mathcal{O}(\varepsilon)$); δ_* für empirische Toleranzen/Fehlerbänder (Fenster, Bootstrap, Residuen, Pass/Fail).

Aussagen zur Robustheit unter Feinschnitt (Verfeinerung der Schrittunterteilung) sind jeweils als wohldefinierte Grenz- bzw. Additivitätsannahmen zu lesen.

I.1.4 Kalibration & Maßeinheiten (ohne Vorausgriff)

Bis hierher haben wir bewusst weder Skalen noch Einheiten festgelegt: Wir wissen *dass* es Aktualisierungsschritte gibt und *dass* Änderungen bilanziert werden sollen, aber noch nicht, wie diese abstrakten Konten mit realen Messprozeduren (Uhren, Lineale, Kommunikationsprotokolle) zusammenhängen. Genau diese Brücke heißt im FBA *Kalibration*.

Der logische Zweck dieses Abschnitts ist daher sehr eng: Wir führen *nur* die Kalibrationssätze ein, die später (i) eine beobachterseitige Koordinatenzeit-Zuweisung Δt an das *externe* Konto koppeln und (ii) eine Reichweitenänderung $\|\Delta \mathbf{x}\|$ als *extern kostenpflichtig* markieren. Aus dieser Kopplung folgt dann unmittelbar eine Frontschranke. Erst *danach* (in den Folgekapiteln) wird präzisiert, wie die interne Kontierung zur Eigenzeit führt und wie im geeigneten Limes daraus die Minkowski-Quadrik rekonstruiert wird.¹⁵

Kalibrationssätze κ

$\kappa_t > 0$: Kostenrate (Budget pro Dauer) für externe Dauer Δt .

$\kappa_x > 0$: Kostenrate (Budget pro Reichweite) für externen Reichweitzuwachs $\|\Delta \mathbf{x}\|$.

$\kappa_\tau > 0$: Kostenrate (Budget pro Eigenzeit) zur Definition von $\Delta \tau_n$ via $\Delta \tau_n = \Delta B_n^{\text{int}} / \kappa_\tau$.

Das Verhältnis $c := \kappa_t / \kappa_x$ ist die *Frontkonstante*; es entsteht aus Kalibration, nicht als Postulat.^{a b}

^aSiehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Kap. II.5.

^bSiehe FBA Teil VII: Konstanten, Skalen & Renormierung, Kap. VII.3–VII.4.

Damit ist die operative Rollenverteilung festgelegt: Δt ist (vorerst) eine *Koordinatenzeit-Zuweisung* aus *externer* Kontierung; $\Delta \tau$ ist eine *systemgebundene* Größe aus *interner* Kontierung. Was jetzt noch fehlt, ist der eine formale Schritt, der aus dieser Kopplung eine Schranke macht. Genau das leistet das nächste Lemma: Es nutzt keine Dynamik, sondern nur (a) Budgetpositivität und (b) die Definition der Kalibration.

¹⁵Siehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Kap. II.5.

Lemma I.1.4.1: Frontschränke aus Kalibration und Budgetpositivität

Angenommen, pro Schritt zerfällt das Schrittbudget in

$$\Delta B_n = \Delta B_n^{\text{int}} + \Delta B_n^{\text{ext}}, \quad \Delta B_n^{\text{int}}, \Delta B_n^{\text{ext}} \geq 0,$$

und die Kalibration koppelt externe Dauer an das externe Budget durch

$$\Delta B_n^{\text{ext}} = \kappa_t \Delta t_n, \quad \kappa_x \|\Delta \mathbf{x}_n\| \leq \Delta B_n^{\text{ext}}.$$

Dann folgt

$$\kappa_x \|\Delta \mathbf{x}_n\| \leq \kappa_t \Delta t_n \quad \Rightarrow \quad \|\Delta \mathbf{x}_n\| \leq c \Delta t_n, \quad c := \kappa_t / \kappa_x.$$

Die Aussage ist bewusst *operational*: Sie grenzt nicht „Realität“ ein, sondern die Menge der Prozesse, die bei gegebener externer Kontierung in einem Schritt als *realisierbar* gelten. Der Beweis ist entsprechend eine Ein-Zeilen-Buchhaltung; wir geben ihn als Skizze an, um den logischen Status transparent zu halten.

Beweisskizze I.1.4.1: Frontschränke aus Kalibration und Budgetpositivität

- (i) Nach Kalibration ist die pro Schritt realisierte externe Dauer Δt_n an das externe Budget gekoppelt: $\Delta B_n^{\text{ext}} = \kappa_t \Delta t_n$.
- (ii) Jede externe Reichweitenänderung $\|\Delta \mathbf{x}_n\|$ muss aus demselben externen Budget bezahlt werden; daher $\kappa_x \|\Delta \mathbf{x}_n\| \leq \Delta B_n^{\text{ext}}$.
- (iii) Kombiniert man (i) und (ii), ergibt sich $\kappa_x \|\Delta \mathbf{x}_n\| \leq \kappa_t \Delta t_n$ und damit die Behauptung.

Die operative Aussage ist: Externe Neuordnung kostet Budget und konkurriert mit externer Dauer um denselben Budgetanteil.^a

^aSiehe FBA Teil IV: Dynamik & Messung (GKLS), Kap. IV.7.

Um aus der Ein-Schritt-Schränke eine geometrische Struktur zu gewinnen, iteriert man sie entlang einer Kette von Schritten und betrachtet dann einen wohldefinierten Limes. Das nächste Korollar formuliert genau diesen Übergang: aus einer budgetkalibrierten Schranke wird eine Kegelstruktur, d. h. eine Signalfrent.

Korollar I.1.4.1: Kein Überlicht-Transport & Kegelstruktur

Iteriert man die Schranke über eine Kette von Schritten und nimmt einen kontinuierlichen Limes, so gilt für jede Weltlinie γ : $\|\mathbf{dx}\| \leq c dt$. Damit entsteht eine Kegelstruktur (Signalfrent) mit Öffnung c . Außerhalb des Kegels sind Prozesse, die ausschließlich über das extern kalibrierte Budget in endlicher dt realisiert werden, nicht erreichbar.^a

^aSiehe FBA Teil V: Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie, Kap. V.4.

Bis hierher ging es nur um das *externe* Konto. Der nächste Schritt (als Vorschau) ist nun

konzeptionell: Wenn zusätzlich die *interne* Kontierung zur Eigenzeit τ kalibriert ist und der irreversible Anteil klein bzw. separat bilanziert werden kann, dann koppelt die Frontschränke die drei Größen $(t, \mathbf{x}, \tau_{\text{rev}})$ in einer Quadrik. Wir formulieren dies an dieser Stelle bewusst als *Vorschau-Formel*; die saubere Herleitung, die Regularitätsannahmen und die Symmetrien stehen in Teil II.¹⁶

Formelkasten I.1.4.1: Budget-Quadrik und Minkowski-Limes (Vorschau)

Im (nahezu) reversiblen Limes definieren wir $d\tau_{\text{rev}} := dB_{\text{rev}}^{\text{int}}/\kappa_{\tau}$.

Unter stationärer Kalibration und kleinem irreversiblen Anteil impliziert die Bilanz zusammen mit der Front

$$(d\tau_{\text{rev}})^2 = (dt)^2 - \frac{1}{c^2} \|\mathbf{dx}\|^2 + \mathcal{O}((\Delta t)^2 + \|\Delta \mathbf{x}\|^2),$$

wobei $c = \kappa_t/\kappa_x$. Damit entsteht die Minkowski-Quadrik ohne Postulat von c .^{a b}

^aSiehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Kap. II.6–II.7.

^bSiehe FBA Teil V: Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie, Kap. V.4.

Die inhaltliche Leitlinie ist damit klar: *Kalibration* legt fest, wie Bilanzkonten in Messgrößen übersetzt werden; *Budgetpositivität* macht daraus eine Schranke; *Iteration/Limes* macht daraus eine Kegelstruktur; und erst mit der *internen* Kalibration entsteht die Quadrik.

Anmerkung I.1.4.1: Warum diese Kalibration?

Kalibrationen knüpfen abstrakte Bilanzgrößen an reale Messprozeduren (Uhren, Lineale, Kommunikationsprotokolle). So werden Frontschränke, Eigenzeit und – im reversiblen Limes – die Minkowski-Quadrik empirisch verankert. Irreversibilitätsbeiträge koppeln später an Entropieproduktion (DPI/Spohn, unselektiv) und definieren *Alterung* als integrierten irreversiblen Anteil.^a

^aSiehe FBA Teil VIII: Klassischer Limes, Thermodynamik & Altern, Kap. VIII.6–VIII.8.

I.1.5 Beispiel (Lesebrücke)

Bevor wir die formalen *Grundannahmen* formulieren, illustriert das folgende Minimalbeispiel das Zusammenspiel aus internen und externen Anteilen und macht die Rolle der Front sichtbar. Direkt danach benennen wir, welche Größen *operativ* gemessen werden und wo die Brücke zu CPTP/GKLS verläuft.

¹⁶Siehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Kap. II.6–II.7.

Zwei Qubits und ein Detektor

Ein Detektor D koppelt kurz an zwei Qubits A, B . Ein Schritt ($n \rightarrow n + 1$) besteht aus:

- (i) lokaler Wechselwirkung $A-D$ (interner Anteil bei A und D),
- (ii) Abtransport eines Signals zu B (externer Anteil, begrenzt durch die Frontschränke),
- (iii) Registrierung in B (interner Anteil bei B).

Die *Eigenzeit* von A wächst durch (i), die *Alterung* steigt, wenn die Kopplung dissipativ ist; der externe Anteil in (ii) begrenzt die Reichweite pro Dauer und führt so zu einer maximalen Ausbreitungsgeschwindigkeit c .

Operative Messlesart. (i) und (iii) sind als CPTP-Schritte mit möglicher Dissipation modellierbar; (ii) ist ein Front-limitiertes Transportprotokoll. Für die *unselektive* Beschreibung ergeben sich daraus – über DPI/Spohn für geeignete Divergenzen – gerichtete Monotonien und nichtnegative Entropieproduktion; selektive Updates/Feedback sind als Protokollwechsel (Registererweiterung/Conditioning) zu behandeln.^{17 18}

I.1.6 Was als Nächstes kommt

Als Nächstes präzisieren wir die *Primitive* (Zustände, Ereignisse, Ordnung) und die *formalen Grundannahmen*. Die hier eingeführten Begriffe bleiben unverändert; sie werden in den folgenden Kapiteln quantitativ ausgeschrieben und mit den Bilanz- und DPI-Aussagen verknüpft. Eine Übersicht, welche Detailableitungen in welchen Folgeabhandlungen stehen, bündeln wir bewusst in einer Übersichtsbox, um Fußnotenwüsten zu vermeiden:

Wegweiser zu den Folgeabhandlungen (Overview/Import)

- Quadrik und Lorentz-Symmetrien: Teil II *Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie* (Kap. II.6–II.7).
- Lichtkegel, Kausalität und lokale Feldalgebren: Teil V *Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie* (Kap. V.4–V.6).
- Zulässige Dynamik (GKLS) und Protokolle (inkl. DPI/Spohn): Teil IV *Dynamik, Messung & GKLS* (Kap. IV.3–IV.7) sowie Teil III *Quantenkinematik & CPTP-Kanäle* (Kap. III.4–III.5).
- Alterung, Thermodynamik und klassischer Limes: Teil VIII *Klassischer Limes, Thermodynamik & Altern* (Kap. VIII.6–VIII.8).
- Konstanten/Skalen und Renormierung: Teil VII *Konstanten, Skalen & Renormierung* (Kap. VII.3–VII.5).
- Pass/Fail-Kriterien und Brücken-Tests: Teil X *Vorhersagen, Falsifizierbarkeit & Brücken* (Kap. X.3–X.7).

¹⁷Siehe FBA Teil IV: Dynamik & Messung (GKLS), Kap. IV.4–IV.7.

¹⁸Siehe FBA Teil VIII: Klassischer Limes, Thermodynamik & Altern, Kap. VIII.6–VIII.7.

I.2 Primitive & Grundannahmen des FBA

Bevor wir Budgets bilanzieren (Kapitel I.3) oder Dynamik formulieren (Kapitel I.5), brauchen wir eine Bühne, auf der „ein Schritt“ überhaupt Sinn ergibt. Diese Bühne besteht aus drei Bausteinen: (i) *globalen Zuständen* und ihrer *Abfolge* in Aktualisierungsschritten, die durch Minimalereignisse getragen werden, (ii) einer *kausalen Struktur* samt dem Recht, kausal unabhängige Änderungen zu *koaktualisieren*, und (iii) einer *Differenzfunktion*, die „wie viel ist passiert?“ pro Schritt in einer minimalen, modellunabhängigen Weise quantifiziert. Die folgenden Grundannahmen sind bewusst knapp: Sie sagen nicht, *was* die Welt ist, sondern nur, *wie* wir Änderungen zählen. Alles Folgende – Budgets, Front, Eigenzeit – wird darauf aufsetzen.

I.2.1 Globale Zustände, Frames und Minimalereignisse

Zuerst fixieren wir, was wir unter einem „Moment der Welt“ verstehen, wie solche Momente in einer *Abfolge* stehen und was ein *Minimalereignis* leistet. Der „Frame“ ist die operative Brille, mit der wir den nächsten Schritt vorbereiten – hier werden später Budgets kontiert und Kalibrationen gewählt.

Definition I.2.1.1: Grundannahmen (A1–A4) und Terminologie: globale Zustände, Frames, Minimalereignisse

Grundannahme (A1) Zustandsraum. Es existiert ein Zustandsraum \mathcal{U} . Ein Element $U \in \mathcal{U}$ heißt *globaler Zustand*.

Grundannahme (A2) Aktualisierungsschritte und Minimalereignisse. Die Realität aktualisiert sich als Folge $\{U_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ globaler Zustände. Der Übergang $U_n \rightarrow U_{n+1}$ heißt *Aktualisierungsschritt*. Es gibt eine Menge elementarer Änderungen ME (Minimalereignisse). In einer gegebenen Darstellung (Frame) wird jedem Schritt $n \rightarrow n+1$ eine endliche Menge $E_n \subset \text{ME}$ zugeordnet, so dass der Schritt $U_n \rightarrow U_{n+1}$ in diesem Sinne genau die koaktualisierten Minimalereignisse E_n realisiert. Der Index n zählt Aktualisierungen, nicht Sekunden.

Grundannahme (A3) Frames $\{F_n\}$. Ein *Frame* F_n ist die operationale Sicht auf U_n einschließlich der gewählten Kontierung/Kalibration des anstehenden Schritts $n \rightarrow n+1$ (vgl. Kapitel I.3).

Grundannahme (A4) Subsysteme & Weltlinien. Eine Zerlegung in disjunkte Subsysteme $\{S^i\}$ ist gegeben. Für ein Subsystem S heißt seine *Weltlinie* γ_S die (teilweise) Folge der Schritte, in denen S beteiligt ist (d. h. in denen mindestens ein $e \in E_n$ S betrifft).

Terminologie. Die Elemente $e \in \text{ME}$ heißen *Minimalereignisse*; die Mengen E_n heißen (*koaktualisierte*) *Ereignismengen* eines Schritts. Diese Begriffe sind rein operativ: Sie fixieren, *wie* Änderungen gezählt werden, nicht *woraus* sie ontologisch bestehen.

Anmerkung I.2.1.1: Warum kein Zeitparameter?

Die Abfolge $\{U_n\}$ ist primär und rein ordinal. Eine metrische Zeit entsteht erst durch Kalibration von Budgets (Eigenzeit) bzw. externer Kontierung (Δt); das hält „Ordnung“ (Was kommt vor was?) und „Maß“ (Wie viel?) sauber getrennt. Eine Rekonstruktion der Minkowski-Geometrie erfolgt *nach* der Kalibration, nicht davor.^a

^aSiehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Kap. II.6–II.7.

I.2.2 Abfolge, Kausalordnung und Koaktualisierung

Nun legen wir fest, welche Einschränkungen die Abfolge $\{U_n\}$ respektieren muss, damit sie physikalisch sinnvoll ist. Die zentrale Idee: Nur die *kausale* Reihenfolge ist physikalisch; die Feingranularität (wie viele Zwischenschritte wir einziehen) ist ein Darstellungsfreiheitsgrad.

Definition I.2.2.1: Kausalstruktur und Koaktualisierung

(A5) Partielle Ordnung. Die Menge der Minimalereignisse trägt eine partielle Ordnung (ME, \preceq) , die kausale Abhängigkeiten wiedergibt. Wir schreiben

$$e \parallel e' :\iff \neg(e \preceq e') \wedge \neg(e' \preceq e),$$

und nennen e und e' dann *inkomparabel* bzw. *kausal unverbunden* (dies ist eine Aussage über Ordnung, nicht über statistische (Un-)Korrelation).

(A6) Koaktualisierung (Darstellungsfreiheit). Für $e \parallel e'$ ist ihre Reihenfolge in der Schrittfolge $\{U_n\}$ ein *Darstellungsartefakt*: Sie dürfen in einer *gröberen* Darstellung demselben Schritt (derselben Menge E_n) zugeordnet oder in einer *feineren* Darstellung auf verschiedene Schritte verteilt werden, *sofern* die betrachteten Größen nur von Anfang/Ende und (sobald eingeführt) von refinement-invarianten Bilanzsummen abhängen. No-Signalling wird später präzisiert.^a

^aSiehe FBA Teil V: Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie, Kap. V.4.

Im FBA behandeln wir *Verfeinerungen* eines Schritts als Darstellungsfreiheit: Das Einziehen oder Entfernen reiner Zwischenschritte soll keine eigenständige Physik erzeugen. Diese Idee fassen wir als Äquivalenzbegriff.

Definition I.2.2.2: Refinement-Äquivalenz und refinement-invariante Größen

Eine (endliche) Darstellung eines Übergangs $U \rightarrow U'$ ist eine endliche Kette

$$U = V_0 \rightarrow V_1 \rightarrow \dots \rightarrow V_m = U'.$$

Eine Darstellung $U = V_0 \rightarrow \dots \rightarrow V_m = U'$ heißt *Refinement* der „groben“ Darstellung $U \rightarrow U'$, wenn sie dieselben Endpunkte U, U' besitzt (d. h. nur durch Einfügen von Zwischenschritten entsteht). Zwei Darstellungen heißen *refinement-äquivalent*, geschrieben \sim_{ref} , wenn sie durch endliches Einfügen/Entfernen von Zwischenschritten ineinander überführbar sind.

Eine Größe Q , die Übergängen Werte zuordnet, heißt *refinement-invariant*, wenn Q auf \sim_{ref} -Äquivalenzklassen konstant ist (äquivalent: Q ändert sich nicht unter Einfügen/Entfernen von Zwischenschritten).

Konvention/Arbeitsregel: Im Folgenden werden „operativ relevante“ Größen stets als refinement-invariant verstanden, sofern nicht ausdrücklich anders vermerkt. Sobald Budgets eingeführt sind, zählen insbesondere Gesamtbilanzen als refinement-invariant, weil sie per Konstruktion nur von der (additiven) Gesamtkontierung eines Übergangs abhängen.

Anmerkung I.2.2.1: Kommentar

Die Refinement-Äquivalenz formalisiert, dass Zwischenschritte reine Buchhaltung sein können: Sie verändern die Endpunkte nicht und (nach Einführung der Budgetkontierung) nicht die Gesamtbilanz. Damit ist es konsistent, Vorhersagen nur an \sim_{ref} -Klassen zu knüpfen.

Später, wenn Schritte als CPTP- bzw. GKLS-Entwicklung modelliert werden, passt diese Quotientierung dazu, dass zulässige Dynamiken unter Serienkomposition geschlossen sind und dass Bilanzgrößen typischerweise additiv über Kompositionen geführt werden.^a
_b

^aSiehe FBA Teil III: Quantenkinematik & CPTP-Kanäle, Kap. III.4–III.5.

^bSiehe FBA Teil IV: Dynamik & Messung (GKLS), Kap. IV.3–IV.7.

Anmerkung I.2.2.2: Was würde ohne Koaktualisierung schiefgehen?

Ohne Koaktualisierung wäre die Feingranularität der Darstellung beobachtbar. Dann könnte reine Buchhaltung scheinbar Superluminalität oder „Rückwirkungen“ erzeugen – ein Artefakt der Darstellung, nicht der Physik.^a

^aSiehe FBA Teil V: Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie, Kap. V.4.

I.2.3 Differenzfunktion und Minimaldifferenz

Damit „ein Schritt“ quantitativ Sinn ergibt, brauchen wir ein Maß dafür, *wie viel* sich zwischen U_n und U_{n+1} geändert hat – unabhängig davon, *wodurch* (intern/extern) die Änderung zustande kam. Wir verlangen nur die minimalen Strukturen, die wir später für Budget- und DPI-Argumente benötigen.

Definition I.2.3.1: Differenzfunktion und operative Minimaldifferenz

(A7) Differenzfunktion. Es gibt eine Pseudometrik $d : \mathcal{U} \times \mathcal{U} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ mit $d(U, U) = 0$, Symmetrie $d(U, V) = d(V, U)$ und Dreiecksungleichung $d(U, W) \leq d(U, V) + d(V, W)$. Operativ gilt: $d(U, V) = 0$ bedeutet, dass zwischen U und V keine realisierte (beobachtbare) Änderung vorliegt; Zustände werden insofern bis auf diese Ununterscheidbarkeit identifiziert.

(A8) Operative Minimaldifferenz. Für einen gegebenen Frame existiert eine Auflösungsgränze $\delta_{\min,*} > 0$, so dass jedes in diesem Frame als minimal aufgelöste Ereignis $e \in \text{ME}$ eine nichttriviale Änderung realisiert: Wird e in der Darstellung durch einen Übergang $V \rightarrow V'$ zwischen (globalen) Zuständen repräsentiert (typischerweise lokal unterstützt), so ist $d(e) := d(V', V) \geq \delta_{\min,*}$. $\delta_{\min,*}$ ist eine *Kalibrations- und Auflösungsgröße*, kein universelles „Zeitatom“; unter Refinement kann die effektive Schwelle (frame- und protokollabhängig) gegen 0 gehen.

Die folgenden Bilder helfen, die Rolle von $\delta_{\min,*}$ und von Summen über viele kleine Schritte zu verankern.

Pragmatisches Bild: Zähler mit Empfindlichkeit

Man denke an ein Experiment mit „Klicks“: Der Zähler registriert nur Änderungen über seiner Empfindlichkeitsschwelle $\delta_{\min,*}$. Ob wir die Entwicklung in fünf groben oder fünfzig feinen Schritten beschreiben, ändert nichts am *Summenwert* beobachtbarer Funktoren – solange Schwelle, Frame und Kalibration konsistent gehandhabt werden.

Anmerkung I.2.3.1: Kein „Zeit-Atom“

Die Minimaldifferenz ist operativ: Sie entsteht aus Messgenauigkeit und gewählter Darstellung. Der kontinuierliche Limes ist ein *Refinement-Limes*, keine vorausgesetzte dichte Zeitachse. Diese Haltung erlaubt es, Geometrie (Minkowski) aus Budgets zu *gewinnen*, statt sie zu *postulieren*.^a

^aSiehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Kap. II.6–II.7.

Zwischenfazit. Mit (A1)–(A8) haben wir die Ordnung der Ereignisse (was vor was), die Darstellungsfreiheit (Refinement) und ein Maß für „wie viel“ pro Schritt. Im nächsten Kapitel (Kapitel I.3) wird diese Struktur mit einer Bilanz versehen: Wir teilen das Schrittbudget in *intern* und *extern*, führen ein Irreversibilitätskonto ein und kalibrieren externe Kosten so,

dass eine Frontschränke und später die Minkowski-Quadrik entstehen.^{19 20}

¹⁹Siehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Kap. II.5–II.7.

²⁰Siehe FBA Teil IV: Dynamik & Messung (GKLS), Kap. IV.3–IV.7.

I.3 Budget-Kalkül pro Schritt

Mit Kapitel I.2 haben wir die Bühne: eine Abfolge globaler Zustände, minimale Kausalstruktur und ein Maß für „wie viel“ pro Schritt. Was noch fehlt, ist die *Buchhaltung*, die zwischen *Eigenfortschritt* eines Systems und *Neuordnung von Relationen/Ort* unterscheidet. Diese Trennung ist nicht Dekoration; sie trägt die späteren Konstruktionen von *Eigenzeit* und *Front* (Kapitel I.4) und macht die Minkowski-Quadrik als Limes zugänglich – ohne sie zu postulieren.²¹ Der Lesepfad dieses Kapitels ist dreistufig: (i) wir definieren das Ein-Schritt-Budget und seine Zerlegung, (ii) wir fixieren die Bilanzregeln unter Serie/Parallel/Refinement als Postulate der Budgetzuordnung, (iii) wir kalibrieren die externen Kosten und lesen daraus eine Frontschranke ab. Wichtig ist dabei stets die Status-Trennung: *Definition/Zuordnung* (was wird gezählt?) kommt vor *Kalibration* (wie wird es gemessen?).

I.3.1 Ein-Schritt-Budget: intern/extern/irreversibel

Intuitiv verbucht jeder Schritt $U_n \rightarrow U_{n+1}$ zwei Sorten Aufwand: *intern* (was beteiligte Subsysteme „in sich“ leisten) und *extern* (was es kostet, Relationen/Ort neu zu ordnen). Der interne Anteil splittet weiter in reversibel und *irreversibel* – daraus wird später *Alterung* (Kapitel I.4).

Der folgende Kasten ist der formale Kern dieser Intuition: Er legt fest, welche Konten wir pro Schritt führen. Noch ist damit keine Physik „erklärt“; wir fixieren lediglich, *wie* eine Budgetzuordnung strukturiert sein muss, damit *Eigenzeit/Front/Altern* überhaupt definierbar werden.

Definition I.3.1.1: Ein-Schritt-Budget und Zerlegung

(B1) Gesamtbudget. Jedem Übergang $U_n \rightarrow U_{n+1}$ ist ein nichtnegatives *Gesamtbudget* $\Delta B_n \geq 0$ zugeordnet.

(B2) Zerlegung (frame-relativ). Für jeden Schritt gibt es einen externen Anteil $\Delta B_n^{\text{ext}} \geq 0$ sowie interne Anteile $\Delta B_{n,S}^{\text{int}} \geq 0$ für die in diesem Schritt beteiligten Subsysteme $S \in \mathcal{S}_n$, so dass

$$\Delta B_n = \Delta B_n^{\text{ext}} + \sum_{S \in \mathcal{S}_n} \Delta B_{n,S}^{\text{int}}.$$

$\Delta B_{n,S}^{\text{int}}$ kontiert den *Eigenfortschritt* des Subsystems S (Eigenzeit-Limes entlang seiner Weltlinie), ΔB_n^{ext} kontiert den *Beziehungs-/Ortsteil* (relational). Für eine feste Weltlinie γ schreiben wir oft kurz $\Delta B_n^{\text{int}} := \Delta B_{n,S}^{\text{int}}$ mit S als dem durch γ fixierten Subsystem.

(B3) Irreversibilitätskonto. Für jedes beteiligte Subsystem zerfällt der interne Anteil weiter in

$$\Delta B_{n,S}^{\text{int}} = \Delta B_{n,S}^{\text{rev}} + \Delta B_{n,S}^{\text{irr}}, \quad \Delta B_{n,S}^{\text{irr}} \geq 0.$$

Die *Alterung* entlang γ ist das Integral (die Summe) der ΔB^{irr} -Anteile des zu γ gehörigen Subsystems.

Die Zerlegung ist frame-relativ, aber nicht beliebig: Sie ist genau so gewählt, dass sie die drei späteren Bausteine getrennt tragen kann – *Eigenzeit* (intern), *Front* (extern) und *Pfeil/Altern* (irreversibel). Der nächste Kasten macht diese Notwendigkeit explizit, damit klar bleibt,

²¹Siehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Kap. II.5–II.7.

welche Rolle die Zerlegung im Gesamtaufbau spielt.

Anmerkung I.3.1.1: Warum diese Zerlegung notwendig ist

Ohne die Zerlegung int/ext könnten wir (i) keine *Eigenzeit* definieren, die reparametrisierungsinvariant an das System gebunden ist, und (ii) keine *Front* aus den externen Kosten ableiten. Ohne rev/irr ließe sich (iii) kein operativer Zeitpfeil über Dissipation (Spohn/DPI) formulieren.^{a b}

^aSiehe FBA Teil IV: Dynamik & Messung (GKLS), Kap. IV.4–IV.7.

^bSiehe FBA Teil VIII: Klassischer Limes, Thermodynamik & Altern, Kap. VIII.6–VIII.8.

Ein kurzes Minimalbeispiel hilft, die drei Konten nicht zu vermischen: „Bewegung“ ist (im FBA-Sinn) extern, „reversible Dynamik“ intern-reversibel, und „Dissipation“ intern-irreversibel.

Minimalbeispiel: Relokation vs. Lokaldrehung

Ein Zwei-Niveau-System S wird (a) lokal unitär gedreht ($\Delta B_S^{\text{int}} = \Delta B_S^{\text{rev}} > 0$, $\Delta B^{\text{ext}} = 0$), (b) um eine Distanz $\|\Delta \mathbf{x}\|$ versetzt ($\Delta B^{\text{ext}} > 0$, interner Bedarf minimal), (c) dissipativ gekühlt ($\Delta B_S^{\text{irr}} > 0$). Nur (b) trägt zur externen Reichweitenbilanz bei; nur (c) akkumuliert *Alterung*.

I.3.2 Bilanzgleichungen: Serie, Parallel, Refinement

Buchhaltung ist nur so gut wie ihre Additivität. Serie (aufeinanderfolgende Schritte) und Parallel (disjunkte Teilprozesse) dürfen in *gewählten Budgetkalkül* weder Budget „erzeugen“ noch „vernichten“. Ebenso darf eine feinere Beschreibung (Refinement) die *Summen* nicht ändern.²²

Diese Postulate sind bewusst „trocken“: Sie sichern, dass die Konten nicht von Darstellungsartefakten abhängen. Genau dadurch werden spätere Integrale (Eigenzeit/Altern) robust, und genau dadurch lässt sich die Front sauber über viele Schritte iterieren. Der folgende Kasten fixiert die drei Invarianzen in einer Form, die direkt zu Lemma I.3.2.1 führt.

²²Lesart: (F1)–(F3) sind Postulate/Definitionen der Budgetzuordnung im FBA. Physikalischer Gehalt entsteht über die spätere Operationalisierung/Kalibration der Konten; bei unvollständiger Kontierung kann man diese Gleichungen als idealisierte Grenzform bzw. mit expliziten Toleranz-/Slack-Terms $\delta_{B,*}$ lesen, ohne das Kalkülprinzip aufzugeben.

Formelkasten I.3.2.1: Bilanzpostulate & Invarianzen (Buchhaltung)

(F1) **Serie.** Für Serienkomposition $P = P_2 \circ P_1$ gilt

$$\Delta B_P = \Delta B_{P_1} + \Delta B_{P_2}, \quad \Delta B_P^{\text{ext}} = \Delta B_{P_1}^{\text{ext}} + \Delta B_{P_2}^{\text{ext}},$$

und analog komponentenweise für die internen Konten entlang einer fixierten Weltlinie bzw. für jedes Subsystem S .

(F2) **Parallel (disjunkt).** Für disjunkte Teilprozesse $P_A \parallel P_B$ gilt additiv

$$\Delta B_{P_A \parallel P_B}^{\text{ext}} = \Delta B_{P_A}^{\text{ext}} + \Delta B_{P_B}^{\text{ext}}, \quad \Delta B_{P_A \parallel P_B, S}^{\text{int}} = \Delta B_{P_A, S}^{\text{int}} + \Delta B_{P_B, S}^{\text{int}} \quad (\text{wo definiert}).$$

(F3) **Refinement-Invarianz.** Für jede Zerlegung eines Schritts $U_n \rightarrow U_{n+1}$ in m Teil-Schritte gilt $\sum_{k=0}^{m-1} \Delta B_{(k)} = \Delta B_n$, und analog komponentenweise für ext sowie für die relevanten internen Konten (inkl. rev/irr).

Aus (F1)–(F3) folgt unmittelbar: Grob- und Feinschnitt unterscheiden sich nicht in dem, was das Budget-Kalkül als „wirklich passiert“ bilanziert. Das ist genau die Aussage, die wir im nächsten Lemma isolieren, weil sie später mehrfach als technischer Schritt benutzt wird (Eigenzeit/Altern als Summen; Frontiteration im Limes).

Lemma I.3.2.1: Refinement-Invarianz der Budgetbilanz

Unter Formelkasten I.3.2.1 sind Grob- und Feinschnitt *budgetäquivalent*. Insbesondere sind die aus ΔB^{int} (entlang einer Weltlinie) gebildete Eigenzeit und die aus ΔB^{irr} gebildete Alterung invariabel gegen jede endliche Verfeinerung.

Die Beweisskizze ist absichtlich kurz: Es ist reine Buchhaltung, keine Dynamik.

Beweisskizze I.3.2.1: Refinement-Invarianz der Budgetbilanz

Eine Verfeinerung ersetzt einen Schritt durch eine endliche Serie von Teil-Schritten. Nach (F1) addieren sich Budgets unter Serie, und nach (F3) ist die Summe über Teil-Schritte per Konstruktion gleich dem Grobschritt-Budget, auch komponentenweise. Daher können weder Eigenzeit- (Summe interner Anteile entlang γ) noch Alterungsfunktoren (Summe irreversibler Anteile entlang γ) durch reines Umsegmentieren verändert werden. Später ist diese Buchhaltung zudem konsistent mit der Darstellung zulässiger Dynamik als serielle Komposition (CPTP/GKLS).^a

^aSiehe FBA Teil IV: Dynamik & Messung (GKLS), Kap. IV.4–IV.7.

Wichtig ist dabei auch, was wir *nicht* festlegen: Die Bilanzpostulate fixieren Summen und Invarianzen, aber nicht die mikroskopische „Zuweisungspolitik“ innerhalb eines Frames. Das hält Raum für Modellierung, ohne die formale Robustheit zu verlieren.

Anmerkung I.3.2.1: Was diese Bilanz *nicht* sagt

Die Gleichungen fixieren Summen, nicht die mikroskopische Zuordnung einzelner Beiträge: interne Konten sind entlang einer Weltlinie eindeutig, aber unterschiedliche Darstellungen können die schrittweise Aufteilung variieren, solange die Summen erhalten bleiben. Kalibrationen (Abschnitt I.3.3) machen die relevanten externen Zuordnungen operational.

I.3.3 Frontschränke und Signalfreund

Externe Neuordnung kostet proportional zu Reichweite; eine beobachterseitige Koordinatenzeit-Kontierung wird durch Kalibration an das externe Konto gekoppelt. Diese Kostensätze genügen, um eine Frontschränke abzuleiten – und damit eine operative Konversionsgröße c , die später die Lichtkegelstruktur trägt.

Der logische Status ist wieder zweistufig: Zuerst definieren wir die *Kalibration* (welche externe Kontierung entspricht Δt , welche Mindestkontierung entspricht $\|\Delta \mathbf{x}\|$?). Danach ist die Frontschränke eine unmittelbare Folgerung aus derselben Budgetpositivität, die das gesamte Kalkül trägt.

Definition I.3.3.1: Kalibration und Frontkosten

Es existieren kalibrierte Kostensätze $\kappa_t, \kappa_x > 0$ der externen Kontierung, so dass

(i) eine räumliche Relationenänderung um $\|\Delta \mathbf{x}\|$ mindestens $\kappa_x \|\Delta \mathbf{x}\|$ externes Budget verlangt:

$$\kappa_x \|\Delta \mathbf{x}\| \leq \Delta B^{\text{ext}}.$$

(ii) Die beobachterseitige Koordinatenzeit-Inkrementgröße Δt ist durch die externe Kontierung im gewählten Frame kalibriert, d. h.

$$\Delta B^{\text{ext}} = \kappa_t \Delta t.$$

(Insbesondere ist Δt hier eine *Koordinatenzeit*-Zuweisung aus externer Kontierung, nicht Eigenzeit.)

Die *Frontkonstante* ist $c := \kappa_t / \kappa_x$.

Aus (i) und (ii) folgt die Schranke direkt: Reichweitzuwachs kann nicht schneller „bezahlt“ werden als externe Dauer. Das Lemma formuliert genau diese Konsequenz, ohne zusätzliche Annahmen über Dynamik, Kanäle oder Geometrie.

Lemma I.3.3.1: Frontschränke aus Budgetkontierung

Unter Definition I.3.3.1 gilt für jeden Schritt

$$\|\Delta \mathbf{x}\| \leq c \Delta t.$$

Das heißt: Reichweitenzuwachs und Koordinatenzeit sind durch die externe Budgetkontierung gekoppelt; c ist durch die Kalibration als Verhältnis κ_t/κ_x festgelegt und wird in Anwendungen experimentell/operativ bestimmt (nicht als zusätzliche Dynamikannahme benötigt).

Der Beweis ist ein Einzeiler; wir geben ihn als Skizze, um den Status als reine Buchhaltung transparent zu halten.

Beweisskizze I.3.3.1: Frontschränke aus Budgetkontierung

Aus (i) folgt $\kappa_x \|\Delta \mathbf{x}\| \leq \Delta B^{\text{ext}}$, aus (ii) $\Delta B^{\text{ext}} = \kappa_t \Delta t$.

Zusammensetzen liefert $\kappa_x \|\Delta \mathbf{x}\| \leq \kappa_t \Delta t$, also $\|\Delta \mathbf{x}\| \leq (\kappa_t/\kappa_x) \Delta t = c \Delta t$.

Refinement-Invarianz (Formelkasten I.3.2.1) sorgt dafür, dass Feinschnitt die Schranke nicht lockert.

Die Schranke ist zunächst eine *Ein-Schritt*-Aussage. Ihr geometrischer Inhalt entsteht, wenn man sie über viele Schritte iteriert und im geeigneten Limes als Kegelstruktur interpretiert. Das folgende Korollar formuliert diesen operativen Inhalt: Es geht um die (budgetgebundene) Möglichkeit, *neue* Einflüsse/Korrelationen über Reichweite aufzubauen.

Korollar I.3.3.1: Signalfront (operationaler Inhalt)

Für zwei räumlich getrennte Stationen A, B gilt: In einem Ein-Schritt-Prozess kann ohne ausreichendes externes Budget keine operational nachweisbare *Einflussnahme/-Kommunikation* von A nach B über Distanzen $\|\Delta \mathbf{x}\| > c \Delta t$ erfolgen. Insbesondere können aus *initial unkorrelierten* Präparationen (Produktzustand und keine vorgeteilte Ressource zwischen A und B) in einem Schritt keine *neuen* Korrelationen zwischen A und B über $\|\Delta \mathbf{x}\| > c \Delta t$ operational erzeugt werden.^a

Im kontinuierlichen Limes definieren c und Lemma I.3.3.1 die Vorzugsstruktur der späteren Lichtkegel; zusammen mit der internen Kalibration führt dies in Kapitel I.4 zur Minkowski-Quadrik.^{b c}

^aWichtig: Vorgeteilte Korrelationen/Verschränkung sind damit nicht ausgeschlossen; sie erlauben Korrelationen ohne Signal. Der Frontinhalt betrifft die Erzeugung *neuer* Korrelationen bzw. die Übertragung von Information/Einfluss.

^bSiehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Kap. II.6–II.7.

^cSiehe FBA Teil V: Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie, Kap. V.4.

Dass c dabei nicht nur ein Symbol ist, sondern als Kalibrationsverhältnis experimentell zugänglich, zeigt das nächste Beispiel: Es ist bewusst als „Reviewer-Test“ lesbar (welche Messkurve liefert c ?).

Operationaler Test der Front

Zwei Laborstationen A und B sind durch eine variable Distanz $\|\Delta\mathbf{x}\|$ getrennt. Ein Protokoll erlaubt in jedem Schritt nur ein maximales externes Budget $\Delta B_{\max}^{\text{ext}}$. Die zugehörige Koordinatenzeit-Zuweisung ist (im gewählten Frame) per Kalibration (ii) definiert als $\Delta t := \Delta B^{\text{ext}}/\kappa_t$.

Wählt A in jedem Schritt zufällig eine Eingabe/Setting-Variable und B testet auf eine davon abhängige *Signalwirkung* (nicht bloß Korrelation), so ergibt die Frontschränke als notwendige Bedingung

$$\Delta t \geq \kappa_x \|\Delta\mathbf{x}\|/\kappa_t = \|\Delta\mathbf{x}\|/c.$$

Variiert man $\|\Delta\mathbf{x}\|$, fällt c als Steigung aus der Messung – eine *Kalibrationsgröße* (Konversionsfaktor der externen Konten), nicht ein zusätzliches Postulat.^a

^aSiehe FBA Teil VII: Konstanten, Skalen & Renormierung, Kap. VII.3–VII.4.

Zwischenfazit. Das Budget-Kalkül liefert die drei Pfeiler: (i) eine Zerlegung in intern/extern/irreversibel, (ii) additive Bilanzgleichungen unter Komposition, (iii) eine Frontschränke aus externer Kalibration. Im nächsten Kapitel (Kapitel I.4) definieren wir *Eigenzeit* und *Alterung* als Integrale des internen bzw. irreversiblen Anteils und koppeln sie mit der Front zur Minkowski-Quadrik.^{23 24}

²³Siehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Kap. II.5–II.7.

²⁴Siehe FBA Teil VIII: Klassischer Limes, Thermodynamik & Altern, Kap. VIII.6–VIII.8.

I.4 Eigenzeit und Altern

Im Budget-Kalkül (Kapitel I.3) haben wir die *Arten* von Aufwand geklärt: intern (Eigenfortschritt), extern (Neuordnung/Ort) und den irreversiblen Anteil. Der nächste Schritt ist, aus diesen Konten *invariante* Größen für einzelne Subsysteme zu bauen. Die Leitidee ist einfach: *Eigenzeit* ist die integrierte interne Kontierung entlang einer Weltlinie – unabhängig davon, wie wir externe Koordinaten wählen. *Altern* ist die integrierte Irreversibilität – der Teil der internen Kontierung, der sich nicht „zurückdrehen“ lässt.

Der Lesepfad dieses Kapitels ist entsprechend dreistufig: Zuerst definieren wir τ als systemgebundene Summen-/Integralgröße und fixieren die Minimalanforderungen (Additivität, Refinement-Invarianz, Parametrisierungsfreiheit). Dann definieren wir A als den irreversiblen Teil derselben Kontierung und verankern seinen Status als „Pfeilzähler“. Schließlich koppeln wir τ und A an die externe Kalibration und formulieren, in welchem Sinn im (nahezu) reversiblen Limes die Minkowski-Quadrik als Effektivstruktur aus der Bilanz gelesen werden kann.²⁵

I.4.1 Eigenzeit als integrierter interner Budgetfluss

Die Eigenzeit soll dreierlei leisten: (i) an ein Subsystem gebunden sein (*intrinsisch*), (ii) additiv über seriell verknüpfte Evolutionsabschnitte sein, und (iii) unbeeinflusst bleiben von bloßer Reparametrisierung oder von Feinschnitt der Darstellung (Refinement-Invarianz). Bevor wir formalisieren, erinnern wir: ΔB^{int} wurde im Budget-Kalkül als jener Anteil identifiziert, der den Eigenfortschritt eines Systems kontiert (Abschnitt I.3.1). Jetzt schließen wir diesen internen Fluss zu einer systemgebundenen „Uhr“ zusammen: Die Definition ist bewusst minimal und trennt strikt (a) den internen Kontofluss und (b) die Wahl einer Kalibrationskala.

Definition I.4.1.1: Eigenzeit entlang einer Weltlinie

Sei γ eine Weltlinie eines Subsystems S , dargestellt als Folge von Schritten $n \rightarrow n+1$ mit internen Budgetanteilen $\Delta B_{n,S}^{\text{int}} \geq 0$ (Abschnitt I.3.1). Eine *Eigenzeit-Kalibration* ist die Wahl einer konstanten Rate $\kappa_\tau > 0$ (Budget pro Eigenzeit), so dass die diskrete Eigenzeit

$$\Delta\tau_{n,S} := \frac{\Delta B_{n,S}^{\text{int}}}{\kappa_\tau}, \quad \tau[\gamma] := \sum_{n \in \gamma} \Delta\tau_{n,S}$$

wohldefiniert ist.[1, 2]

Notationskonvention (Raten). Falls zusätzlich eine externe Parametrisierung t kalibriert ist und man den Refinement-Limes betrachtet, schreiben wir

$$d\tau = \frac{b_t^{\text{int}}}{\kappa_\tau} dt, \quad b_t^{\text{int}} := \frac{dB^{\text{int}}}{dt} \geq 0.$$

Falls später τ selbst als Parameter verwendet wird, schreiben wir entsprechend $b_\tau^{(\cdot)} := dB^{(\cdot)}/d\tau$, um Raten pro t und pro τ strikt zu trennen.

Damit die Definition mehr ist als ein Symbol, muss sie sich unter Zusammensetzen von Evolutionsabschnitten „richtig“ verhalten und darf nicht von äußerer Parametrisierung

²⁵Siehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Kap. II.6–II.7.

abhängen. Diese Anforderungen sind keine Zusatzphysik, sondern Konsistenzanforderungen an eine systemgebundene Bilanzgröße.

Formelkasten I.4.1.1: Eigenschaften der Eigenzeit

(E1) Additivität. $\tau[\gamma_1 \cdot \gamma_2] = \tau[\gamma_1] + \tau[\gamma_2]$ (Serienkomposition).

(E2) Refinement-Invarianz. Jede endliche Verfeinerung der Abfolge lässt $\tau[\gamma]$ unverändert (Lemma I.3.2.1).

(E3) Parametrisierungsfreiheit. Ein Wechsel äußerer Koordinaten bzw. eine andere Zerlegung in Schritte ändert τ nicht; τ ist an S gebunden, nicht an ein Bezugssystem.

Die Skala κ_τ ist dabei die einzige Stelle, an der „Sekunden“ im üblichen Sinn überhaupt ins Spiel kommen: Sie koppelt den intrinsischen Zähler an reale Uhren. Wir halten diese Kopplung zunächst als Wahl fest und verknüpfen sie erst im nächsten Abschnitt systematisch mit der externen Kalibration.

Anmerkung I.4.1.1: Wahl der Skala κ_τ

κ_τ ist eine Einheiten- bzw. Kalibrationswahl (Budget pro Eigenzeit), die später mit der externen Kalibration verknüpft wird (Abschnitt I.4.3). Praktisch wird κ_τ so gewählt, dass sich τ mit Standarduhren deckt, wenn Dissipation vernachlässigbar ist.^a

^aSiehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Kap. II.5–II.7.

Greifbar wird Eigenzeit typischerweise erst im Vergleich zweier identischer Systeme, die extern unterschiedlich „beansprucht“ werden: Dann konkurrieren externe und interne Kontierung um dasselbe Schrittbudget. Das folgende Beispiel dient als Lesebrücke zur Zeitdilatation, die wir später als Konsequenz der Quadrik präzisieren.

Zwei Uhren – eine schwere, eine leichte

Zwei identische Oszillatoruhren A (ruhend) und B (hin und her bewegt). Beide haben die gleiche interne Kalibration κ_τ .

Bei gleichem Schrittbudget (bzw. gleicher Budgetzuteilung) fließt für B mehr externe Kontierung in ΔB^{ext} (Bewegung), sodass weniger internes Budget pro Schritt für die Uhrdynamik verfügbar ist.

Resultat (nahezu reversibles Regime): $\tau[B] < \tau[A]$ (Zeitdilatation als Budgetumverteilung; vgl. Lemma I.4.3.1).

I.4.2 Altern als integrierter irreversibler Anteil

Von τ zur *Alterung* führt ein kleiner, aber entscheidender Schritt: Wir separieren im internen Konto den irreversiblen Anteil. So entsteht ein zweiter, intrinsischer Zähler, der den Zeitpfeil operativ trägt. Wichtig ist dabei die saubere Trennung: τ zählt internen Fluss insgesamt; A zählt nur den Anteil, der unter dem jeweiligen Protokoll nicht kostenlos rückgängig gemacht werden kann.

Definition I.4.2.1: Alterung

Entlang einer Weltlinie γ eines Subsystems S gelte die Zerlegung

$$\Delta B_{n,S}^{\text{int}} = \Delta B_{n,S}^{\text{rev}} + \Delta B_{n,S}^{\text{irr}}, \quad \Delta B_{n,S}^{\text{irr}} \geq 0.$$

Wir definieren die Alterungssinkremente und die integrierte Alterung durch

$$\Delta A_{n,S} := \frac{\Delta B_{n,S}^{\text{irr}}}{\kappa_\tau}, \quad A[\gamma] := \sum_{n \in \gamma} \Delta A_{n,S}.$$

Im Refinement-Limes (bei kalibriertem t) schreiben wir

$$dA = \frac{b_t^{\text{irr}}}{\kappa_\tau} dt, \quad b_t^{\text{irr}} := \frac{dB^{\text{irr}}}{dt} \geq 0,$$

und analog $b_\tau^{\text{irr}} := dB^{\text{irr}}/d\tau$, falls τ als Parameter genutzt wird.

Damit A wirklich die dissipative *Last* misst (und nicht nur umetikettiert), genügen zwei robuste, rein bilanzielle Ungleichungen: Nichtnegativität und die triviale Schranke durch den gesamten internen Fluss.

Formelkasten I.4.2.1: Ungleichungen für Altern

(Ag1) Nichtnegativität. $A[\gamma] \geq 0$.

(Ag2) Schranke. $A[\gamma] \leq \tau[\gamma]$, denn punktweise gilt $\Delta A_{n,S} = \Delta B_{n,S}^{\text{irr}}/\kappa_\tau \leq (\Delta B_{n,S}^{\text{rev}} + \Delta B_{n,S}^{\text{irr}})/\kappa_\tau = \Delta \tau_{n,S}$, und Summation über γ liefert die Schranke. Gleichheit gilt genau dann, wenn $\Delta B_{n,S}^{\text{rev}} \equiv 0$ entlang γ (rein dissipative Entwicklung).

Die Lesart ist operativ: Wo Protokolle (Kanäle) Information irreversibel in nicht zugängliche Freiheitsgrade abführen, wächst A . Wo die Entwicklung umkehrbar ist, wächst nur τ . Der Zusammenhang zu Monotonien (Spohn/DPI) wird erst dann scharf, wenn wir die zulässige Dynamik als CPTP/GKLS präzisiert haben; hier bleibt A zunächst eine Bilanzgröße.

Anmerkung I.4.2.1: Physikalische Lesart

„Altern“ ist keine Metapher, sondern eine bilanzielle Größe: Wo Spohn-Ungleichung bzw. Datenverarbeitungsmonotonie (DPI) *streng* ist (unselektive Beschreibung), fließt irreversibles Budget. Reversible (unitäre) Abschnitte tragen zu τ , aber nicht zu A bei.^a
b

^aSiehe FBA Teil IV: Dynamik & Messung (GKLS), Kap. IV.4–IV.7.

^bSiehe FBA Teil VIII: Klassischer Limes, Thermodynamik & Altern, Kap. VIII.6–VIII.8.

Ein kurzer Blick auf zwei Extremfälle verankert die Intuition.

Thermostat vs. reibungsfreie Dynamik

Ein Qubit in einem bathgekoppelten Relaxationskanal hat $b_t^{\text{irr}} > 0 \Rightarrow dA > 0$.

Ein isolierter Spin unter reinem H (keine Lindblad-Terme) hat $b_t^{\text{irr}} = 0 \Rightarrow dA = 0$, obwohl $d\tau > 0$.

I.4.3 Budget-Quadrik und Minkowski-Limes

Mit τ und A sind die internen Zähler bereit. Um eine Geometrie als Effektivstruktur zu gewinnen, koppeln wir sie an die *externen* Kostensätze. Die Frontschränke (Abschnitt I.3.3) liefert die Kegelstruktur; eine passende Wahl von κ_τ bringt beide Kontierungen in eine Form, aus der die Quadrik ablesbar ist.

Wichtig für den Lesepfad: Wir machen hier zwei Dinge zugleich transparent. Erstens: Welche Teile sind *Definition/Konvention* (z. B. die Wahl von κ_τ)? Zweitens: Welche Teile sind *Folgen* der bereits eingeführten Frontschränke und der Budgetbilanz? Die eigentliche Herleitung, die Regularitätsannahmen und die Symmetrieanalyse stehen gesammelt in Teil II; hier genügt uns die minimal operative Rekonstruktion.²⁶

Definition I.4.3.1: Externe Kalibration und Wahl von κ_τ

Seien $\kappa_t, \kappa_x > 0$ die externen Kostensätze (Definition I.3.3.1) und $c := \kappa_t/\kappa_x$ die Frontkonstante. Als Einheitenangleichung wählen wir eine Eigenzeit-Skala κ_τ in derselben Dimension (Budget pro Zeit).

Konvention. Wir setzen im Folgenden $\kappa_\tau := \kappa_t$. Diese Wahl fixiert lediglich die τ -Einheit relativ zur externen t -Einheit: Jede Alternative $\kappa_\tau = \alpha \kappa_t$ mit konstantem $\alpha > 0$ reskaliert τ global und lässt die Kegelstruktur sowie die Budget-Ungleichungen invariant. Mit $\kappa_\tau = \kappa_t$ gilt im Ruhefall ($\Delta \mathbf{x} = 0$) im minimal-reversiblen Regime $\Delta \tau_{\text{rev}}^{\text{min}} = \Delta t$, und die Quadrik nimmt die Standardform an.

Mit dieser Wahl kann der minimale *reversible* interne Bedarf eines Schritts im (nahezu) reversiblen Regime in eine Standardform gebracht werden. Wir formulieren die Quadrik deshalb als (i) Definition eines minimalen reversiblen Anteils und (ii) Konsistenzbedingung, die die tatsächlich realisierte reversible Kontierung nach unten beschränkt.

²⁶Siehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Kap. II.6–II.7.

Formelkasten I.4.3.1: Budget-Quadrik (diskret) & Minkowski-Limes (kontinuierlich)

(Q1) Definition (minimal reversibel). Für einen Schritt mit externer Kontierung $(\Delta t, \Delta \mathbf{x})$ definieren wir den *minimal reversiblen* Eigenzeitinkrementanteil $\Delta \tau_{\text{rev}}^{\text{min}}$ durch

$$\kappa_{\tau} \Delta \tau_{\text{rev}}^{\text{min}} := \sqrt{(\kappa_t \Delta t)^2 - (\kappa_x \|\Delta \mathbf{x}\|)^2}.$$

Die Frontschränke garantiert die Nichtnegativität der Wurzel.[1–3]

(Q1') Arbeitsprinzip (minimal-reversibles Regime). Setze $\Delta \tau_{\text{rev}} := \Delta B^{\text{rev}} / \kappa_{\tau}$. Im idealisierten minimal-reversiblen Regime (keine zusätzliche reversible „Last“ über die durch $(\Delta t, \Delta \mathbf{x})$ erzwungene Mindestkontierung hinaus) gilt $\Delta \tau_{\text{rev}} = \Delta \tau_{\text{rev}}^{\text{min}}$; allgemein nehmen wir als Konsistenzbedingung

$$\Delta \tau_{\text{rev}} \geq \Delta \tau_{\text{rev}}^{\text{min}}.$$

(Q2) Standardform. Mit $\kappa_{\tau} = \kappa_t$ folgt

$$(c \Delta \tau_{\text{rev}}^{\text{min}})^2 = (c \Delta t)^2 - \|\Delta \mathbf{x}\|^2.$$

(Q3) Kontinuierlicher Limes (Refinement). In einem Refinement-Limes, in dem die Weltlinie durch eine (stückweise) glatte Kurve $(t, \mathbf{x}(t))$ beschrieben werden kann, schreibt sich die Minimalform als

$$c^2 d\tau_{\text{rev}}^{\text{min} 2} = c^2 dt^2 - \|d\mathbf{x}\|^2.$$

Für die entlang γ tatsächlich realisierten internen Konten gilt komponentenweise

$$d\tau = \frac{dB^{\text{rev}}}{\kappa_{\tau}} + \frac{dB^{\text{irr}}}{\kappa_{\tau}} = d\tau_{\text{rev}} + dA.$$

Aus (Q2) fällt die übliche Zeitdilationsformel unmittelbar heraus – *im minimal-reversiblen bzw. idealisierten Regime* und unter der Annahme $\Delta t > 0$. Das Lemma dient hier als Orientierung: Es zeigt, wie die bekannte Form aus der Bilanzstruktur folgt, nicht umgekehrt.

Lemma I.4.3.1: Zeitdilatation als Budgetumverteilung

Mit $v := \|\Delta \mathbf{x}\| / \Delta t$ gilt $\Delta \tau_{\text{rev}}^{\text{min}} = \Delta t \sqrt{1 - v^2/c^2} \leq \Delta t$ und im Limes $d\tau_{\text{rev}}^{\text{min}} = dt \sqrt{1 - v^2/c^2}$.

Beweisskizze I.4.3.1: Zeitdilatation als Budgetumverteilung

Setze $\kappa_{\tau} = \kappa_t$ in (Q2) und löse nach $\Delta \tau_{\text{rev}}^{\text{min}}$ auf. Die Frontschränke $\|\Delta \mathbf{x}\| \leq c \Delta t$ garantiert die Wurzelpositivität.

Die geometrische Deutung ist damit klar: Nicht Geometrie *setzt* die Bilanz, sondern die Bilanz *induziert* im geeigneten Limes eine geometrische Effektivstruktur. Die Quadrik ist hierbei

keine Behauptung über das Ontologische, sondern eine kompakte Buchhaltungsrelation, die im relevanten Regime die beobachteten Zeit-/Raum-Beziehungen reproduziert.

Anmerkung I.4.3.1: Interpretation: Geometrie aus Bilanz

Die Quadrik ist eine *Bilanzidentität* im minimal-reversiblen Regime: Externe Kontierung „verbraucht“ Anteil am Budget eines Schritts, sodass weniger minimal-reversibler interner Anteil verfügbar ist. Im Limes erscheint die Minkowski-Struktur als Effektivbeschreibung dieser Kontierungsrelation.^{a b}

^aSiehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Kap. II.6–II.7.

^bSiehe FBA Teil V: Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie, Kap. V.4.

Zum Abschluss eine Messbrücke: Wie man c und die Quadrik *operativ* in denselben Daten sichtbar macht, ohne die Geometrie als Ausgangspunkt vorauszusetzen.

Operationaler Kalibrationstest für c

Bestimme die minimale externe Dauer Δt_{\min} zur Korrelationserzeugung über Distanz $\|\Delta \mathbf{x}\|$ unter festem Budgetlimit.

Messung von $\Delta t_{\min}(\|\Delta \mathbf{x}\|)$ liefert eine lineare Relation mit Steigung $1/c$.

Unabhängige Messung von Eigenzeit-Differenzen (nahezu reversibles Regime) validiert (Q2)/Zeitdilatation.

Zwischenfazit. τ und A sind die beiden internen Integrale, die wir benötigen: τ als *intrinsische Uhr*, A als *irreversibler Zähler*. Ihre Kopplung an die externe Kalibration über die Front erzeugt die Minkowski-Struktur im (nahezu) reversiblen Limes – und bereitet den Boden für die Formulierung zulässiger Dynamik als budgetbeschränkte Kanäle im folgenden Kapitel I.5.²⁷

²⁷Siehe FBA Teil IV: Dynamik & Messung (GKLS), Kap. IV.3–IV.7.

I.5 Zulässige Dynamik als budgetbeschränkte Kanäle

Mit Kapitel I.4 haben wir die *Uhr* (Eigenzeit) und den *Zähler* für Irreversibilität (Altern) gebaut; mit Kapitel I.3 die *Buchhaltung* (intern/extern/irreversibel) und die *Front*. Was fehlt, ist das *Wie* der Entwicklung: Welche Prozessklassen sind physikalisch „zulässig“ unter Budgetrestriktionen, und welcher *Zeitpfeil* folgt daraus?

Der Lesepfad dieses Kapitels ist dreistufig: (i) diskrete Aktualisierungsschritte als CPTP-Kanäle (inkl. Messung als Spezialfall), (ii) der Refinement-Limes als GKLS-Effektivbeschreibung in Eigenzeit, (iii) die Datenverarbeitungsungleichung (DPI) bzw. Spohns Ungleichung als explizit operativer Pfeil. Dabei ist die zentrale Trennlinie stets: *nicht-selektiv* (deterministische Beschreibung) vs. *selektiv* (Instrumentäste/Conditioning als Protokollwechsel).

I.5.1 Diskrete Schritte: CPTP-Kanäle & Messung

Die diskrete Sicht passt direkt zur Abfolge $\{U_n\}$: Für ein Subsystem S induziert jeder Aktualisierungsschritt $U_n \rightarrow U_{n+1}$ im Frame F_n eine transformationelle Beschreibung $\rho_{n,S} \mapsto \rho_{n+1,S}$. Diese effektive Beschreibung fassen wir als CPTP-Kanal $\Phi_{n,S}$ auf. Falls initiale System-Umwelt-Korrelationen oder Memory-Effekte relevant sind, wird S im Frame entsprechend erweitert (Environment/Memory als Teil der effektiven Systembeschreibung), so dass die Schrittabbildung wieder CPTP formuliert werden kann.²⁸

Der nächste Definitionskasten macht zwei Dinge zugleich explizit: (a) *Zulässigkeit* als CPTP-Eigenschaft (Kompatibilität mit Ancillas/Referenzsystemen) und (b) *Budgetbindung* über einen Kostenfunktork. Die konkrete Wahl von \mathcal{C} ist eine Modellierungsentscheidung im FBA-Sinn: Sie ist Teil dessen, was im Frame als „Kosten“ eines Kanals gezählt wird.

²⁸Der Punkt ist rein operational: Man erweitert die Systemgrenze, bis die Schrittbeschreibung im gewählten Frame als CPTP-Kanal formulierbar ist; die Kosten dieser Erweiterung werden später über \mathcal{C} und die Budgetallokation sichtbar.

Definition I.5.1.1: Zulässige Kanäle (diskret)

Die *zulässige diskrete Dynamik* auf einem Subsystem S ist eine vollständig positive, spurtreue Abbildung [4–7]

$$\Phi : \mathcal{D}(\mathcal{H}_S) \longrightarrow \mathcal{D}(\mathcal{H}_S).$$

Sie genügt einer *Budgetrestriktion* über einen Kostenfunktoren \mathcal{C} :

$$\mathcal{C}(\Phi) \leq \Delta B_S^{\text{int}} + \Delta B_{\text{alloc}}^{\text{ext}}.$$

Hier ist ΔB_S^{int} der dem Subsystem S im Schritt zugeordnete interne Budgetanteil (vgl. Abschnitt I.3.1). Der Term $\Delta B_{\text{alloc}}^{\text{ext}}$ ist der im Frame für diese Operation allokierte externe Anteil, mit

$$0 \leq \Delta B_{\text{alloc}}^{\text{ext}} \leq \Delta B_n^{\text{ext}}, \quad \sum_{\text{parallel betrachtete Ops } j} \Delta B_{\text{alloc}}^{\text{ext}}(j) \leq \Delta B_n^{\text{ext}},$$

und insbesondere $\Delta B_{\text{alloc}}^{\text{ext}} = 0$ für rein interne Operationen.

Der Funktor \mathcal{C} ist (i) additiv unter disjunkter Parallelkomposition und (ii) subadditiv unter Serienkomposition, kompatibel mit Formelkasten I.3.2.1.

Domäne & endliche Normierung. In Teil I arbeiten wir im endlichdimensionalen Fall $d := \dim(\mathcal{H}_S) < \infty$. Damit \mathcal{C} als endliche Budgetgröße wohldefiniert ist, fixieren wir im Frame eine operative Zustandsdomäne (Auflösungs-/Cutoff-Parameter $0 < \varepsilon \leq 1$)

$$\mathcal{D}_\varepsilon(\mathcal{H}_S) := \{\rho \in \mathcal{D}(\mathcal{H}_S) : \rho \geq \varepsilon \mathbb{I}/d\},$$

wobei \mathbb{I} die Identität auf \mathcal{H}_S bezeichnet.

Zudem definieren wir für eine kontraktive Divergenz D die (dimensionslose) maximale DPI-Lücke

$$\Delta_D^\varepsilon(\Phi) := \sup_{\rho, \sigma \in \mathcal{D}_\varepsilon(\mathcal{H}_S)} \left(D(\rho \parallel \sigma) - D(\Phi\rho \parallel \Phi\sigma) \right) \in [0, \infty).$$

Der Kostenfunktoren wird dann durch eine feste Umrechnungskonstante $\kappa_{\mathcal{C}} > 0$ (Budget pro nat/bit, je nach Wahl von D) normiert:

$$\mathcal{C}(\Phi) := \kappa_{\mathcal{C}} \Delta_D^\varepsilon(\Phi).$$

Ohne eine solche Domänenbeschränkung kann $\Delta_D(\Phi)$ (und damit \mathcal{C}) im Allgemeinen ∞ sein; in diesem Fall ist Φ bei endlichem Budget per Definition nicht zulässig.

Um Budgetrestriktionen an konkrete Kanalformen zu binden, erinnern wir an die zwei Standardrepräsentationen. Sie dienen hier als *Werkzeugkasten*: (i) Krausoperatoren sind praktisch für diskrete Schritte und Messmodelle; (ii) die Stinespring-Dilatation macht explizit, wo Information/Unterscheidbarkeit in Umweltfreiheitsgrade abfließen kann.

Formelkasten I.5.1.1: Kraus- und Stinespring-Repräsentation

(K1) Kraus. $\Phi(\rho) = \sum_i K_i \rho K_i^\dagger$ mit $\sum_i K_i^\dagger K_i = \mathbb{I}$.

(K2) Stinespring. Es gibt eine Isometrie $V : \mathcal{H}_S \rightarrow \mathcal{H}_S \otimes \mathcal{H}_E$ und σ_E mit $\Phi(\rho) = \text{Tr}_E[V(\rho \otimes \sigma_E)V^\dagger]$. [4–7]

Mit diesen Bausteinen ist Messung keine Sonderrolle, sondern ein Spezialfall von CPTP. Kritisch ist dabei die Protokolltrennung: Die *nicht-selektive* Beschreibung ist deterministisch (CPTP) und fällt unter DPI/Spohn; die *selektive* Beschreibung konditioniert auf ein Outcome und ist als Instrument mit klassischem Register zu behandeln (Protokollwechsel).

Lemma I.5.1.1: Messung als CPTP / Instrument (selektiv) und Coarse-Graining

Die *nicht-selektive* Messabbildung (inkl. optionalem klassischem Register, ohne Postselektion) ist CPTP und damit zulässig, sofern die Budgetrestriktion erfüllt ist. [5–7]

Die *selektiven* Messäste eines Instruments sind CP und spurnicht-erhaltend (CP-TNI): Für Krausoperatoren K_i ist $\rho \mapsto K_i \rho K_i^\dagger$ CP-TNI und die nicht-selektive Abbildung ist $\rho \mapsto \sum_i K_i \rho K_i^\dagger$ CPTP.

Wichtig (Pfeil-Disziplin). Aussagen vom Typ DPI/Spohn gelten für die *nicht-selektive* CPTP-Abbildung; selektive Updates (Conditioning auf i) sind ein Protokollwechsel und müssen als solcher modelliert werden (klassisches Register/Feedback).

Beweisskizze I.5.1.1: Messung als CPTP / Instrument (selektiv) und Coarse-Graining

POVMs besitzen Krausformen. [5–7] Das Anhängen eines klassischen Registers ist isometrisch; die anschließende Teilspur ist CPTP, sodass die nicht-selektive Abbildung CPTP ist. Für einzelne Outcomes i ist $\text{Tr}(K_i \rho K_i^\dagger) \leq \text{Tr}(\rho)$, also CP-TNI. Kontraktive Divergenzen sind monoton nichtwachsend unter CPTP, daher gilt $D(\Phi \rho \| \Phi \sigma) \leq D(\rho \| \sigma)$.

Warum insistieren wir auf CPTP? Weil genau diese Klasse Komponierbarkeit mit Ancillas/Referenzsystemen garantiert und damit die operative Forderung realisiert, dass lokale Schritte auch in Gegenwart beliebiger (auch verschränkter) Referenzsysteme wohldefiniert bleiben.

Anmerkung I.5.1.1: Warum CPTP notwendig ist

Verletzte Positivität erzeugt unphysikalische Negativwahrscheinlichkeiten; fehlende Spurtreue beschreibt keine deterministische Schrittabbildung. Selektive (postselektierte) Schritte sind als Instrument (CP-TNI-Äste) mit explizitem klassischem Register zu modellieren; die deterministische Beschreibung ist dann die zugehörige nicht-selektive CPTP-Abbildung. Nicht-CP ist mit der Forderung unvereinbar, dass lokale Operationen auf einem Teilsystem in Gegenwart beliebiger (auch verschränkter) Referenzsysteme wohldefiniert bleiben; ansonsten könnten lokal implementierte Schritte artefaktisch „Superluminalität“ emulieren. CPTP ist genau die Klasse, die mit *Lokalität* und *No-Signalling* (Kapitel I.6) verträglich bleibt.

Bevor wir in den kontinuierlichen Limes gehen, verankern wir die Intuition an drei elementaren diskreten Schritten und markieren dabei explizit, *wo* die Budgetlast im Kalkül landet (intern/extern/irreversibel).

Drei elementare diskrete Schritte

(Einfache Unitär) $\Phi(\rho) = U\rho U^\dagger$: $\mathcal{C}(\Phi)$ ist rein int und $\Delta B^{\text{irr}} = 0$.

(Dephasierung) $\Phi(\rho) = \sum_k P_k \rho P_k$: kontraktive Divergenzen dropen; typischerweise $\Delta B^{\text{irr}} > 0$.

(Relokation) Φ als Kanal auf einem Orts-/Registeranteil (oder Swap/Transport in einem Netzwerk): $\mathcal{C}(\Phi)$ lastet auf $\Delta B_{\text{alloc}}^{\text{ext}}$; die Frontschränke bindet (Lemma I.3.3.1).

Zwischenfazit. Diskrete CPTP-Schritte sind die „Atome“ der operationalen Entwicklung; Kosten werden gegen $\Delta B^{\text{int/ext}}$ gebucht, Irreversibilität gegen ΔB^{irr} . Der Refinement-Limes führt zur GKLS-Effektivtheorie für offene Systeme.

I.5.2 Kontinuierlicher Limes: GKLS-Kandidaten (offene Systeme)

Im Limes vieler kleiner Schritte wird Entwicklung als Halbgruppe $(\Phi_\tau)_{\tau \geq 0}$ in *Eigenzeit* τ beschrieben (entlang der Weltlinie des betrachteten Subsystems). Der Generator hat die GKLS-Form; Budgetraten koppeln Dynamik an Kostenflüsse. Entscheidend ist dabei: Wir nutzen GKLS hier als *Effektivbeschreibung* refinierter CPTP-Komposition, nicht als unabhängiges Postulat über Mikrodynamik.

Definition I.5.2.1: GKLS-Generator & Budgetraten

Eine kontinuierliche zulässige Entwicklung in Eigenzeit τ ist eine C_0 -Halbgruppe [8–10] mit

$$\frac{d}{d\tau} \rho = \mathcal{L}(\rho) = -i[H, \rho] + \sum_j \left(L_j \rho L_j^\dagger - \frac{1}{2} \{L_j^\dagger L_j, \rho\} \right).$$

Wir schreiben Budgetraten relativ zu τ (Notation wie in Definition I.4.1.1) als

$$b_\tau^{\text{rev}}(\tau) := \frac{dB^{\text{rev}}}{d\tau}, \quad b_\tau^{\text{irr}}(\tau) := \frac{dB^{\text{irr}}}{d\tau}, \quad b_\tau^{\text{ext}}(\tau) := \frac{dB_{\text{alloc}}^{\text{ext}}}{d\tau}, \quad b_\tau^{\text{int}} = b_\tau^{\text{rev}} + b_\tau^{\text{irr}},$$

wobei $B_{\text{alloc}}^{\text{ext}}$ die entlang der betrachteten Weltlinie (bzw. für die betrachtete Operation) allokierte externe Kontierung bezeichnet (vgl. Definition I.5.1.1).

Kostenrate (ohne Glattheitsannahme). Statt Differenzierbarkeit von $\tau \mapsto \mathcal{C}(\Phi_\tau)$ vorauszusetzen, fordern wir die integrierte Budgetbindung: Für alle $0 \leq \tau_1 < \tau_2$ gilt

$$\mathcal{C}(\Phi_{\tau_2}) - \mathcal{C}(\Phi_{\tau_1}) \leq \int_{\tau_1}^{\tau_2} (b_\tau^{\text{int}}(s) + b_\tau^{\text{ext}}(s)) ds.$$

Falls $\mathcal{C}(\Phi_\tau)$ (lokal) differenzierbar ist, folgt daraus punktweise $\frac{d}{d\tau} \mathcal{C}(\Phi_\tau) \leq b_\tau^{\text{int}}(\tau) + b_\tau^{\text{ext}}(\tau)$ als Kurzschreibweise.

Als nächstes machen wir den Zeitpfeil im Kontinuum sichtbar: Spohns Ungleichung ist eine differentielle Form der DPI für GKLS-Halbgruppen. Wieder gilt die Pfeil-Disziplin: Aussage ist *unselektiv* (deterministisch), nicht konditioniert auf Outcomes.

Formelkasten I.5.2.1: Spohn-Ungleichung / kontinuierliche DPI

Sei ω ein treuer stationärer Zustand der Halbgruppe ($\mathcal{L}(\omega) = 0$). [10, 11] Dann gilt

$$\frac{d}{d\tau} D(\rho_\tau \| \omega) \leq 0.$$

Falls $\frac{d}{d\tau} D(\rho_\tau \| \omega) = 0$ entlang einer Trajektorie gilt, so ist die zugehörige (instantane) Entropieproduktion in dieser Darstellung null. Hinreichend ist z. B. rein unitäre Entwicklung, die ω respektiert (insbesondere $[H, \omega] = 0$ und keine dissipativen Terme), oder dass ρ_τ in einer dissipationsfreien Invarianzunteralgebra der Dynamik bleibt. Für zusätzliche „genau dann“-Charakterisierungen sind weitere Strukturannahmen (z. B. Primitivität/Detailed Balance) nötig. Der dissipative Fluss ist nichtnegativ und ist kompatibel mit $\frac{dA}{d\tau} \geq 0$.

Die Halbgruppenstruktur ist dabei die formale Version von „Zeitabschnitte lassen sich zusammensetzen“: Sie garantiert saubere Serienkomposition und passt damit exakt zur Budget-Additivität/Subadditivität aus dem Kalkül.

Lemma I.5.2.1: Semigruppeneigenschaft & Budgetsubadditivität

Für $\tau_1, \tau_2 \geq 0$ gilt $\Phi_{\tau_1+\tau_2} = \Phi_{\tau_2} \circ \Phi_{\tau_1}$ und $\mathcal{C}(\Phi_{\tau_1+\tau_2}) \leq \mathcal{C}(\Phi_{\tau_1}) + \mathcal{C}(\Phi_{\tau_2})$.

Beweisskizze I.5.2.1: Semigruppeneigenschaft & Budgetsubadditivität

Halbgruppeneigenschaft der GKLS-Entwicklung und Subadditivität des Kostenfunktors unter Serienkomposition. Die Identität bei $\tau = 0$ entspricht Nullschritt/Nullkosten und ist kompatibel mit $\Delta B = 0$.

Konkreter wird der Zusammenhang „Dissipation \Rightarrow Pfeil \Rightarrow Altern“ am Ein-Qubit-Beispiel der Amplitudendämpfung, das $\frac{dA}{d\tau} \geq 0$ in einer Standarddynamik sichtbar macht.

Amplitude-Dämpfung als Budgetfluss

Für $\dot{\rho} = \gamma \left(\sigma_- \rho \sigma_+ - \frac{1}{2} \{ \sigma_+ \sigma_-, \rho \} \right)$ mit Rate $\gamma > 0$ gilt für passende ω (z. B. thermischer Fixpunkt) $\frac{d}{d\tau} D(\rho_\tau \| \omega) \leq 0$, also konsistent $\frac{dA}{d\tau} \geq 0$.

Der reversible Beitrag steckt im Hamilton-Teil; externe Kosten fallen an, wenn die Dämpfung an Relokation/Kommunikation gekoppelt ist (Front).

Zwischenfazit. GKLS-Generatoren sind die kontinuierliche Effektivbeschreibung budgetierter CPTP-Schritte. Spohn liefert eine quantitative Version des Zeitpfeils; b_τ^{irr} misst die Alterungsrate.

I.5.3 Datenverarbeitungsungleichung (DPI) als operativer Zeitpfeil

Die DPI sagt: *Unterscheidbarkeit nimmt unter zulässigen (nicht-selektiven) Kanälen nicht zu.* Ohne Zusatzbudget kann kein zulässiger Prozess Informationsabstände „kostenlos“ vergrößern. Damit wird die Richtung der Entwicklung operational festgelegt: als diejenige, in der geeignete Divergenzen entlang serieller Komposition nicht zunehmen. Wir formulieren das Prinzip, leiten eine unmittelbare Konsequenz ab und klären abschließend die Rolle der Front.

Definition I.5.3.1: DPI-Zulässigkeit & Zeitpfeil

Sei $D(\cdot\|\cdot)$ eine unter CPTP kontraktive Divergenz (z. B. Quantenrelative Entropie). [12, 13]

Für jede zulässige (nicht-selektive) Φ gilt

$$D(\Phi(\rho)\|\Phi(\sigma)) \leq D(\rho\|\sigma).$$

Die *Richtung* der physikalischen Entwicklung ist dadurch diejenige, in der (geeignete) Divergenzen entlang der seriellen Komposition $\Phi_{\tau_2} \circ \Phi_{\tau_1}$ nicht zunehmen. Das (Eigen-)Zeitmaß τ parametrisiert diese kanonische Kompositionsrichtung.

Kopplung an Irreversibilität. Tritt für irgendein Paar (ρ, σ) strikte Kontraktion ein, so ist die Entwicklung in diesem Sinn nicht rein reversibel. Im GKLS-Limes entspricht dies (bei den üblichen Regularitäts-/Stationaritätsannahmen) positiver Entropieproduktion und damit $\frac{dA}{d\tau} > 0$ (vgl. Formelkasten I.5.2.1); rein unitäre Abschnitte realisieren Gleichheit und tragen zu A nicht bei.

Eine unmittelbare Folge ist das Verbot von „kostenlosem“ Unscrambling, solange man nur auf dem System (ohne Umwelt-/Registerzugriff) operiert. Die Aussage ist bewusst so formuliert, dass sie nur DPI nutzt (keine zusätzlichen Strukturannahmen); sie schließt *approximate* Recovery nicht aus, sondern sagt, dass perfekte Wiederherstellung der ursprünglichen Unterscheidbarkeit nicht möglich ist, sobald strikte Kontraktion vorliegt.

Korollar I.5.3.1: Kein kostenloses Unscrambling (Recovery nur auf S)

Wenn es Zustände ρ, σ gibt mit $D(\Phi\rho\|\Phi\sigma) < D(\rho\|\sigma)$, dann kann keine zulässige CPTP-*Recovery* \mathcal{R} , die *nur* auf dem System S (ggf. mit lokaler Ancilla) wirkt und keinen Zugriff auf Umwelt-/Speicherfreiheitsgrade oder auf ein klassisches Outcome-Register hat, diese Unterscheidbarkeit perfekt wiederherstellen:

$$D(\mathcal{R}\Phi\rho\|\mathcal{R}\Phi\sigma) \leq D(\Phi\rho\|\Phi\sigma) < D(\rho\|\sigma).$$

Operativ: perfekte Wiederherstellung erfordert zusätzliche Freiheitsgrade (z. B. Zugriff auf die Stinespring-Umwelt oder auf Messprotokolle) und/oder zusätzliche Budgetzuteilung; infinitesimal spiegelt sich dies im GKLS-Fall in der (nichtnegativen) Entropieproduktionsrate wider (Formelkasten I.5.2.1).

Die DPI ist kanalsch; erst durch die Front wird sie zur geometrischen Reichweitemaussage. Das klärt die Rolle der Lokalität im FBA: „Pfeil“ ist zunächst eine Aussage über Informationsabstände unter zulässigen Kanälen; „Geometrie“ entsteht, wenn externe Kontierung Reichweiten begrenzt.

Anmerkung I.5.3.1: Rolle der Front und der Lokalität

Die DPI ist *kanalisch*; die Front (Lemma I.3.3.1) macht sie *geometrisch* wirksam: Selbst wenn interne Ressourcen reichlich wären, limitiert $\Delta B_{\text{alloc}}^{\text{ext}}$ die Reichweite von Operationen, die Information/Unterscheidbarkeit zwischen entfernten Registern aufbauen, pro Schritt. So entsteht der Budget-Kegel (No-Signalling, Kapitel I.6).

Abschluss dieses Kapitels. Wir haben den „Motor“ der Entwicklung in eine präzise Form gebracht: *zulässige Dynamik* sind genau CPTP-/GKLS-Prozesse *unter Budgetrestriktion*; der *Zeitpfeil* ist nichts zusätzlich Postuliertes, sondern die Monotonie kontraktiver Divergenzen (DPI/Spohn, unselektive Beschreibung), und die *Geometrie* erscheint als Reichweitenstruktur der Front. Kurz: Dynamik = Physik *innerhalb* eines Kostenrahmens, Richtung = „Unterscheidbarkeit nimmt nicht gratis zu“, Reichweite = „externe Kosten sind endlich“.

Im nächsten Kapitel (Kapitel I.6) strecken wir diese Bausteine auf Zusammensetzbarkeit und Ortsverträglichkeit: Wir zeigen, dass *Serie* und *Parallel* die Klasse zulässiger Kanäle nicht verlassen (Schließung), dass Budgets additiv/subadditiv bleiben (keine „Kosten-Arbitrage“) und dass *Lokalität/No-Signalling* mit der Front kohärent ist. Praktisch heißt das: Budget-Kegel komponieren sich, DPI bleibt unter „Verschaltung“ von Kanälen erhalten, Messung/Feedback passt in das CPTP-Gerüst, und Reichweitenbeschränkungen propagieren durch komplexe Netzwerke genauso zuverlässig wie durch einzelne Schritte.

I.6 Komposition, Lokalität & No-Signalling

Bisher haben wir *innerhalb* eines Schritts Bilanz gehalten (Kapitel I.3) und *entlang* einer Weltlinie Eigenzeit/Alterung definiert (Kapitel I.4); zudem kennen wir die Klasse der *zulässigen* Dynamiken (Kapitel I.5).

Damit ist die Theorie aber erst dann physikalisch belastbar, wenn zwei zusätzliche Stabilitäten erfüllt sind: Erstens muss „zulässig“ unter den Operationen stabil sein, die in jedem Protokoll unvermeidlich auftreten: Schritte hintereinander (Serie) und unabhängige Teilprozesse nebeneinander (Parallel). Wäre das nicht der Fall, könnte man durch bloßes Umsegmentieren oder Verschalten aus zulässigen Bausteinen eine unzulässige Gesamtoperation konstruieren (oder umgekehrt) — und „Zulässigkeit“ wäre kein protokollrobustes Prädikat. Zweitens müssen lokale Eingriffe lokal bleiben: Ohne eine solche Lokalitätsforderung würde die Budgetfront $\|\Delta \mathbf{x}\| \leq c \Delta t$ (Lemma I.3.3.1) ihre operative Bedeutung verlieren, weil entfernte Marginalen dann (scheinbar) ohne extern budgetierte Kopplung beeinflussbar wären. Dieses Kapitel verankert daher (i) die Komposition als Schließung der Prozessklasse und (ii) die Lokalität als No-Signalling der *unbedingten* Dynamik so, dass weder durch „Buchhaltung“ noch durch „Verdrahtung“ eine künstliche Fernwirkung entsteht.

I.6.1 Symmetrisch-monoidale Struktur (Serie/Parallel/Swap)

Wenn Prozesse die Bausteine der Physik sein sollen, müssen sie sich so zusammensetzen lassen, wie Experimente tatsächlich gebaut werden: sequenziell (Teilschritte) und parallel (disjunkte Teilaufbauten). Dass dabei Vertauschungen disjunkter Faktoren möglich sind, ist keine Dynamikannahme, sondern eine Darstellungsfreiheit: dieselbe Schaltung darf nicht davon abhängen, ob wir Teilsysteme als $A \otimes B$ oder $B \otimes A$ notieren.

Definition I.6.1.1: Struktur der zulässigen Prozesse

Die Klasse der Systeme (Objekte) und zulässigen Kanäle (Morphismen) trägt eine *symmetrisch-monoidale Struktur*:

1. **Serie:** Komposition \circ ist assoziativ mit Identität id .
2. **Parallel:** Monoidales Produkt \otimes für disjunkte Systeme, mit Einheitsobjekt $\mathbf{1}$.
3. **Symmetrie:** Swaps $\sigma_{A,B} : A \otimes B \rightarrow B \otimes A$ mit $\sigma_{B,A} \circ \sigma_{A,B} = \text{id}$.

Wir arbeiten dabei in einer (monoidal äquivalenten) striktifizierten Darstellung, so dass Klammerungen/Einheitsisomorphismen nicht separat mitgeführt werden müssen.^a Zulässige Kanäle sind CPTP-/GKLS-induziert (Kapitel I.5) und respektieren die Budgetrestriktionen.

^aStriktifikation ist hier eine kohärenztheoretische Vereinfachung: Man ersetzt die monoidale Struktur durch eine äquivalente strikte Darstellung; die physikalischen Aussagen sind unter dieser Äquivalenz invariant.

Diese Struktur ist erst dann physikalisch kontrolliert, wenn sie *budgetstabil* ist: Sobald sich Schaltungen zusammensetzen lassen, muss die Budgetbilanz mitwachsen; sonst wäre „Budget“ manipulierbar durch bloße Wahl einer Schaltbeschreibung (Kosten-Arbitrage). Genau deshalb müssen die Bilanzpostulate aus Kapitel I.3 mit \circ und \otimes kompatibel sein.

Formelkasten I.6.1.1: Budget-Additivität und Kostenregeln unter \circ und \otimes

Notation. Für einen (ggf. aus mehreren Schritten zusammengesetzten) Prozess Φ bezeichnet ΔB_Φ das im gewählten Frame diesem Prozess *gebuchte Gesamtbudget* (Summe der zugehörigen Schritt-/Teilprozessbudgets im Sinne von Formelkasten I.3.2.1).

Für zulässige Prozesse Φ, Ψ gilt (Serienkomposition)

$$\Delta B_{\Psi \circ \Phi} = \Delta B_\Phi + \Delta B_\Psi, \quad \mathcal{C}(\Psi \circ \Phi) \leq \mathcal{C}(\Phi) + \mathcal{C}(\Psi),$$

und für disjunkte Parallelkomposition

$$\Delta B_{\Phi \otimes \Psi} = \Delta B_\Phi + \Delta B_\Psi, \quad \mathcal{C}(\Phi \otimes \Psi) = \mathcal{C}(\Phi) + \mathcal{C}(\Psi).$$

Dies gilt kompatibel zu Formelkasten I.3.2.1 komponentenweise: externe Anteile addieren sich über disjunkte Teilprozesse, und interne/irreversible Konten addieren sich entlang der jeweils betrachteten Weltlinien bzw. über disjunkte Subsysteme. Gleiches gilt im GKLS-Limes für die Raten $b_r^{(\cdot)}$ (vgl. Definition I.5.2.1).

Mit diesen Regeln wird „zulässig“ protokollstabil: Wird eine experimentelle Realisierung aus zulässigen Teilschritten gebaut, dann darf die zusammengesetzte Realisierung nicht außerhalb der zulässigen Klasse fallen, solange das Gesamtbudget entsprechend allokiert ist.

Lemma I.6.1.1: Schließung der zulässigen Kanäle unter Verschaltung

Seien Φ, Ψ zulässig und erfüllen die Budgetrestriktionen $\mathcal{C}(\Phi) \leq \Delta B_\Phi$ und $\mathcal{C}(\Psi) \leq \Delta B_\Psi$ (mit $\Delta B_\Phi, \Delta B_\Psi$ als den jeweils allokierten Gesamtbudgets). Dann ist auch $\Psi \circ \Phi$ zulässig unter dem Budget $\Delta B_{\Psi \circ \Phi} = \Delta B_\Phi + \Delta B_\Psi$. Für disjunkte Systeme gilt analog: $\Phi \otimes \Psi$ ist zulässig unter $\Delta B_{\Phi \otimes \Psi} = \Delta B_\Phi + \Delta B_\Psi$.

Beweisskizze I.6.1.1: Schließung der zulässigen Kanäle unter Verschaltung

Für Serie: $\mathcal{C}(\Psi \circ \Phi) \leq \mathcal{C}(\Phi) + \mathcal{C}(\Psi) \leq \Delta B_\Phi + \Delta B_\Psi = \Delta B_{\Psi \circ \Phi}$ mittels Formelkasten I.6.1.1.
Für Parallel (disjunkt): $\mathcal{C}(\Phi \otimes \Psi) = \mathcal{C}(\Phi) + \mathcal{C}(\Psi)$ und analog die Budgetadditivität.

Ein besonders kritischer Sonderfall sind formale Verdrahtungsschritte: Wenn Identitäten oder Swaps *irgendwie* Budget tragen könnten, wären Aussagen über Budgetbilanz, DPI und Front von der gewählten Diagrammdarstellung abhängig. Das darf nicht passieren.

Lemma I.6.1.2: Keine Budgetinflation durch Umverdrahtung

Weder Umnummerierung noch Einfügen/Entfernen von *formalen* drahtartigen Identitäten und Swaps verändert die budgetsaldierte Prozesskostenbilanz. Insbesondere kann die Parallelisierung disjunkter Prozesse kein Budget „erzeugen“.

Beweisskizze I.6.1.2: Keine Budgetinflation durch Umverdrahtung

In der Prozessrechnung sind id und $\sigma_{A,B}$ reine Relabeling-/Verdrahtungsisomorphismen; per Konvention tragen sie weder interne noch externe Kontierung, also $\Delta B = 0$ und $\mathcal{C} = 0$.

Dann folgt die Aussage direkt aus Additivität/Subadditivität unter \circ, \otimes (Formelkasten I.6.1.1) und der Schließung zulässiger Kanäle unter Verschaltung (vgl. Lemma I.6.1.1).

Hinweis: Ein *physischer* Tausch zweier räumlich separierter Systeme ist ein Transportprozess und wird im FBA als eigener Kanal mit externer Kontierung modelliert; er ist nicht mit dem formalen Swap $\sigma_{A,B}$ zu verwechseln.

I.6.2 Tensorstruktur, Teilspur und No-Signalling

Die Budgetfront (Lemma I.3.3.1) macht Aussagen über Reichweite pro Schritt nur dann physikalisch, wenn man nicht durch rein *interne* lokale Operationen entfernte Systeme beeinflussen kann. Hier liegt die Rolle von No-Signalling: Es stellt sicher, dass *ohne* Kommunikation und *ohne* Outcome-Weitergabe eine lokale Operation die entfernte Marginale nicht ändert.

Lemma I.6.2.1: Lokale Operationen, globale Unabhängigkeit (No-Signalling)

Für disjunkte Systeme A, B und einen lokalen *CPTP*-Kanal Φ_A gilt für alle globalen Zustände ρ_{AB} :

$$\text{Tr}_A[(\Phi_A \otimes \text{id}_B)(\rho_{AB})] = \text{Tr}_A(\rho_{AB}).$$

D. h. die B -Marginale bleibt unverändert (No-Signalling) für die *unbedingte Dynamik*, also ohne Postselektion und ohne Übermittlung eines Messoutcomes. (Konditionierte Zustände nach selektiven Instrument-Ästen können sich ändern; das ist Steering und verletzt No-Signalling nicht.)[6]

Beweisskizze I.6.2.1: Lokale Operationen, globale Unabhängigkeit (No-Signalling)

Setze $\rho'_B := \text{Tr}_A[(\Phi_A \otimes \text{id}_B)(\rho_{AB})]$. Für jedes Observable M_B gilt

$$\text{Tr}[M_B \rho'_B] = \text{Tr}[(\mathbb{I}_A \otimes M_B)(\Phi_A \otimes \text{id}_B)(\rho_{AB})] = \text{Tr}[(\Phi_A^\dagger(\mathbb{I}_A) \otimes M_B) \rho_{AB}] = \text{Tr}[(\mathbb{I}_A \otimes M_B) \rho_{AB}],$$

da Φ_A spurtreu ist, also $\Phi_A^\dagger(\mathbb{I}_A) = \mathbb{I}_A$. Vollständige Positivität stellt sicher, dass dies auch bei beliebiger Verschränkung mit B wohldefiniert bleibt.

Damit ist die *kanalische* Lokalität gesichert. Die *geometrische* Reichweitemaussage entsteht dann, wenn man zusätzlich verlangt, dass der Aufbau *neuer* Einflüsse/Korrelationen zwischen getrennten Regionen als *externe* Kopplung modelliert und entsprechend extern budgetiert wird. Hier greift die Front: Sie bindet die pro Schritt verfügbare externe Kontierung an Δt und koppelt damit Reichweite an eine kalibrierte Zeitzuweisung.

Korollar I.6.2.1: Kausalitätskegel aus Budgetfront

Da externe Kontierung die Frontschränke $\|\Delta\mathbf{x}\| \leq c\Delta t$ garantiert (Lemma I.3.3.1), kann ein einzelner Schritt keine operational nachweisbare *Signalwirkung* über Distanzen außerhalb des Budget-Kegels etablieren (hier ist Δt die im Frame über ΔB^{ext} kalibrierte Koordinatenzeit, vgl. Definition I.3.3.1).

Insbesondere: Aus *initial unkorrelierten* Präparationen (Produktzustand und keine vorgeeilte Ressource zwischen den Regionen) kann in einem Schritt kein Aufbau *neuer* Korrelationen zwischen getrennten Regionen über $\|\Delta\mathbf{x}\| > c\Delta t$ erfolgen. Vorbestehende (z. B. verschränkte) Korrelationen sind damit verträglich und verletzen No-Signalling nicht.

Bell-Korrelationen ohne Signal

Zwei entfernte Stationen A, B werten verschränkte Paare aus. Messungen sind lokal CPTP (nicht-selektiv) und parallel verschaltet. Starke (Bell-)Korrelationen sind mit Lemma I.6.2.1 verträglich, da die B -Marginale unabhängig von der Wahl der Messbasis in A bleibt. Konditionierte Zustände (Steering) ändern daran nichts, solange kein Outcome/Setting von A nach B kommuniziert wird. Jede *aktive* Informationsübertragung würde zusätzliche externe Kontierung erfordern und ist durch $\|\Delta\mathbf{x}\| \leq c\Delta t$ beschränkt.

I.6.3 Lokale GKLS-Generatoren und Ausbreitungsschranken

Wenn GKLS als Refinement-Limes zulässiger, budgetierter Schritte gelesen wird (Abschnitt I.5.2), dann muss sich die diskrete Reichweitenstruktur im Kontinuum wiederfinden: Eine Effektivdynamik, die im Limes systematisch eine schnellere Ausbreitung zuließe als die zugrunde liegende Frontkalibration, wäre inkonsistent mit ihrer diskreten Herkunft. Lokalität auf Generatorniveau ist die Standardform, diese Konsistenz dynamisch zu erzwingen.

Definition I.6.3.1: Lokale GKLS-Generatoren

Ein GKLS-Generator $\mathcal{L} = \sum_X \mathcal{L}_X$ heißt *lokal*, wenn jeder Beitrag \mathcal{L}_X nur auf einem endlichen Gebiet X wirkt und die Beiträge kurzreichweitig sind (z. B. endliche Reichweite oder hinreichend schnelles Abfallen in $\|\mathcal{L}_X\|$ mit dem Durchmesser von X).

Anmerkung I.6.3.1: Lieb-Robinson-artige Schranke

Unter Standardannahmen an lokale (Lindblad-)Generatoren existieren Lieb-Robinson-artige Ausbreitungsschranken mit einer effektiven Geschwindigkeit v_{LR} , so dass Einflüsse außerhalb eines Kegels $\|\Delta\mathbf{x}\| > v_{\text{LR}} \Delta t$ stark unterdrückt sind.[14]

Dabei ist Δt eine (kalibrierte) Koordinatenzeit; ein Vergleich mit der Frontkonstante c ist daher in denselben Einheiten zu verstehen (ggf. unter Nutzung der Kalibration zwischen t und τ entlang der betrachteten Weltlinie, vgl. Definition I.4.1.1).

Im FBA wird die Front als Konsistenzbedingung gelesen: Zulässige lokale offene Dynamik muss mit der Budgetfront verträglich sein (operativ: effektive Ausbreitung darf die durch externe Kontierung gesetzte Grenze nicht überholen, also $v_{\text{LR}} \lesssim c$ in den kalibrierten Einheiten).

I.6.4 Kohärenz der Pfeile: DPI, Front und Komposition

Zum Schluss bündeln wir die Konsistenzforderungen: Informationspfeil (DPI), Geometriepfeil (Front) und Kompositionspfeil (Verschaltung) dürfen sich nicht gegenseitig konterkarieren. Das ist keine Zusatzkosmetik, sondern die Bedingung dafür, dass aus lokalen Aussagen globale Konsequenzen gezogen werden dürfen: DPI muss unter Verschaltung erhalten bleiben; Front muss unter Iteration/Refinement stabil bleiben; und No-Signalling muss mit beidem verträglich sein.

Formelkasten I.6.4.1: Kohärenzkriterien

(K1) DPI ist stabil unter \circ, \otimes (für eine kontraktive Divergenz D und CPTP-Kanäle).

(K2) Front-Schranken sind stabil unter Serienkomposition und Refinement (Formelkasten I.3.2.1) und invariant unter bloßem Relabeling/Verdrahtung.

(K3) No-Signalling (Lemma I.6.2.1) gilt für unbedingte lokale Operationen und ist mit lokalen GKLS-Generatoren verträglich.

Lemma I.6.4.1: Kein Widerspruch der Pfeile

Sind die beteiligten Kanäle CPTP (bzw. GKLS-induziert) und werden Budgets konsistent nach Kapitel I.3 allokiert, wobei externe Allokationen die Front respektieren, dann sind (K1)–(K3) erfüllt. Insbesondere kann keine zulässige Komposition DPI oder Front verletzen, ohne die jeweiligen Voraussetzungen (CPTP/GKLS bzw. Budget-/Kalibrationsregeln) zu verlassen.

Beweisskizze I.6.4.1: Kein Widerspruch der Pfeile

CPTP \Rightarrow DPI/Monotonie, und CPTP ist unter \circ, \otimes geschlossen.

Budget-Additivität/Refinement-Invarianz (Kapitel I.3) und die Kalibration der externen Kontierung \Rightarrow Stabilität der Frontschränke unter Komposition.

Teilspur + Parallelstruktur \Rightarrow No-Signalling für unbedingte lokale Operationen.

Zusammengenommen schließen diese drei Pfeile Umgehungen durch bloße Verschaltung/Umsegmentierung aus.

Zwischenfazit. Komposition macht die Theorie *rechnend*, Lokalität macht sie *physikalisch*. Zusammen – getragen von Budgetbilanz und Front – sichern sie, dass zulässige Kanäle nicht durch Darstellungstricks (Verdrahtung/Refinement) scheinbare Fernwirkung oder Budget-Arbitrage erzeugen können. Diese Struktur wird in den Folgeteilen an Feld-/Kausaldynamik und Geometrie weiter konkretisiert.^{29 30 31}

²⁹Siehe FBA Teil IV: Dynamik & Messung (GKLS), Kap. IV.3–IV.7.

³⁰Siehe FBA Teil V: Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie, Kap. V.4–V.6.

³¹Siehe FBA Teil VI: Gravitation & Geometrie aus Budgetflüssen, Kap. VI.2–VI.6.

I.7 Einordnung zu Standard-Sichten

Der FBA ersetzt die Annahme einer vorgängigen, universellen Zeitparametrisierung nicht durch ein „neues“ metaphysisches Bild, sondern durch eine operative Buchhaltung: Abfolge von Minimalereignissen, Budgetkonten und ihre Kalibration. Damit verschiebt sich die Priorität: Nicht „Welche Metrik gilt?“ steht am Anfang, sondern „Welche Konten sind operational zugänglich, und welche Schranken folgen allein aus Positivität, Additivität und Kalibration?“

Um diesen Perspektivwechsel sauber einzuordnen, kontrastieren wir mit drei vertrauten Sichten: (i) Newtons „äußerer Zeitparameter“, (ii) das Blockuniversum der vierdimensionalen Geometrie und (iii) die Standard-Quantenmechanik mit externer Zeit t . Ziel ist nicht Polemik, sondern *Übersetzung*: In welchen Regimen reduziert sich der FBA auf die Standardsprache? Wo ist die Standardsprache eine effektive Abkürzung für eine bilanzielle Aussage (Front/Eigenzeit)? Und wo wird sichtbar, welche Zusatzannahmen man implizit gemacht hat, wenn man Zeit von Anfang an als Parameter postuliert?

I.7.1 Newton-Zeit vs. FBA-Abfolge

Newtons Zeit ist ein überall gleicher Parameter, der „gleichförmig“ fortschreitet. Im FBA gibt es stattdessen eine ordinal gegebene Abfolge $\{U_n\}$ und eine externe Kalibration Δt aus externer Kontierung (Abschnitt I.3.3). Die entscheidende Frage ist daher nicht, ob t „existiert“, sondern ob t in einem Regime als *effektiver* Zeitparameter taugt, ohne dass man damit die intrinsische Uhr eines Systems (Eigenzeit) verfälscht.

Genau das ist der Newton-Limes im FBA: Wenn die Front praktisch nicht bindet und Dissipation vernachlässigbar ist, dann sind externe und interne Kontierung so entkoppelt, dass die systemgebundene Eigenzeit praktisch mit der extern kalibrierten Koordinatenzeit zusammenfällt. Die folgende Aussage macht diese Regimecharakterisierung transparent.

Lemma I.7.1.1: Newton-Limes als schwach-relativistisches, schwach-dissipatives Regime

Gilt $v := \|\Delta \mathbf{x}\|/\Delta t \ll c$, so folgt aus Lemma I.4.3.1

$$\Delta \tau_{\text{rev}}^{\text{min}} = \Delta t \sqrt{1 - v^2/c^2} \approx \Delta t.$$

Damit folgt im *minimal-reversiblen* Regime (d. h. $\Delta \tau_{\text{rev}} \approx \Delta \tau_{\text{rev}}^{\text{min}}$) und bei vernachlässigbarer Dissipation ($\Delta B^{\text{irr}} \approx 0$, also $A \approx 0$) aus $\tau = \tau_{\text{rev}} + A$, dass $\tau \approx t$ (bei $\kappa_\tau = \kappa_t$, Definition I.4.3.1).

In dieser Näherung ist die FBA-Dynamik durch eine externe Zeitparametrisierung t beschreibbar, kompatibel mit der ordinalen Abfolge.

Das ist der präzise Sinn, in dem „Newton-Zeit“ im FBA auftaucht: nicht als Grundstruktur, sondern als *Regimebegriff*. Sobald entweder die externe Relokation relevant wird (Frontnähe) oder die Irreversibilität nicht vernachlässigbar ist, bricht die Identifikation $\tau \approx t$ messbar auf.

Anmerkung I.7.1.1: Lesart

Der FBA benötigt keinen vorausgesetzten „Zeitfluss“. Die Abfolge zählt Aktualisierungen; die Größe t ist eine *Kalibration*, die in geeigneten Regimen zum effektiven Zeitparameter wird. Das bewahrt die Trennung von *Ordnung* (vor/nach) und *Maß* (wie viel).

Taktgeber im Labor

Eine Laboruhr im Ruhezustand erfährt $\Delta B^{\text{ext}} \approx 0$ und (bei guter Isolation) $\Delta B^{\text{irr}} \approx 0$; ihr Eigenzeit-Takt ist damit eine ausgezeichnete Realisierung von Δt . Wird die Uhr beschleunigt oder dissipativ belastet, divergieren t und der ideal-reversible Eigenzeitanteil messbar – klassische Zeitdilatation bzw. Alterung.

I.7.2 Blockuniversum vs. ME-Fortschreibung

Das Blockuniversum sieht „alles auf einmal“: eine vierdimensionale Struktur (typisch: Mannigfaltigkeit mit Metrik), in der „Vergangenheit“ und „Zukunft“ als unterschiedliche Schnitte erscheinen. Der FBA ist demgegenüber *prozedural*: Er beginnt mit Abfolge, Budget und Monotonien und fragt erst danach, welche geometrische Effektivstruktur diese Bilanz im geeigneten Limes trägt. Damit entsteht kein Widerspruch, sondern eine Verschiebung der logischen Reihenfolge: Geometrie ist Ergebnis einer Rekonstruktion, nicht Startpostulat.[3, 15]

Anmerkung I.7.2.1: Kompatibilität durch Rekonstruktion

Die aus Abschnitt I.4.3 gewonnene Minkowski-Quadrik liefert im reversiblen Limes eine effektive Lorentz-signaturartige Quadrik. Kombiniert mit der kausalen Partialordnung (Abschnitt I.2.2) ergibt dies eine *kausal-metrische Effektivstruktur*, die den Block-Blick in geeigneten Regimen *rekonstruiert*.

Eine glatte 4D-Mannigfaltigkeit mit Metrik im streng geometrischen Sinn erfordert zusätzliche Regularitäts-/Limesannahmen (die in den späteren Teilen explizit gemacht werden); im Teil I genügt die operative Rekonstruktion aus Bilanz+Ordnung.

Wichtig ist dabei, was „prozedural“ *nicht* bedeutet: Die Abfolge ist keine Lizenz für retrokausale Modellierung. Die kausale Präzedenz ist auf ME-Ebene fixiert; *nur* die Bündelung kausal getrennter MEs in gemeinsame Schritte ist Darstellungsfreiheit (Refinement), also ein „Gauge“ der Beschreibung.

Korollar I.7.2.1: Keine Retro-Kausalität, Koaktualisierung als Gauge

Wenn \preceq die kausale Präzedenz von Minimalereignissen kodiert (A5), sind kausale Zyklen auf ME-Ebene ausgeschlossen (insbesondere keine geschlossenen Präzedenzschleifen $e_0 \prec \dots \prec e_0$). Koaktualisierung kausal getrennter ME ist eine *Darstellungsfreiheit* (Refinement) ohne beobachtbare Konsequenz – kein physikalischer „Eingriff in die Vergangenheit“.

Zwei ferngekoppelte Messungen

Zwei raumartig getrennte Messungen können im FBA in einem Schritt koaktualisiert oder in zwei Schritten dargestellt werden. Beide Darstellungen sind äquivalent für alle Observablen, die nur Anfang/Ende und die Bilanz betreffen (Definition I.2.2.2); es gibt keinen Signalweg, der durch Wahl der Darstellung „aufpoppt“.

I.7.3 Standard-QM: externer Zeitparameter vs. Eigenzeit/Abfolge

In der Standard-QM taucht Zeit als externer Parameter t in der Schrödinger-Gleichung auf.[16, 17] Der FBA ordnet das als Regimeaussage ein: t ist eine *externe Kalibration* (κ_t), während die *Eigenzeit* τ aus internen Budgets entsteht. Solange man sich im (nahezu) reversiblen, schwach-relativistischen Regime bewegt, fällt diese Unterscheidung kaum auf ($\tau \approx t$); sobald Front oder Dissipation relevant sind, wird sie operational entscheidend. Im FBA ist daher die *natürliche* kontinuierliche Beschreibung offener Dynamik eine GKLS-Entwicklung in Eigenzeit τ ; eine t -parametrisierte Form ist dann eine abgeleitete Beschreibung über die Kettenregel: für $\rho(t) := \rho(\tau(t))$ gilt

$$\frac{d}{dt}\rho(t) = \frac{d\tau}{dt} \mathcal{L}(\rho) \quad (\text{mit } \mathcal{L} \text{ aus Definition I.5.2.1}),$$

wobei $d\tau/dt$ durch die Budgetkalibration entlang der betrachteten Weltlinie bestimmt ist (Definition I.4.1.1).

Definition I.7.3.1: Unitärer Limes und effektive Schrödinger-Dynamik

Wenn die effektive Entwicklung im betrachteten Regime *reversibel* modelliert werden kann (z. B. $b_\tau^{\text{irr}} \equiv 0$ und keine dissipativen Terme, also effektiv $L_j \equiv 0$), reduziert sich Definition I.5.2.1 auf

$$\frac{d}{d\tau}\rho(\tau) = -i[H(\tau), \rho(\tau)].$$

In einem Regime, in dem zudem $\tau \approx t$ (z. B. Newton-Limes) und $\kappa_\tau = \kappa_t$ (Definition I.4.3.1), erhält man äquivalent die übliche t -parametrisierte Schrödingerform. Dissipative Beiträge (L_j -Terme) beschreiben offene Dynamik in Eigenzeit τ ; mit $d\tau/dt$ folgt die entsprechende t -parametrisierte Master-Gleichung.

Damit wird auch die Rolle von „Messung“ im Vergleich zur Standarddarstellung scharf: Der relevante Unterschied ist nicht philosophisch, sondern protokollarisch. Nicht-selektive Beschreibung ist CPTP und damit unbedingte Dynamik; Selektion/Feedback ist ein Protokollwechsel, der als Instrument plus klassisches Register sichtbar gemacht werden muss. Genau an dieser Stelle wird der Informationspfeil operational.

Anmerkung I.7.3.1: Messung, CPTP und DPI als Brücke

Messungen sind in der *nicht-selektiven* Beschreibung CPTP (Abschnitt I.5.1); selektive Messäste sind CP-TNI (Instrument) und werden über ein klassisches Register operationalisiert. Coarse-Graining reduziert kontraktive Divergenzen (DPI, Abschnitt I.5.3).

Damit ist der „Zeitpfeil“ der Standard-QM im FBA *operativ* begründet: Nicht die Postulation eines gerichteten t , sondern Monotonie von Unterscheidbarkeiten fixiert die Richtung.

Wann divergieren t und τ ?

Schnelle Relokation (nahe an der Front, Lemma I.3.3.1) führt im ideal-reversiblen Regime zu $\Delta\tau_{\text{rev}}^{\text{min}} < \Delta t$ (Zeitdilatation). Starke Dissipation ($\Delta B^{\text{irr}} > 0$) führt zu messbarer Alterung $A > 0$ bei gleichem t -Protokoll und entkoppelt die reale Uhrdynamik vom ideal-reversiblen Minkowski-Takt.

Abschluss dieses Kapitels. Der FBA *ersetzt* nicht die bekannten Sichten, sondern *unterlegt* sie: Newton-Zeit erscheint als Regime $\tau \approx t$, das Blockuniversum als Rekonstruktion aus Abfolge+Kalibration, die Schrödinger-Dynamik als reversibler Spezialfall der budgetierten GKLS-Entwicklung. Der Mehrwert ist die gemeinsame, operative Begründung von *Front*, *Eigenzeit* und *Zeitpfeil* aus einer einzigen Bilanz.^{32 33 34}

³²Siehe FBA Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie, Kap. II.6–II.7.

³³Siehe FBA Teil V: Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie, Kap. V.4–V.6.

³⁴Siehe FBA Teil IV: Dynamik & Messung (GKLS), Kap. IV.3–IV.7.

I.8 Schnittstellen zu den Fachabhandlungen (Teile II bis X)

Bis hierhin haben wir eine in sich geschlossene Basisschicht aufgebaut: Abfolge globaler Zustände (Kapitel I.2), Budget-Kalkül (Kapitel I.3), Eigenzeit/Alterung und Minkowski-Limes (Kapitel I.4) sowie zulässige Dynamiken, Pfeile (DPI, Front) und Komposition (Kapitel I.5 und I.6). Die folgenden Fachabhandlungen (Teil II bis Teil X) verfeinern einzelne Aspekte.

Gerade weil die Reihe modular ist, entsteht ein typischer Review-Risikopunkt: In langen Textketten verschiebt sich Bedeutung oft *schleichend* (Symbole werden umetikettiert, Invarianten werden nur noch implizit benutzt, oder eine spätere Geometrieannahme wird „aus Versehen“ schon in einem früheren Beweis eingesetzt). Dieses Kapitel ist deshalb keine didaktische Wiederholung, sondern eine *Stabilitätsmaßnahme*: Wir machen explizit, was als Import feststeht, in welcher Richtung Argumente laufen dürfen, und welche Invarianten nie stillschweigend aufgegeben werden dürfen.

Zur Orientierung beginnen wir bewusst mit einer kompakten Trennung *Import vs. Erweiterung*. Diese Trennung ist der Kern der Modularität: Nur wenn klar ist, was unverändert bleibt, kann ein späterer Teil zusätzliche Struktur einführen, ohne im Nachhinein das Fundament umzudeuten.

I.8.1 Referenzanker je Abhandlung

Die Fachabhandlungen Teil II bis Teil X übernehmen die folgenden Bausteine *ohne* Modifikation und bauen darauf auf. Wir nennen pro Teil das *Ziel*, die *importierten Strukturen* aus dem vorliegenden Teil I und die *erweiternden Aussagen*. Die Form ist bewusst „vertraglich“: *Import* heißt „nicht neu definieren“; *Erweiterung* heißt „präzisieren, aber kompatibel bleiben“.

Importe & Erweiterungen auf einen Blick

1. **Teil II.** *Ziel:* Operationalisierung der Quadrik und Geodäten. *Import:* Abschnitte I.4.1 und I.4.3. *Erweiterung:* glatter Limes, Weltlinien-Variation, Geodäten als Extremalen der (minimal-)reversiblen internen Kontierung $\tau_{\text{rev}}^{\text{min}}$, experimentelle Kalibration $\kappa_{\tau} = \kappa_t$.
2. **Teil III.** *Ziel:* Zustandsräume, Kanäle, Komposition. *Import:* Kapitel I.5 und I.6. *Erweiterung:* konkrete Divergenzen/Kostenfaktoren \mathcal{C} (inkl. Domänen/Cutoffs), Struktur von Messungen/Instrumenten und Klassik-Registern.
3. **Teil IV.** *Ziel:* Generatoren, Spohn, offene Systeme. *Import:* Abschnitte I.5.2 und I.5.3. *Erweiterung:* stationäre/NESS-Referenzen, Flüsse/Raten $b_{\tau}^{\text{rev}}, b_{\tau}^{\text{irr}}, b_{\tau}^{\text{ext}}$, operative Bounds.
4. **Teil V.** *Ziel:* Lokale Feldgleichungen unter Front/Lokalität. *Import:* Abschnitt I.3.3 und Kapitel I.6. *Erweiterung:* lokale GKLS-Generatoren, Lieb–Robinson-artige Schranken, effektive Lichtkegel.
5. **Teil VI.** *Ziel:* Geometrisierung der Flüsse. *Import:* Abschnitt I.4.3. *Erweiterung:* effektive Metriken aus Kalibrationen (κ_t, κ_x) und internen Spannungen; Kopplung von Budget/Divergenzen an Krümmung.
6. **Teil VII.** *Ziel:* Skalenführung der κ -Sätze. *Import:* Definitionen I.3.3.1 und I.4.3.1. *Erweiterung:* Flow-Gleichungen für $\kappa_t, \kappa_x, \kappa_{\tau}$; Stabilitätsregime von $c = \kappa_t/\kappa_x$.
7. **Teil VIII.** *Ziel:* Makroskopik aus $A[\gamma]$. *Import:* Abschnitt I.4.2 und Formelkasten I.5.2.1. *Erweiterung:* Entropieproduktion, Euler–Lagrange-Formen für irreversible Flüsse, effektive Transportgleichungen.
8. **Teil IX.** *Ziel:* Globale Abfolge, Skalenfluss kosmischer Kalibrationen. *Import:* Kapitel I.3 und I.4. *Erweiterung:* Budgetgleichungen auf großskaligen Slices, Zeitdilatations-Inflation als Kalibrationsdynamik.
9. **Teil X.** *Ziel:* Testbare Differenzen, Mapping FBA \leftrightarrow QM/ART. *Import:* alle obigen. *Erweiterung:* Protokolle, Grenzfalltests, Konsistenzchecks (Pass/Fail).

Die Übersicht ist absichtlich *streng* zu lesen: Wenn ein späterer Teil an einer Stelle „bequemer“ formulieren möchte (z. B. geometrisch statt bilanziell), dann ist das nur zulässig, wenn die entsprechende Effektivstruktur *aus* den Importen hergeleitet oder als explizite zusätzliche Limesannahme deklariert wird. Genau so vermeidet man „Beweis durch Vokabularwechsel“.

I.8.2 Abhängigkeiten & Datenfluss

Neben „was wird importiert“ braucht es „in welcher Richtung darf man argumentieren“. Der Punkt ist nicht didaktisch, sondern logisch: Ohne gerichteten Datenfluss entstehen Zirkelschlüsse (z. B. Geometrie wird benutzt, um Front zu begründen, während Front zugleich Geometrie begründen soll). Wir fixieren daher eine einfache Pfeilstruktur: Grundlagen \rightarrow Kinematik/Dynamik \rightarrow Lokalität/Geometrie/Skalen \rightarrow Makroskopik/Kosmos \rightarrow Tests.

Formelkasten I.8.2.1: Graph der Abhängigkeiten (informell)

(I) Grundlagen \rightarrow {(II) Zeit, (III) Kinematik, (IV) Dynamik}
 \rightarrow {(V) LFT, (VI) Grav, (VII) Skalen}
 \rightarrow {(VIII) Thermo, (IX) Kosmos} \rightarrow (X) Tests

Aus dieser Pfeilstruktur folgen praktische Lesepfade: Wer einen Block isoliert liest, kann entlang der Pfeile vorwärts gehen, ohne „von hinten“ Voraussetzungen zu importieren, die in der jeweiligen Abhandlung erst hergeleitet werden sollen.

Anmerkung I.8.2.1: Lesefaden

- **Geometrie:** (II) \rightarrow (V) \rightarrow (VI) – Quadrik \Rightarrow Lichtkegel \Rightarrow Geometrie aus Budgetflüssen.
- **Offene Systeme:** (III) \rightarrow (IV) \rightarrow (VIII) – Kinematik \Rightarrow GKLS/Spohn \Rightarrow Thermodynamik & Altern.
- **Kosmos:** (VII) \rightarrow (IX) – Skalenführung der κ /Stabilität von c \Rightarrow TDI & kosmische Dynamik.

I.8.3 Schnittstellenverträge (Invarianten)

Die Abhängigkeitspfeile allein genügen nicht: Eine Abhandlung kann „vorwärts“ gehen und dennoch Invarianten brechen (z. B. Refinement-Leaks, versteckte Postselektion, superluminale Hilfskonstrukte). Deshalb verpflichten sich die Teile II bis X auf eine kleine Menge expliziter Invarianten, die genau die typischen Bruchstellen absichern: (i) Begriffsdrift (Primitive), (ii) Darstellungsartefakte (Refinement), (iii) Pfeil-/Kausalitätsverletzungen (DPI/Front/Lokalität).

Definition I.8.3.1: I0: Importierte Primitive

Die Abhandlungen (Teil II bis X) importieren unverändert: Definitionen I.2.1.1, I.2.3.1, I.3.1.1 und I.5.3.1, die Bilanzgleichungen Formelkasten I.3.2.1 und die Frontschränke Lemma I.3.3.1. Keine Abhandlung führt eine neue „Zeitvariable“ als Postulat ein; metrische Größen sind *Kalibrationen*.

Definition I.8.3.2: I1: Refinement-Invarianz

Alle observablen Funktoren (Eigenzeit, Alterung, Kosten-/Divergenz-Drops) sind invariant unter endlicher Verfeinerung der Abfolge (Lemma I.3.2.1 und Definition I.2.2.2). Beweise müssen diese Invarianz explizit nutzen oder erhalten.

Definition I.8.3.3: I2: DPI/Spohn als Pfeil

Jede dynamische Aussage (diskret oder GKLS) respektiert kontraktive Divergenzen (Abschnitt I.5.3) und, *wo anwendbar* (geeignete Referenzzustände wie stationär/NESS), im Limes die Spohn-Monotonie (Formelkasten I.5.2.1). Zeitrichtung argumentativ *nur* über Monotonie, nicht über ein externes Zeitpostulat.

Definition I.8.3.4: I3: Front/Lokalität

Die Frontschränke begrenzt pro Schritt die *kausale Einflussnahme/Signalwirkung* in der extern kalibrierten Geometrie (Lemma I.3.3.1 und Korollar I.3.3.1). Insbesondere kann der *Aufbau* neuer Korrelationen aus lokal unkorrelierten Ausgangslagen pro Schritt nur innerhalb des Budget-Kegels erfolgen; dabei ist „unkorreliert“ im operationalen Sinn zu verstehen (Produktpräparation und keine vorgeteilte Ressource/kein Outcome-Transfer zwischen den Regionen). Vorbestehende (z. B. verschränkte) Korrelationen sind damit kompatibel. Lokale Aussagen basieren auf CPTP-Lokalität und Teils pur (No-Signalling, Abschnitt I.6.2). Kein Resultat darf diese Schranken umgehen.

Definition I.8.3.5: I4: Kalibrationen κ & Metrik

$\kappa_t, \kappa_x, \kappa_\tau$ sind Mess-/Kalibrationssätze (Definitionen I.3.3.1 und I.4.3.1). Effekte auf „Konstanten“ werden als *Skalenfluss* (Teil VII) geführt, *nicht* als Postulate neuer Konstanten.

I.8.4 Beispiele für die Nutzung der Verträge

Die Verträge sind nur dann hilfreich, wenn man sie in typischen Beweisschritten *wirklich* als Nebenbedingungen mitführt. Die folgenden Beispiele markieren deshalb jeweils den kritischen Punkt: wo genau ein Vertrag Artefakte verhindert (und nicht nur „schön klingt“).

Teil II: Zeit, Eigenzeit & Minkowski-Geometrie nutzt I0 bis I4

Aus Formelkasten I.4.3.1 werden Geodäten als Extremalenproblem der (minimal-)reversiblen internen Kontierung hergeleitet. I1 sichert, dass die Geodätenwahl nicht von der Granularität der Abfolge abhängt. I2/I3 verhindern „Abkürzungen“ über den Kegelrand; I4 koppelt an Uhren/Lineale.

Teil V: Raumzeit, Lichtkegel & lokale Feldtheorie nutzt I1 bis I3

Lokale GKLS-Generatoren definieren Felddynamik; in Kombination mit I3 (Front/Lokalität) und Standard-Lokalitätsannahmen folgen Lieb–Robinson-artige Ausbreitungsschranken. I2 setzt den Zeitpfeil; I1 garantiert, dass Gitterverfeinerung (Diskretisierung) keine Artefakte erzeugt.

Teil IX: Kosmische Dynamik, Time Dilation & Inflation (TDI) nutzt I0, I4

Kosmische Budgetgleichungen handhaben κ -Flows großskaliger Slices. TDI erscheint als Variation von κ_t/κ_τ entlang der globalen Abfolge; die Interpretation bleibt kalibratorisch (I4), *ohne* neue Postulate über „kosmische Zeit“ (I0/I2).

I.8.5 Typische Fehlerbilder (und wie man sie vermeidet)

Die häufigsten Probleme in modularen Reihen sind selten Rechenfehler, sondern stillschweigende Protokollwechsel: Man nutzt Geometrie, bevor sie kalibriert ist; man argumentiert mit „vorwärts in t “, wo eigentlich DPI/Spohn die Richtung liefern soll; oder man baut implizit Kommunikation über Outcome-Weitergabe ein und nennt es dann „lokal“. Die folgende Liste ist deshalb als Anti-Drift-Check gedacht.

Antipatterns

- (F1) **Implicit Postulate.** c oder Minkowski als Axiom statt als Kalibrations-/Limes. *Symptom:* Direkte Verwendung von ds^2 oder einer Lichtkegelstruktur in Hypothesen ohne vorherige Kalibration. *Gegenmaßnahme:* Ableitung strikt über Budget-Quadrik und Front-Kalibration (Abschnitt I.4.3).
- (F2) **Refinement-Leak.** Ergebnisse hängen von der Schrittgranularität ab. *Symptom:* Werte ändern sich bei Rebinning/Feinschnitt. *Gegenmaßnahme:* Refinement-Invarianz explizit nachweisen (Vertrag I1) via Lemma I.3.2.1 und Definition I.2.2.2.
- (F3) **Zeitpfeil „von außen“.** Richtung über t -Postulat statt über Monotonie. *Symptom:* „Vorwärts in t “ als Begründung für Entropiezunahme. *Gegenmaßnahme:* Pfeil ausschließlich aus DPI/Spohn ableiten (Abschnitt I.5.3 und Formelkasten I.5.2.1); t bleibt Kalibration.
- (F4) **Superluminale Hilfskonstrukte.** Signalwirkung bzw. Aufbau neuer Korrelationen außerhalb des Budget-Kegels durch Modelltrick. *Symptom:* In einem Schritt entsteht kausaler Einfluss mit $\|\Delta\mathbf{x}\| > c\Delta t$. *Gegenmaßnahme:* Frontschränke & No-Signalling erzwingen (Lemmata I.3.3.1 und I.6.2.1 und Korollar I.3.3.1); lokale CPTP-Struktur nutzen.
- (F5) **Konstanten-Konfusion.** Einführung neuer „Konstanten“ statt Skalenfluss der κ -Sätze. *Symptom:* Feste Parameter ohne empirische Kalibration. *Gegenmaßnahme:* Als Kalibrationen behandeln (Definitionen I.3.3.1 und I.4.3.1) und unter Skalenfluss (Teil VII) führen.

Für die Praxis ist oft eine kurze Preflight-Liste hilfreicher als lange Prosa: Sie zwingt dazu, die drei kritischen Invarianten (Refinement, Pfeil, Front) bei jedem großen Resultat sichtbar mitzuziehen.

Anmerkung I.8.5.1: Checkliste für jede Abhandlung

1. **Imports benennen.** Führe die konkret *importierten* Definitionen/Boxen aus Teil I explizit an (z. B. Zustände/ME, Budget-Kalkül, DPI/Front), bevor neue Struktur eingeführt wird.
2. **Kompatibilität nachweisen.** Prüfe bei den Hauptsätzen ausdrücklich: *(i)* DPI/Spohn-Monotonie, *(ii)* Front-Schranken, *(iii)* Refinement-Invarianz. Verweise auf die entsprechenden Grundlagen-Resultate.
3. **Kalibrationen offenlegen.** Mache alle verwendeten κ -Sätze ($\kappa_t, \kappa_x, \kappa_\tau$) und ihre Messprozeduren explizit; vermerke, ob/wo Skalenfluss (Teil VII) genutzt wird und wie die empirische Ankopplung erfolgt.
4. **Rückführung auf Standardformen.** Identifiziere ein klares Regime/Limes, das bekannte Beschreibungen reproduziert (z. B. unitär/ t -parametrisiert, Newton-Limes, effektive 4D-Geometrie); verorte dies in der Einordnung (Kapitel I.7).

Abschluss dieses Kapitels. Die Schnittstellenverträge garantieren, dass die Abhandlungen Teil II bis Teil X dasselbe Fundament teilen: *Abfolge* statt vorausgesetzter *Zeit*, *Budget* statt freier Ressourcen, *Kalibration* statt unverstandener Konstanten, *DPI* statt metaphysischer Pfeile und *Front* statt ad-hoc gesetzter Lichtkegel. Damit bleibt die Theorie modular und prüfbar und die Argumentationskette kohärent vom Qubit bis zum Kosmos.

I.9 Zusammenfassung & Checkliste (Pass/Fail)

Die vorangehenden Kapitel haben Bühne (Kapitel I.2), Buchhaltung (Kapitel I.3), Uhren/Zähler (Kapitel I.4), Dynamik & Pfeile (Kapitel I.5) sowie Komposition & Lokalität (Kapitel I.6) aufgebaut. Dieses Abschlusskapitel kondensiert das in eine *Arbeits-Checkliste*: Woran erkennt man, dass eine konkrete Modellierung, ein Beweis oder ein Experiment *FBA-kompatibel* ist? Und vor allem: Was muss man *zwingend* prüfen, damit spätere Spezialisierungen (Teile II bis X) nicht unbemerkt das Fundament verschieben?³⁵

Die Checkliste ist absichtlich als Pass/Fail aufgebaut: Sie soll nicht „schön interpretieren“, sondern *früh* zeigen, wo eine Argumentation an Refinement-Leaks, unkalibrierten Konstanten oder selektionsbedingten Protokollwechseln scheitert. In empirischen Anwendungen gelten die Tests dabei stets *bis auf Toleranzen* δ_* . (Fenster, Residuen, Bootstrap, Pass/Fail-Bänder); diese δ_* sind Daten-/Protokollgrößen und dürfen nicht mit Modell-/Approx-Parametern ε verwechselt werden.

I.9.1 Kernaussagen in zehn Zeilen

Bevor wir prüfen, legen wir die Minimalstruktur offen, die später *nicht* stillschweigend geändert werden darf. Das ist weniger eine „Zusammenfassung“ als ein *Invariantenkatalog*: Wer hier abweicht, hat nicht mehr „den FBA“, sondern eine andere Theorie.

³⁵Gemeint sind die Teile II bis X; eine Übersicht der Schnittstellen findet sich in Kapitel I.8.

FBA in zehn Zeilen

1. Realität aktualisiert sich in einer ordinalen Abfolge $\{U_n\}$; ein Aktualisierungsschritt $U_n \rightarrow U_{n+1}$ kann eine oder mehrere Minimalereignisse bündeln (kein vorausgesetzter Zeitparameter, Kapitel I.2).
2. Pro Schritt gibt es ein Budget $\Delta B = \Delta B^{\text{int}} + \Delta B^{\text{ext}}$ mit $\Delta B^{\text{int}} = \Delta B^{\text{rev}} + \Delta B^{\text{irr}}$ (Abschnitt I.3.1).
3. Additivität unter Serie/Parallel und Refinement-Invarianz sind nicht verhandelbar (Formelkasten I.3.2.1 und Lemma I.3.2.1).
4. Externe Kalibrationen definieren eine Frontschranke $\|\Delta \mathbf{x}\| \leq c \Delta t$ mit $c = \kappa_t / \kappa_x$ (Lemma I.3.3.1).
5. Eigenzeit ist der integrierte *interne* Fluss; Alterung der integrierte *irreversible* Fluss (Kapitel I.4).
6. Die Minkowski-Quadrik ist eine Bilanzrelation im (minimal-)reversiblen Limes, keine Postulation (Abschnitt I.4.3).
7. Zulässige Prozesse sind CPTP (diskret) bzw. GKLS (kontinuierlich)^a mit Budgetrestriktion (Kapitel I.5).
8. Der Zeitpfeil ist operativ: kontraktive Divergenzen sind monoton (DPI; im GKLS-Limes wo anwendbar Spohn)^b (Abschnitt I.5.3 und Formelkasten I.5.2.1).
9. Komposition ist (symmetrisch-)monoidal; No-Signalling folgt aus CPTP + Teilspur, die Front macht die Reichweite geometrisch wirksam (Kapitel I.6).
10. Newton-, Schrödinger- und Block-Bilder erscheinen als Regime bzw. Rekonstruktionen, nicht als Axiome (Kapitel I.7).

^aCPTP = *completely positive, trace-preserving* (vollständig positiv und spurtreu). GKLS = *Gorini-Kossakowski-Lindblad-Sudarshan*-Form von Generatoren offener Systemdynamik.

^bDPI = Datenverarbeitungsungleichung (Monotonie kontraktiver Divergenzen unter CPTP); „Spohn“ bezeichnet eine differentielle Form dieser Monotonie unter geeigneten Voraussetzungen (z. B. stationärer/treuer Referenzzustand). Vgl. Abschnitt I.5.3.

Aus diesen zehn Zeilen folgt: Wer FBA-kompatibel argumentieren will, muss *immer* zeigen (oder als Import aus Teil I sauber zitieren), dass Refinement keine Artefakte erzeugt, dass c kalibriert ist (nicht postuliert), und dass Pfeil/Lokalität nicht über selektive Beschreibungen „hineingeschmuggelt“ werden.

I.9.2 Pass/Fail-Kriterien (Pflichtfelder)

Die folgenden Pflichtfelder sind absichtlich knapp und technisch: Sie sind die Stellen, an denen Fehlerbilder typischerweise auftreten. In reinen Modell-/Beweis-Settings gelten die Kriterien „hart“. In empirischen Settings gelten sie bis auf explizite, protokollabhängige Toleranzen δ_* . (z. B. $\delta_{B,*}$ für Bilanzresiduen, $\delta_{D,*}$ für DPI-Tests, $\delta_{F,*}$ für Front-Tests).

Formelkasten I.9.2.1: Pflichtkriterien für FBA-Kompatibilität

(C1) Bilanz & Refinement *Anforderung:* ΔB ist additiv unter Serie (\circ) und Parallel (\otimes); alle aus $\Delta B^{\text{int/ext/irr}}$ gebildeten Funktoren sind unter endlichem Refinement invariant.
Minimaltest: Für jede Zerlegung gilt $\sum_k \Delta B^{(k)} = \Delta B$ sowie komponentenweise Gleiches; τ, A ändern sich unter Feinschnitt nicht (bis auf ein ausgewiesenes Residuum $\delta_{B,*}$ in empirischen Kontierungen).
Referenz: Formelkasten I.3.2.1 und Lemma I.3.2.1.

(C2) Front *Anforderung:* Externe Kalibrationen κ_t, κ_x sind explizit angegeben und implizieren die Schranke $\|\Delta \mathbf{x}\| \leq c \Delta t$ mit $c = \kappa_t / \kappa_x$.
Minimaltest: Ausweisen der benutzten κ -Sätze (z. B. $\Delta B^{\text{ext}} = \kappa_t \Delta t$ und $\kappa_x \|\Delta \mathbf{x}\| \leq \Delta B^{\text{ext}}$) und Nachweis der Frontschranke pro Schritt (bis auf ein Messband $\delta_{F,*}$, falls $\Delta t, \Delta \mathbf{x}$ experimentell geschätzt werden).
Referenz: Definition I.3.3.1 und Lemma I.3.3.1.

(C3) Eigenzeit & Alterung *Anforderung:* $\tau[\gamma] = \sum \Delta B^{\text{int}} / \kappa_\tau, A[\gamma] = \sum \Delta B^{\text{irr}} / \kappa_\tau$ mit $0 \leq A[\gamma] \leq \tau[\gamma]$.
Minimaltest: Offenlegung der Wahl von κ_τ und Prüfung der Schranke $A \leq \tau$; in Datenform: Verletzungen müssen als Schätz-/Fensterfehler $\delta_{A,*}$ ausgewiesen werden, nicht als „neue Physik“.
Referenz: Kapitel I.4.

(C4) Dynamik *Anforderung:* Diskret CPTP (Kraus/Stinespring), kontinuierlich GKLS; Kostenfunktoren \mathcal{C} erfüllt $\mathcal{C}(\Psi \circ \Phi) \leq \mathcal{C}(\Psi) + \mathcal{C}(\Phi)$ und im Eigenzeit-Limes eine integrierte Budgetbindung

$$\mathcal{C}(\Phi_{\tau_2}) - \mathcal{C}(\Phi_{\tau_1}) \leq \int_{\tau_1}^{\tau_2} (b_\tau^{\text{int}}(\tau) + b_\tau^{\text{ext}}(\tau)) d\tau,$$

(falls $\mathcal{C}(\Phi_\tau)$ differenzierbar ist, folgt daraus punktweise $\frac{d}{d\tau} \mathcal{C}(\Phi_\tau) \leq b_\tau^{\text{int}} + b_\tau^{\text{ext}}$ als Kurzform).
Minimaltest: Angabe von Kraus/Stinespring bzw. GKLS-Generator und Nachweis der Kosten-Subadditivität; Domäne/Cutoff und Normierung von \mathcal{C} (z. B. $\mathcal{D}_\varepsilon, \kappa_\mathcal{C}$) offenlegen; falls initiale Korrelationen relevant sind, Systemgrenze/Frame so wählen, dass die effektive Schrittbeschreibung CPTP ist.
Referenz: Kapitel I.5.

(C5) Pfeile (DPI/Spohn) *Anforderung:* Für eine kontraktive Divergenz D gilt $D(\Phi\rho\|\Phi\sigma) \leq D(\rho\|\sigma)$; im Kontinuum (wo anwendbar, z. B. stationäre/treue Referenz ω) $\frac{d}{d\tau} D(\rho_\tau\|\omega) \leq 0$.
Minimaltest: Wahl von D dokumentieren und DPI (diskret) bzw. Spohn-Monotonie (GKLS-Limes, unter den verwendeten Voraussetzungen) für die verwendeten Φ bzw. \mathcal{L} zeigen; selektive/feedback-basierte Protokolle explizit als Protokollwechsel markieren (sonst falsche DPI-Anwendung).
Referenz: Abschnitt I.5.3 und Formelkasten I.5.2.1.

(C6) Lokalität *Anforderung:* No-Signalling: $\text{Tr}_A[(\Phi_A \otimes \text{id}_B)\rho_{AB}] = \text{Tr}_A \rho_{AB}$ (unbedingte lokale Operationen); die Front begrenzt pro Schritt die *Signalwirkung/kausale Einflussnahme* und insbesondere den *Aufbau neuer* Korrelationen aus operational unkorrelierten Ausgangslagen (Produktpräparation und keine vorgeteilte Ressource/kein Outcome-Transfer zwischen den Regionen).
Minimaltest: Teilspurtest für lokale Kanäle und operativer Nachweis, dass kausale Einflussnahme nur innerhalb $\|\Delta \mathbf{x}\| \leq c \Delta t$ möglich ist (bis auf ausgewiesene Messfenster $\delta_{NS,*}, \delta_{F,*}$).
Referenz: Abschnitt I.6.2 und Lemma I.3.3.1.

Der Sinn der Pflichtfelder ist nicht, „alles zu beweisen“, sondern die *Stellen* zu kontrollieren, an denen sonst scheinbar spektakuläre Effekte aus reiner Buchhaltung entstehen: Refinement erzeugt dann „Physik“, Selektion wird als „Dynamik“ verkauft, oder Reichweite wird über implizite Kommunikation gewonnen.

Korollar I.9.2.1: Konsequenz der Pflichtfelder

Wenn (C1)–(C6) erfüllt sind, gilt: (i) keine superluminale Kommunikation (im Sinne operationaler Signalwirkung), (ii) keine „kostenlose“ Unterscheidbarkeitsvermehrung unter zulässigen Kanälen, (iii) Minkowski-Struktur als konsistenter Limes im (minimal-)reversiblen Regime unter kalibrierter Front, (iv) Newton/Schrödinger als Spezialfälle in den jeweils ausgewiesenen Näherungsregimen.

I.9.3 Audit-Protokoll (praktische Prüfungen)

In der Praxis scheitern Projekte selten daran, dass ein einzelner Satz falsch ist, sondern daran, dass Budgets/Kalibrationen/Protokolle nicht vollständig inventarisiert sind. Das folgende Audit zwingt deshalb, zuerst *Objekte und Schnittstellen* zu klären und erst dann in Ableitungen zu gehen.

Definition I.9.3.1: Modell-/Beweisaudit in fünf Schritten

- (S1) Inventarisieren** *Ziel:* Umfang und Schnittstellen klären.
Output: Liste aller Systeme, Zerlegung in disjunkte Subsysteme, Menge der verwendeten Kanäle $\{\Phi_i\}$ bzw. Generatoren $\{\mathcal{L}_j\}$.
- (S2) Bilanzieren** *Ziel:* Konsistente Buchhaltung.
Prüfschritt: Pro Schritt $\Delta B^{\text{int}}, \Delta B^{\text{ext}}, \Delta B^{\text{irr}}$ ausweisen.
Nachweis: Additivität unter Serie (\circ) und Parallel (\otimes) sowie Refinement-Invarianz der aus den Budgets gebildeten Funktoren (empirisch: Residuen als $\delta_{B,*}$ protokollieren).
- (S3) Kalibrieren** *Ziel:* Externe und interne Skalen festzurren.
Daten: $\kappa_t, \kappa_x, \kappa_\tau$ explizit angeben.
Test: $c = \kappa_t/\kappa_x$ bestimmen und $\|\Delta \mathbf{x}\| \leq c \Delta t$ pro Schritt prüfen (mit Messband $\delta_{F,*}$, falls nötig).
- (S4) Pfeil prüfen** *Ziel:* Richtung der Entwicklung verifizieren.
Wahl: Eine kontraktive Divergenz D festlegen.
Nachweis: DPI für alle eingesetzten Φ zeigen und im kontinuierlichen Regime (wo anwendbar) Spohn-Monotonie für \mathcal{L} . Selektive/feedback-basierte Protokolle als Protokollwechsel führen (sonst falsche DPI-Lesart).
- (S5) Lokalität testen** *Ziel:* No-Signalling und Reichweitenbegrenzung sichern.
Tests: Teilspurtest $\text{Tr}_A[(\Phi_A \otimes \text{id}_B)\rho_{AB}] = \text{Tr}_A \rho_{AB}$. Operativer Reichweitentest: kausale Einflussnahme bzw. Aufbau *neuer* Korrelationen aus operational unkorrelierten Ausgangslagen (Produktpräparation und keine vorgeteilte Ressource/kein Outcome-Transfer) nur innerhalb des Budget-Kegels $\|\Delta \mathbf{x}\| \leq c \Delta t$.

Ein nützlicher Nebeneffekt des Audits: Wenn etwas „nicht passt“, ist klar, *welcher Vertrag* gebrochen ist (Bilanz, Kalibration, Pfeil oder Lokalität) — statt dass man in Interpretationen ausweicht.

Schnelltest auf Papier

Check 1 – c /Metrik ohne Kalibration? Liegt irgendwo ein implizit postuliertes c oder eine Metrik statt κ -Kalibration vor? \Rightarrow **Fail**.

Check 2 – Refinement–Leak? Hängen Aussagen von der Anzahl der Zwischenschritte ab? \Rightarrow **Fail**.

Check 3 – DPI verletzt? Wird Unterscheidbarkeit nach CPTP erhöht, ohne Budgetquelle? \Rightarrow **Fail**.

Check 4 – Front verletzt? Tritt kausale Einflussnahme bzw. Korrelationsaufbau (aus operational unkorrelierten Ausgangslagen ohne vorgeteilte Ressource/Outcome-Transfer) mit $\|\Delta\mathbf{x}\| > c \Delta t$ auf? \Rightarrow **Fail**.

I.9.4 Beweisfahrplan (minimaler Pflichtumfang)

Neue Resultate werden in der Reihe typischerweise als Lemma/Satz/Proposition formuliert. Damit diese Resultate nicht nur „formal richtig“, sondern auch *FBA-kompatibel* sind, müssen sie einen minimalen Pflichtumfang abdecken: Wohl-Definiertheit (Refinement), Pfeil (DPI/Spohn), Front (Kalibration) und saubere Komposition.

Formelkasten I.9.4.1: Pflicht-Beweisschritte für neue Ergebnisse

- (P1) Wohl-Definiertheit** *Ziel:* Verwendete Funktoren sind unabhängig von der Schrittgranularität.
Nachweis: Zeigen Sie Refinement-Invarianz für alle relevanten Größen, insbesondere τ, A, \mathcal{C} .
Referenz: Lemma I.3.2.1.
- (P2) Monotonie** *Ziel:* Zeitrichtung ist operativ fixiert.
Nachweis: Wählen Sie eine kontraktive Divergenz D und belegen Sie $D(\Phi\rho\|\Phi\sigma) \leq D(\rho\|\sigma)$; im kontinuierlichen Regime (unter den jeweils verwendeten Voraussetzungen, z. B. stationäre/treue Referenz ω) $\frac{d}{dt}D(\rho_t\|\omega) \leq 0$ (Spohn).
Referenz: Formelkasten I.5.2.1 und Definition I.5.3.1.
- (P3) Front-Kompatibilität** *Ziel:* Reichweiten- und Zeitabschätzungen sind kalibratorisch begründet.
Nachweis: Führen Sie alle Bounds explizit auf κ -Kalibration und $\|\Delta\mathbf{x}\| \leq c \Delta t$ mit $c = \kappa_t/\kappa_x$ zurück.
Referenz: Lemma I.3.3.1 und Definition I.3.3.1.
- (P4) Limes** *Ziel:* Klarer Rückweg zu Standardregimen.
Nachweis: Geben Sie die Bedingungen an, unter denen Newton/Schrödinger/Minkowski erreicht wird (z. B. $v \ll c$, $\Delta B^{\text{irr}} = 0$, $\kappa_\tau = \kappa_t$).
Referenz: Lemma I.4.3.1, Definition I.7.3.1, und Abschnitt I.4.3.
- (P5) Komposition** *Ziel:* Schließung und saubere Buchhaltung unter Serie/Parallel.
Nachweis: Weisen Sie Additivität der Budgets und Subadditivität der Kosten unter \circ, \otimes nach – keine Budgetinflation durch Verkabelung.
Referenz: Formelkasten I.6.1.1 und Lemma I.6.1.2.

I.9.5 Rote Flaggen (typische Fehlerbilder)

Die roten Flaggen sind absichtlich redundant zu den Pflichtkriterien formuliert: Sie sind die schnellsten Indikatoren dafür, dass eine Argumentation gerade in Richtung „implizites Postulat“ oder „Protokollwechsel ohne Kennzeichnung“ abdriftet.

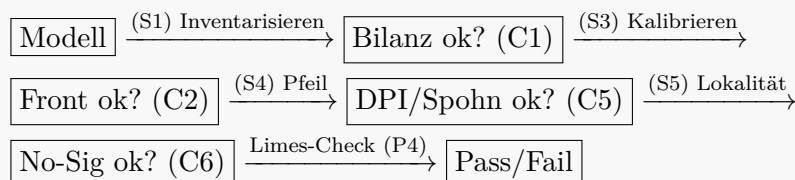
Rote Flaggen

- (R1) Zeit als eigenständige Variable** *Erkennung:* „Zeit“ wird als dynamische Größe eingeführt, entkoppelt von ΔB^{int} .
Sofortmaßnahme: Zeit ausschließlich als Kalibration behandeln und an die Eigenzeitdefinition koppeln; interne Flüsse als Primärgröße verwenden (Kapitel I.4).
- (R2) Unkalibriertes c** *Erkennung:* Verwendung von c ohne Nachweis $c = \kappa_t / \kappa_x$.
Sofortmaßnahme: κ_t, κ_x offenlegen, c kalibrieren und Frontschränke prüfen (Definitionen I.3.3.1 und I.4.3.1 und Lemma I.3.3.1).
- (R3) Refinement–Leak** *Erkennung:* Aussagen ändern sich unter Feinschnitt oder Koaktualisierung.
Sofortmaßnahme: Refinement–Invarianz explizit zeigen, insbesondere für τ, A, C (Lemma I.3.2.1 und Definition I.2.2.2).
- (R4) DPI–Umgehung** *Erkennung:* Nicht–CP–Karten, postselektierte „Wunder“ ohne Budget, steigende Divergenz nach CPTP, oder DPI/Spohn wird auf selektive Äste angewandt, ohne den Protokollwechsel zu markieren.
Sofortmaßnahme: Nur CPTP bzw. GKLS verwenden; selektive Schritte als Instrument/Protokollwechsel führen; Budgetquelle deklarieren und DPI/Spohn in der *unbedingten* Beschreibung nachweisen (Definition I.5.3.1, Formelkasten I.5.2.1, und Kapitel I.5).
- (R5) Front/No–Signalling verletzt** *Erkennung:* Kausale Einflussnahme (bzw. Aufbau *neuer* Korrelationen aus operational unkorrelierten Ausgangslagen ohne vorgeteilte Ressource/Outcome-Transfer) mit $\|\Delta \mathbf{x}\| > c \Delta t$ oder Änderung der B –Marginalen durch lokalen Eingriff auf A .
Sofortmaßnahme: Frontschränke und Teilspurtest durchführen; lokale Generatoren verwenden (Lemmata I.3.3.1 und I.6.2.1 und Abschnitte I.6.2 und I.6.3).

I.9.6 Entscheidungsbaum (Quickstart)

Zum Abschluss ein kompakter Fluss, der Pass/Fail operativ macht: Er soll helfen, *in welcher Reihenfolge* man prüft, damit man nicht an Symptomen (z. B. vermeintliche Superluminalität) herumrechnet, während die Ursache ein fehlender Kalibrationsnachweis oder ein Refinement–Leak ist.

Formelkasten I.9.6.1: Quickstart-Fluss



Schlussbemerkung. Der FBA verlangt wenig, aber er ist *streng* in diesem Wenigen: Bilanz, Front, Pfeil, Lokalität. Wer diese vier Pfeiler (mit expliziten Kalibrationen und ausgewiesenen

Toleranzen $\delta_{*,.}$ in empirischen Situationen) erfüllt, bekommt Geometrie (Minkowski-Limes), Dynamik (GKLS/Schrödinger-Regime) und Kausalität (Budgetkegel/No-Signalling) nicht als Postulate, sondern als überprüfbare Konsequenzen einer sauberen Buchhaltung.

I.10 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:* Basischicht 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, Lese-faden.
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 $b^{\text{rev}}, b^{\text{irr}}, b^{\text{ext}}$.
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 Kalibrations-sätze. *Import:* $c = \kappa_t/\kappa_x, \kappa_\tau$. *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 \rightarrow QM \leftrightarrow ART.** *Ziel:* Testbare Differenzen und Brücken FBA \leftrightarrow 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>

Literatur

- [1] W. Rindler. *Relativity. Special, General, and Cosmological*. 2. Aufl. Oxford: Oxford University Press, 2006. ISBN: 9780198567325.
- [2] S. M. Carroll. *Spacetime and Geometry. An Introduction to General Relativity*. San Francisco: Addison-Wesley, 2004. ISBN: 9780805387322.
- [3] H. Minkowski. „Raum und Zeit“. In: *Physikalische Zeitschrift* 10 (1909). Vortrag auf der 80. Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte (Köln, 1908)., S. 104–111.
- [4] W. F. Stinespring. „Positive Functions on C^* -Algebras“. In: *Proceedings of the American Mathematical Society* 6.2 (1955), S. 211–216. DOI: 10.2307/2032342.
- [5] K. Kraus. *States, Effects, and Operations: Fundamental Notions of Quantum Theory*. Bd. 190. Lecture Notes in Physics. Berlin, Heidelberg: Springer, 1983. DOI: 10.1007/3-540-12732-1.
- [6] M. A. Nielsen und I. L. Chuang. *Quantum Computation and Quantum Information. 10th Anniversary Edition*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. ISBN: 9781107002173.
- [7] A. S. Holevo. *Quantum Systems, Channels, Information. A Mathematical Introduction*. Berlin, Boston: De Gruyter, 2012. DOI: 10.1515/9783110273403.
- [8] G. Lindblad. „On the Generators of Quantum Dynamical Semigroups“. In: *Communications in Mathematical Physics* 48.2 (1976), S. 119–130. DOI: 10.1007/BF01608499.
- [9] V. Gorini, A. Kossakowski und E. C. G. Sudarshan. „Completely Positive Dynamical Semigroups of N -Level Systems“. In: *Journal of Mathematical Physics* 17.5 (1976), S. 821–825. DOI: 10.1063/1.522979.
- [10] H.-P. Breuer und F. Petruccione. *The Theory of Open Quantum Systems*. Oxford: Oxford University Press, 2002. ISBN: 9780199213900.
- [11] H. Spohn. „Entropy Production for Quantum Dynamical Semigroups“. In: *Journal of Mathematical Physics* 19.5 (1978), S. 1227–1230. DOI: 10.1063/1.523789.
- [12] G. Lindblad. „Completely Positive Maps and Entropy Inequalities“. In: *Communications in Mathematical Physics* 40.2 (1975), S. 147–151. DOI: 10.1007/BF01609396.
- [13] D. Petz. „Sufficient Subalgebras and the Relative Entropy of States of a von Neumann Algebra“. In: *Communications in Mathematical Physics* 105.1 (1986), S. 123–131. DOI: 10.1007/BF01212345.
- [14] E. H. Lieb und D. W. Robinson. „The Finite Group Velocity of Quantum Spin Systems“. In: *Communications in Mathematical Physics* 28.3 (1972), S. 251–257. DOI: 10.1007/BF01645779.
- [15] A. Einstein. „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“. In: *Annalen der Physik* 322.10 (1905), S. 891–921. DOI: 10.1002/andp.19053221004.
- [16] J. von Neumann. *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Bd. 38. Grundlehren der mathematischen Wissenschaften. Berlin: Springer, 1932.
- [17] M. Born. „Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge“. In: *Zeitschrift für Physik* 37 (1926), S. 863–867.