

Fluss, Orientierung, Irreversibilität und thermodynamischer Zeitpfeil

Vier gescheiterte Orientierungsversuche, ein operationaler Kontrollfall
und das Orientierungsproblem

Archimedes von Wien

Diskussionsfassung / Arbeitsnotiz

18. September 2026

Entstehungshinweis. Diese Notiz entstand aus der kritischen Überarbeitung des Manuskripts *Eine prozessuale selbstreferenzielle Ontologie* und aus einer mehrstufigen Diskussion mit den KI-Denkpartnern ChatGPT (Aion), Claude und DeepSeek. Die hier wiedergegebenen Rechnungen, Schlussfolgerungen und Literaturangaben wurden gegenüber den ursprünglichen Vorschlägen gesondert geprüft. Die Verantwortung für die endgültige Darstellung liegt beim Autor.

Zusammenfassung

Ausgangspunkt ist der Versuch, zeitliche Ordnung aus Irreversibilität beziehungsweise aus einem Verlust von Möglichkeiten abzuleiten. Die Analyse zeigt, dass dabei vier verschiedene Begriffe auseinandergehalten werden müssen: *Zeitfluss*, *Orientierung*, *Irreversibilität* und *thermodynamischer Zeitpfeil*. Vier naheliegende informationstheoretische Orientierungsversuche werden geprüft: ein prospektiver Möglichkeits-Zähler $-\ln P(A)$, geschachtelte Historienräume, relative Entropie auf wachsenden Algebren und ein Data-Processing-/Petz-Defizit. Keiner dieser vier Kandidaten erzeugt eine Zeitrichtung. Als fünfter Fall wird die relative Entropie zwischen Vorwärts- und Rückwärtsprozess behandelt; sie ist kein gescheiterter Formalismus, sondern ein funktionierendes operationales Maß für Irreversibilität, das gerade deshalb die Grenze des Orientierungsproblems sichtbar macht: Vorwärts und Rückwärts müssen bereits definiert sein. Ein einfaches Kovarianzlemma isoliert die minimale Symmetriehürde. Bekannte mikroskopische T -Verletzung wird als Kontrollfall diskutiert: Sie kann eine fundamentale Prozessasymmetrie liefern, ist aber weder Irreversibilität noch eine etablierte Erklärung des makroskopischen Entropiepfeils. Die Notiz beansprucht keine neue Zeittheorie; sie dokumentiert, welche naheliegenden Identifikationen nicht tragen und welche Zusatzstruktur für eine Orientierungswahl erforderlich ist.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangsproblem	2
2	Vier verschiedene Probleme	2
2.1	Zeitfluss	2
2.2	Orientierung	2
2.3	Irreversibilität	3
2.4	Thermodynamischer Zeitpfeil	3
3	Kandidat I: Prospektiver Möglichkeits-Zähler	3
4	Kandidat II: Geschachtelte Historienräume	4
5	Kandidat III: Relative Entropie auf einer Algebrenfiltration	5
5.1	Endlicher Qubit-Test	5
6	Kandidat IV: Data-Processing-/Petz-Defizit	6
7	Kontrollfall V: Vorwärts-/Rückwärts-Unterscheidbarkeit	7
8	Das Orientierungslemma	7
9	Modularer Fluss ist nicht thermodynamischer Pfeil	8

10 Kontrollfall: Fundamentale T-Verletzung	9
11 Was aus vier Fehlversuchen und einem Kontrollfall folgt	10
11.1 Konsequenzen für die Prozessuale Selbstreferenz-Ontologie	10
12 Randbedingungen und Past-Hypothesis-Familie	11
13 Offene Forschungsfrage	12
14 Schluss	12
A Methodische Notiz zur KI-gestützten Prüfung	13

1. Ausgangsproblem

Das Ausgangsmanuskript *Eine prozessuale selbstreferenzielle Ontologie* (PSO) verfolgt die Idee, Prozesse statt statischer Zustände ontologisch zu privilegieren und Zeit nicht als primitive Hintergrundgröße anzunehmen, sondern als Ordnung irreversibler Ereignisse zu rekonstruieren [1]. In der zuletzt vorliegenden Fassung wird ein Ereignis als nichtinvertierbare Einschränkung eines relationalen Möglichkeitsraums beschrieben; Zeit soll als partielle Ordnung solcher Ereignisse entstehen. Gleichzeitig führt der formale Teil jedoch Größen wie $M(t)$, $A_{t+1} \subseteq A_t$, $\dot{M}(t)$ und zeitabhängige Übergangsmatrizen $P(t)$ ein. Damit wird genau jene zeitliche Parametrisierung vorausgesetzt, die später abgeleitet werden soll.

Die Diskussion dieses Problems führte zunächst zu mehreren Reparaturversuchen. Entscheidend war jedoch nicht die zunehmende mathematische Abstraktion, sondern die wiederholte Beobachtung, dass ein Maß auf einer bereits gerichteten Struktur die Richtung nicht selbst erzeugt. Daraus ergibt sich die zentrale begriffliche Trennung dieser Notiz:

$$\boxed{\text{Fluss} \neq \text{Orientierung} \neq \text{Irreversibilität} \neq \text{thermodynamischer Zeitpfeil}} \quad (1)$$

Diese vier Ebenen werden im Folgenden präzisiert und anschließend an vier Reparaturkandidaten sowie einem operationalen Kontrollfall getestet. Die Auswahl beansprucht ausdrücklich *keine* Übersicht über sämtliche informationstheoretischen oder philosophischen Ansätze zum Zeitpfeil; sie umfasst jene vier naheliegenden Konstruktionen, die sich bei der formalen Reparatur des PSO-Gedankens ergeben haben, ergänzt um einen etablierten Kontrollfall.

2. Vier verschiedene Probleme

2.1. Zeitfluss

Ein *Zeitfluss* ist zunächst nur eine parametrisierte Evolution. Formal kann dies beispielsweise eine Einparametergruppe

$$\alpha_t, \quad t \in \mathbb{R}, \quad \alpha_{t+s} = \alpha_t \circ \alpha_s \quad (2)$$

sein. In der algebraischen Quantenstatistik liefert die Tomita–Takesaki-Theorie für eine geeignete von-Neumann-Algebra $\mathcal{M}$ und einen treuen normalen Zustand ω eine kanonische Modularautomorphismengruppe σ_t^ω . Connes und Rovelli schlugen vor, einen solchen zustandsabhängigen Fluss als physikalische *thermal time* zu interpretieren [8].

Ein Fluss allein zeichnet jedoch noch keinen thermodynamischen Pfeil aus. Für eine Gruppe gilt

$$\alpha_t^{-1} = \alpha_{-t}, \quad (3)$$

so dass beide Parameterrichtungen mathematisch vorhanden sind.

2.2. Orientierung

Mit *Orientierung* ist eine physikalische Unterscheidung zwischen zwei Richtungen gemeint. Eine orientierte Dynamik kann beispielsweise Übergangswahrscheinlichkeiten besitzen, die unter einer geeigneten T -Transformation nicht invariant sind. Experimentell gesicherte T -Verletzung im neutralen B -Meson-System ist ein Beispiel dafür [14].

Orientierung ist schwächer als Irreversibilität: Eine unitäre Theorie kann T verletzen und dennoch invertierbare Zeitentwicklung besitzen. Unterschiedliche Übergangsraten eines Prozesses und seines T -konjugierten Gegenstücks bedeuten nicht, dass Zustandsinformation fundamental verloren geht.

2.3. Irreversibilität

Irreversibilität verlangt mehr als die Existenz eines Vorzeichens. Relevant ist, dass eine physikalisch zugelassene Beschreibung einen Übergang nicht vollständig rekonstruieren oder invertieren kann. Je nach Kontext wird dies durch Grobkörnigkeit, offene Dynamik, Messung, Dissipation, Informationsverlust unter einem Kanal oder statistische Unterscheidbarkeit von Vorwärts- und Rückwärtsprozess beschrieben.

In moderner Informationstheorie ist die Frage nach *Recoverability* präzise: Eine Datenverarbeitungsgleichung kann strikt sein, wenn eine verwendete Abbildung relevante Unterscheidbarkeit verliert. Das allein macht den Kanal jedoch noch nicht zu einem fundamentalen Zeitpfeil.

2.4. Thermodynamischer Zeitpfeil

Der thermodynamische Pfeil ist die makroskopische Regelmäßigkeit, dass Systeme unter geeigneten Bedingungen typischerweise in Richtung höherer Entropie evolvieren. Seine Erklärung ist ein eigenständiges Problem der statistischen Mechanik und Kosmologie. Price, Albert und Wallace gehören zu einer umfangreichen Literatur, die die Rolle spezieller Rand- beziehungsweise Anfangsbedingungen, der statistischen Mechanik und kosmologischer Bedingungen unterschiedlich bewertet [18, 17, 19].

Die vier Ebenen aus Gl. (1) dürfen daher nicht ohne zusätzliche Argumente miteinander identifiziert werden.

3. Kandidat I: Prospektiver Möglichkeits-Zähler

Die zuletzt formulierte PSO-Version definiert sinngemäß einen Möglichkeits-Zähler als

$$M = -\ln P(A), \quad (4)$$

mit einer geschachtelten Folge zugänglicher Zustandsmengen

$$A_{n+1} \subseteq A_n. \quad (5)$$

Je kleiner das verbleibende Wahrscheinlichkeitsvolumen $P(A)$, desto größer M .

Für ein uniformes Maß über einen endlichen Zustandsraum Ω gilt

$$P(A) = \frac{|A|}{|\Omega|} \quad (6)$$

und damit

$$M = \ln |\Omega| - \ln |A|. \quad (7)$$

Wird $|A|$ mit einem makroskopisch kompatiblen Phasenraumvolumen identifiziert, ist die

Boltzmann-Entropie bis auf eine Konstante

$$S_B = k_B \ln |A|. \quad (8)$$

Dann folgt

$$M = \ln |\Omega| - \frac{S_B}{k_B}. \quad (9)$$

Damit wächst M genau dann, wenn dieses Phasenraumvolumen und damit S_B sinkt. Diese Konstruktion kann daher nicht gleichzeitig als gewöhnliche thermodynamische Entropieproduktion interpretiert werden.

Hinzu kommt ein begrifflicher Wechsel: Ein prospektives A bezeichnet zukünftige Zugänglichkeit; die ursprüngliche PSO-Interpretation sprach dagegen vom Verlust rekonstruierbarer Vergangenheiten. Beides sind verschiedene Größen.

Diagnose. Gleichung (4) kann ein Surprisal- oder Einschränkungsmaß definieren. Sie erzeugt weder ohne weitere Struktur eine Zeitordnung noch ist sie automatisch thermodynamische Entropie.

4. Kandidat II: Geschachtelte Historienräume

Eine naheliegende Reparatur ist, nicht zukünftige Zustände, sondern mit den gegenwärtigen Records kompatible Vergangenheitsgeschichten zu betrachten. Die Sprache alternativer, grobgekörnter Historien steht in enger Nachbarschaft zum Decoherent-Histories-Programm von Gell-Mann und Hartle [4, 5]. Die explizite Verbindung zwischen Dekohärenz und physisch gespeicherten Records wurde unter anderem von Halliwell untersucht [6]; Zureks Quantum-Darwinism-Programm beschreibt die redundante Proliferation solcher Umwelt-Records [7]. Die folgende Nesting-Konstruktion wird hier nicht diesen Arbeiten zugeschrieben, sondern als eigener Reparaturversuch des PSO-Gedankens geprüft. Sei

$$\mathcal{H}_e = \{\text{Historien, die mit den Records bei } e \text{ kompatibel sind}\}. \quad (10)$$

Setzt man für zwei Ereignisse

$$e \prec f \implies \mathcal{H}_f \subseteq \mathcal{H}_e, \quad (11)$$

so kann man etwa

$$\Delta M_{e \rightarrow f} = -\ln P(\mathcal{H}_f) + \ln P(\mathcal{H}_e) \geq 0 \quad (12)$$

definieren.

Die Monotonie ist mathematisch korrekt. Aber die Richtung steckt bereits vollständig in der Voraussetzung (11). Um $\mathcal{H}_f \subseteq \mathcal{H}_e$ als eine gerichtete Folge von Record-Zuständen zu interpretieren, muss schon feststehen, welches Ereignis als später gilt oder in welcher Richtung Records akkumulieren.

Außerdem können reale Records gelöscht, überschrieben oder thermisch zerstört werden. Eine globale Nesting-Bedingung ist daher nicht allgemein physikalisch gegeben.

Diagnose. Geschachtelte Historien können einen bereits vorgegebenen Informationspfeil parametrisieren. Sie leiten ihn nicht her.

5. Kandidat III: Relative Entropie auf einer Algebrenfiltration

Die algebraische Version ersetzt klassische Zustandsmengen durch von-Neumann-Algebren. Arai definierte relative Entropie für allgemeine von-Neumann-Algebren und bewies unter anderem ihre Monotonie [2]; Uhlmann etablierte verwandte Monotonieaussagen für identitätserhaltende vollständig positive Abbildungen [3]. Für eine Inklusion

$$\mathcal{A}_e \subseteq \mathcal{A}_f \quad (13)$$

und Zustände ω, σ gilt entsprechend

$$D_{\mathcal{A}_e}(\omega \parallel \sigma) \leq D_{\mathcal{A}_f}(\omega \parallel \sigma). \quad (14)$$

Definiert man

$$M(e) = D_{\mathcal{A}_e}(\omega \parallel \sigma), \quad (15)$$

so folgt

$$\Delta M_{e \rightarrow f} \geq 0. \quad (16)$$

Dies ist jedoch ein Theorem über Informationszugang unter Algebreninklusion, nicht über Zeit. Es geht weder Dynamik noch Irreversibilität ein. Eine willkürlich aufsteigende Familie von Teilsystemalgebren genügt.

5.1. Endlicher Qubit-Test

Für

$$\mathcal{A}_k = M_2(\mathbb{C})^{\otimes k} \otimes I \quad (17)$$

und den maximal gemischten Referenzzustand

$$\sigma_k = \frac{I}{2^k} \quad (18)$$

ist

$$M_k = D\left(\rho_k \parallel \frac{I}{2^k}\right) \quad (19)$$

$$= \text{Tr}(\rho_k \ln \rho_k) - \text{Tr}\left(\rho_k \ln \frac{I}{2^k}\right) \quad (20)$$

$$= -S_{\text{vN}}(\rho_k) + k \ln 2. \quad (21)$$

In Bits:

$$\boxed{M_k = k - S_{\text{vN}}(\rho_k)}. \quad (22)$$

Die vorgeschlagene Größe ist damit in diesem Modell exakt die bekannte Negentropie relativ zum maximal gemischten Zustand.

Für den Produktzustand $|000\rangle$ gilt

$$(M_1, M_2, M_3) = (1, 2, 3), \quad (23)$$

obwohl weder Dekohärenz noch Recordbildung noch irgendeine physikalische Irreversibilität stattfindet. Die Monotonie entsteht allein dadurch, dass immer mehr reine Teilsysteme in die zugängliche Algebra aufgenommen werden.

Für

$$|\text{GHZ}\rangle = \frac{|000\rangle + |111\rangle}{\sqrt{2}} \quad (24)$$

erhält man

$$(M_1, M_2, M_3) = (0, 1, 3). \quad (25)$$

Die Zunahme spiegelt zugänglich werdende Korrelationen und Verschränkung wider, nicht einen Zeitpfeil.

Diagnose. Araki-Monotonie ist mathematisch angemessen und in Typ-III-Situationen wesentlich allgemeiner als endliche Dichtematrixformeln. Als Zeitpfeilargument ist sie dennoch leer, solange die gerichtete Algebrenfamilie selbst vorausgesetzt wird.

6. Kandidat IV: Data-Processing-/Petz-Defizit

Ein schärferer Kandidat ist nicht die relative Entropie selbst, sondern ihr Verlust unter einem Kanal. Für die partielle Spur $AB \rightarrow A$ und Referenzzustände

$$\sigma_{AB} = I/4, \quad \sigma_A = I/2 \quad (26)$$

definieren wir das Data-Processing-Defizit

$$\delta_{AB \rightarrow A} = D(\rho_{AB} \| \sigma_{AB}) - D(\rho_A \| \sigma_A). \quad (27)$$

Mit Gl. (22) folgt in Bits

$$\delta_{AB \rightarrow A} = [2 - S(AB)] - [1 - S(A)] \quad (28)$$

$$= 1 - S(B|A). \quad (29)$$

Für drei illustrative reine Zustände ergibt sich:

Zustand	$\delta_{12 \rightarrow 1}$	$\delta_{123 \rightarrow 12}$
$ 000\rangle$	1 bit	1 bit
$ \text{GHZ}\rangle$	1 bit	2 bit
$ W\rangle = (001\rangle + 010\rangle + 100\rangle)/\sqrt{3}$	1 bit	1.9183 bit

Für den W -Zustand gilt

$$S(\rho_1) = S(\rho_{12}) = h_2(1/3) \approx 0.9183 \text{ bit}. \quad (30)$$

Der entscheidende Gegenfall ist erneut $|000\rangle$. Das Defizit ist positiv, obwohl die zugrunde liegende Situation vollständig statisch und reversibel sein kann. Der Grund liegt im Referenzzustand: Die zur maximal gemischten Referenz gehörige Recovery-Struktur rekonstruiert das entfernte Qubit nicht als den tatsächlich reinen Zustand. Gemessen wird also Nicht-Suffizienz beziehungsweise Verlust von Unterscheidbarkeit relativ zu einem Referenzpaar, nicht das Auftreten eines physikalischen irreversiblen Ereignisses.

Petz' Arbeiten charakterisieren die Gleichheitsbedingungen der Datenverarbeitungsungleichung und die Möglichkeit vollständiger Recovery [12]. Diese Theorie beantwortet präzise, wann

Information unter einem gegebenen Kanal erhalten bleibt. Sie beantwortet nicht, warum der Kanal eine fundamentale Zeitrichtung besitzen sollte.

Diagnose. Recoverability ist ein geeignetes Werkzeug zur Quantifizierung von Informationsverlust. Sie erzeugt keine Orientierung des Prozesses.

7. Kontrollfall V: Vorwärts-/Rückwärts-Unterscheidbarkeit

Der fünfte Kandidat ist der erste, der Irreversibilität tatsächlich operationell trifft. Benoist, Jakšić, Pautrat und Pillet untersuchen wiederholte Quantenmessungen und vergleichen die Statistik eines Prozesses mit der Statistik eines geeigneten outcome-reversed process [13]. Relative Entropie und verwandte Rényi-Größen quantifizieren dabei, wie gut Vorwärts- und Rückwärtsprozess durch Hypothesentests unterschieden werden können; die Autoren verbinden dies mit Entropieproduktion, Large-Deviation-Prinzipien sowie Chernoff- und Hoeffding-Exponenten.

Schematisch ist die relevante Struktur

$$\Sigma \sim D(P_{\rightarrow} \| P_{\leftarrow}). \quad (31)$$

Ist der Prozess vom rückwärts konstruierten Prozess statistisch ununterscheidbar, verschwindet diese Asymmetrie; je stärker sie unterscheidbar sind, desto ausgeprägter ist der operationelle Zeitpfeil.

Genau hier liegt jedoch die Grenze für das ursprüngliche PSO-Programm: Um $P_{\rightarrow}$ mit $P_{\leftarrow}$ vergleichen zu können, müssen die beiden Orientierungen bereits definiert sein. Der Formalismus misst den Pfeil; er erzeugt die Bedeutung von „vorwärts“ und „rückwärts“ nicht aus unorientierten Daten.

Diagnose. Die stärkste der fünf Konstruktionen ist zugleich diejenige, die am deutlichsten zeigt, dass *Messung eines Pfeils* und *Erzeugung einer Orientierung* verschiedene Aufgaben sind.

8. Das Orientierungslemma

Die vorhergehenden Beispiele legen eine abstrakte Minimalform des Problems nahe.

Lemma (Orientierung aus symmetrischen Daten). Sei X eine Klasse fundamentaler Daten und

$$R : X \rightarrow X, \quad R^2 = \text{id}, \quad (32)$$

eine Involution, die eine mögliche Orientierung vertauscht. Gesucht sei eine kovariante Orientierungswahl

$$F : X \rightarrow \{+, -\} \quad (33)$$

mit

$$F(Rx) = -F(x). \quad (34)$$

Für einen Fixpunkt x mit

$$Rx = x \quad (35)$$

existiert keine solche eindeutige Wahl.

Beweis. Aus Kovarianz folgt

$$F(x) = F(Rx) = -F(x), \quad (36)$$

was für $F(x) \in \{+, -\}$ unmöglich ist. $\square$

Das Lemma ist elementar. Sein physikalischer Gehalt hängt vollständig davon ab, ob die zugrunde liegenden Daten tatsächlich einen Fixpunkt der Richtungsumkehr bilden. Es sagt daher nicht, dass fundamentale Orientierung unmöglich ist. Es sagt nur:

Aus vollständig orientierungssymmetrischen Daten allein folgt keine eindeutige Orientierung.	(37)
--	------

Eine Richtung verlangt dann zusätzliche asymmetrische Struktur: einen Zustand, Randbedingungen, Reservoirbedingungen, einen externen Antrieb, explizit T -verletzende Dynamik oder eine andere Symmetriebrechung. Logisch hat dies dieselbe Form wie ein Auswahlproblem bei Symmetriebrechung: Symmetrische Grundgleichungen oder Daten können asymmetrische Zustände zulassen, wählen aber aus einem symmetrischen Fixpunkt heraus keinen eindeutigen Zweig kovariant aus. Damit wird ausdrücklich *nicht* behauptet, der thermodynamische Zeitpfeil sei im technischen Sinn der Quantenfeldtheorie ein Fall spontaner Symmetriebrechung; die Analogie betrifft nur die Struktur des Auswahlproblems.

Reichweite des Lemmas im modularen Fall. Das Lemma ist erst anwendbar, nachdem für die gewählte Datenklasse eine konkrete richtungsumkehrende Involution R angegeben wurde. Für eine Algebra $\mathcal{M}$ ohne Zustand existiert noch kein zustandsabhängiger Modularfluss, der orientiert werden könnte. Für das Paar $(\mathcal{M}, \omega)$ liefert die Tomita–Takesaki-Theorie dagegen einen kanonischen Fluss σ_t^ω , doch die vorliegende Notiz identifiziert keine intrinsische physikalische Involution R , die innerhalb genau dieser Datenklasse den Fluss $t \mapsto -t$ umkehrt und zugleich einen Fixpunkt im Sinn des Lemmas erzeugt. Insbesondere ist die modulare Konjugation J kein solcher Zeitumkehroperator: aus $J\Delta J = \Delta^{-1}$ und der Antiunitarität von J folgt für imaginäre Potenzen $J\Delta^{it}J = \Delta^{it}$. Der Fixpunktfall des Lemmas wird für $(\mathcal{M}, \omega)$ daher hier *nicht* als etabliert vorausgesetzt. Der modulare Kontrollfall trennt vielmehr zwei Aufgaben: Tomita–Takesaki liefert einen Fluss; die physikalische Auszeichnung eines Vorzeichens dieses Flusses ist eine zusätzliche Frage.

9. Modularer Fluss ist nicht thermodynamischer Pfeil

Tomita–Takesaki-Theorie ist für die Auseinandersetzung besonders lehrreich, weil sie zeigt, dass selbst ein kanonisch aus Algebra und Zustand konstruierter Fluss nicht automatisch Irreversibilität liefert. Für geeignete $(\mathcal{M}, \omega)$ entsteht eine Modulargruppe

$$\sigma_t^\omega, \quad t \in \mathbb{R}. \quad (38)$$

Connes und Rovelli verwenden genau diese Struktur zur Formulierung der Thermal-Time-Hypothese [8].

Der Fluss ist jedoch eine Gruppe von Automorphismen und damit invertierbar. Er beantwortet daher primär das Problem des Flusses, nicht das des irreversiblen thermodynamischen Pfeils.

Half-sided modular inclusions sind ein weiterer wichtiger Kontrollfall. Wiesbrock formulierte

Inklusionen $\mathcal{N} \subset \mathcal{M}$ mit einer Bedingung der Form

$$\Delta_{\mathcal{M}}^{it} \mathcal{N} \Delta_{\mathcal{M}}^{-it} \subseteq \mathcal{N} \quad (t \geq 0) \quad (39)$$

und leitete daraus unter geeigneten Voraussetzungen eine Einparameter-Translationsgruppe mit positivem Generator ab [9, 10]. Die ursprüngliche Publikation enthielt eine Beweislücke; Araki und Zsidó schlossen sie später und verallgemeinerten das Resultat auf gemeinsame treue normale semifinite Gewichte [11]. Für das hier definierte Orientierungsproblem bleibt die Schlussfolgerung unverändert: Die Halbseitigkeit wird bereits relativ zu einem Vorzeichen des Modularparameters formuliert und ist daher keine Ableitung der Orientierung aus völlig ungerichteten Daten.

Damit bleibt die entscheidende Unterscheidung bestehen:

$$\text{kanonischer Fluss} \not\Rightarrow \text{thermodynamischer Pfeil}. \quad (40)$$

10. Kontrollfall: Fundamentale T -Verletzung

Das Orientierungslemma setzt voraus, dass die relevanten Grunddaten unter der Richtungsumkehr invariant sind. Diese Voraussetzung ist in der realen Teilchenphysik nicht universell erfüllt. Im Standardmodell existiert CP-Verletzung; unter den üblichen CPT-Annahmen ist damit auch T -Verletzung verbunden. Die BABAR-Kollaboration beobachtete 2012 direkt unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten für Paare T -konjugierter Übergänge im neutralen B -Meson-System [14]. Jarlskog entwickelte bereits 1985 ein rephasierungsinvariantes Maß der CP-Verletzung im Quarksektor [15].

Damit ist prinzipiell eine fundamentale mikroskopische *Orientierung* möglich, ohne dass sie ausschließlich aus kosmologischen Randbedingungen stammen muss. Als Größenordnungen im Quarksektor nennt der Particle Data Group für die CKM-Struktur den Jarlskog-Invarianten $J = (3.12_{-0.12}^{+0.13}) \times 10^{-5}$; für indirekte CP-Verletzung im neutralen Kaonsystem gilt $|\epsilon| = (2.228 \pm 0.011) \times 10^{-3}$ [16]. Diese Zahlen sind keine universellen Maße aller beobachtbaren T - oder CP-Asymmetrien – in neutralen B -Systemen können einzelne dimensionslose Asymmetrieparameter deutlich größer sein –, sie markieren jedoch die spezifische schwache/CKM-Struktur, aus der die bekannte Verletzung stammt.

Dieser Punkt darf jedoch nicht mit Irreversibilität verwechselt werden. Die Standardmodell-Zeitentwicklung ist quantenmechanisch unitär. T -Verletzung bedeutet, dass ein Prozess und sein T -konjugierter Prozess nicht dieselbe Physik besitzen; sie bedeutet nicht, dass die Zeitentwicklung nicht invertierbar wäre oder dass Information fundamental vernichtet wird.

Ebenso gibt es keinen etablierten Mechanismus, der die bekannte schwache T -Verletzung zur universellen Ursache des makroskopischen Entropiepfeils macht. Thermische Mischung von Kaffee und Milch, Diffusion, viskose Dissipation und gewöhnlicher Wärmefluss werden in praktisch relevanten Regimen von molekularen und elektromagnetischen Streu- und Transportprozessen dominiert; die im schwachen/CKM-Sektor beobachtete T -Verletzung liefert hierfür keinen bekannten Verstärkungsmechanismus. Die Größenordnungen oben sind daher nur Kontrollzahlen, kein No-go-Argument aus Kleinheit.

Der Kontrollfall liefert daher die wichtige Implikationsstruktur

$$T\text{-Verletzung} \Rightarrow \text{mikroskopische Orientierung möglich}, \quad (41)$$

aber nicht

$$T\text{-Verletzung} \Rightarrow \text{Irreversibilität} \quad (42)$$

und erst recht nicht automatisch

$$T\text{-Verletzung} \Rightarrow \text{thermodynamischer Pfeil.} \quad (43)$$

11. Was aus vier Fehlversuchen und einem Kontrollfall folgt

Die ersten vier Kandidaten scheitern nicht zufällig an vier verschiedenen technischen Details. Der fünfte Fall ist dagegen ein funktionierendes operationales Maß für Prozessasymmetrie und dient als Kontrollfall. Gemeinsam illustrieren sie verschiedene Varianten derselben begrifflichen Verwechslung.

Kandidat	Was er tatsächlich misst / voraussetzt	Warum er keine Orientierung erzeugt
$-\ln P(A)$	Einschränkung relativ zu einem Referenzraum	Richtung und Interpretation von A müssen schon festliegen
Historien-Nesting	Verlust kompatibler Historien	$\mathcal{H}_f \subseteq \mathcal{H}_e$ ist bereits gerichtete Record-Struktur
Araki-relative Entropie auf $\mathcal{A}_e \subseteq \mathcal{A}_f$	Unterscheidbarkeit bei wachsendem Informationszugang	Monotonie folgt aus Inklusion, ohne Dynamik
Petz-/DPI-Defizit	Verlust von Unterscheidbarkeit / Recoverability eines gegebenen Kanals	Positiv auch bei statischen Produktzuständen
Kontrollfall: $D(P_{\rightarrow} \ P_{\leftarrow})$	operationelle Vorwärts-/Rückwärts-Asymmetrie	funktioniert für Irreversibilität, setzt aber Vorwärts und Rückwärts voraus

Zusammenfassende Diagnose. In allen hier geprüften Konstruktionen, in denen ein monotonen oder informations-theoretisches Maß auf einer bereits gerichteten Filtration, einem Kanal oder einem Forward/Reverse-Paar definiert wird, stammt die Orientierung nicht aus dem Maß selbst. Diese Aussage ist hier eine durch die vier Gegenbeispiele und den Kontrollfall gestützte Diagnose, *kein* allgemeines Theorem über sämtliche denkbaren Maße oder Dynamiken.

Die ursprüngliche PSO-These

$$\text{Irreversibilität} \longrightarrow \text{Zeitordnung} \quad (44)$$

kann durch die hier geprüften Konstruktionen nicht gestützt werden.

11.1. Konsequenzen für die Prozessuale Selbstreferenz-Ontologie

Die Analyse bedeutet nicht, dass jede prozessontologische Idee des Ausgangsmanuskripts verworfen werden muss. Sie betrifft jedoch eine seiner zentralen starken Behauptungen: dass Irreversibilität beziehungsweise schwindende Möglichkeiten zugleich Ereignishaftigkeit, Zeitordnung, Entropie und später sogar Raumzeitgeometrie tragen könnten.

Mindestens vier Ebenen müssen künftig getrennt werden:

1. Eine Theorie kann Prozesse und Ereignisrelationen ontologisch privilegieren, ohne den thermodynamischen Pfeil erklärt zu haben.
2. Eine partielle Ordnung von Ereignissen kann eine Kausalstruktur repräsentieren, ohne zu erklären, warum eine Orientierung ausgezeichnet ist.
3. Ein Informationsmaß kann unter einer gerichteten Struktur monoton sein, ohne diese Struktur hervorzubringen.
4. Ein gemessener Entropiepfeil kann aus statistischen und Randbedingungen folgen, ohne eine fundamentale Zeitmetrik zu definieren.

Die derzeitige wissenschaftlich vorsichtige Schlussfolgerung lautet deshalb nicht „PSO ist widerlegt“, sondern enger:

Die bisher geprüften formalen Realisierungen des PSO-Gedankens liefern keinen nicht-zirkulären Mechanismus, durch den Irreversibilität allein eine ausgezeichnete Zeitrichtung erzeugt. Mehrere Kandidaten reduzieren sich auf bekannte informationstheoretische Größen oder setzen die zu erklärende Richtung bereits in ihrer Definitionsstruktur voraus.

Das ist ein negatives Ergebnis, aber ein prüfbares.

Reichweite und Beitrag. Diese Notiz ist als kritische technische Begleitnotiz zum PSO-Manuskript gedacht, nicht als neue Theorie der Zeit. Sie beansprucht weder die Vierfach-Trennung aus Gl. (1) noch die Unterscheidung zwischen Gesetzes- und Randbedingungsasymmetrie als historische Priorität. Ihr möglicher eigenständiger Beitrag ist enger: Vier aus der Reparatur des PSO-Gedankens hervorgegangene Orientierungsversuche werden mit kurzen expliziten Rechnungen oder strukturellen Gegenargumenten geprüft; ein etablierter fünfter Formalismus dient als positiver Kontrollfall. Besonders hervorgehoben wird die Trennung von *Fluss* und *Orientierung*. Ob diese Zuspitzung in genau dieser Form bereits systematisch in der Philosophy-of-Physics- oder AQFT-Literatur behandelt wurde, bleibt eine Literaturfrage und wird hier nicht als Neuheitsbehauptung vorweggenommen.

12. Randbedingungen und Past-Hypothesis-Familie

Für mikroskopisch zeitumkehrsymmetrische Dynamiken stellt sich die klassische Frage, warum makroskopische Entropiegradienten nicht symmetrisch in beide Richtungen auftreten. Ein bedeutender Antworttyp verweist auf besondere Anfangs- oder Randbedingungen, häufig unter dem Titel *Past Hypothesis*. Albert entwickelt diese Strategie systematisch in *Time and Chance* [17]; Price betont die Gefahr zeitlicher Doppelstandards und verlagert das Problem wesentlich in die Kosmologie [18]; Wallace diskutiert insbesondere die Rolle gravitativer Freiheitsgrade und kosmologischer Bedingungen [19].

Diese Literatur bildet keine vollständig abgeschlossene Standardantwort. Sie enthält substanzielle Meinungsverschiedenheiten über Status, Formulierung und Erklärungskraft solcher Randbedingungen. Für die vorliegende Notiz genügt eine vorsichtige Aussage: Wenn die relevante Mikrodynamik die Orientierung nicht selbst auszeichnet, benötigt eine Erklärung

des beobachteten thermodynamischen Pfeils zusätzliche zeit-asymmetrische physikalische Bedingungen.

Wegen der bekannten T -Verletzung muss dies als Fallunterscheidung formuliert werden:

Fall I: Orientierungssymmetrische Grunddaten. Dann kann nach dem Lemma eine eindeutige Richtung nicht allein aus diesen Daten folgen; zusätzliche Asymmetrie ist erforderlich.

Fall II: T -verletzende Grunddynamik. Eine mikroskopische Orientierung kann bereits in den Gesetzen liegen. Der Übergang von dieser Orientierung zu makroskopischer Irreversibilität und zum thermodynamischen Pfeil bleibt jedoch ein eigenständiges Problem.

Die Fallunterscheidung bezieht sich auf die jeweils tatsächlich verwendete Grunddynamik. Aus der experimentell etablierten T -Verletzung des Standardmodells wird hier ausdrücklich *nicht* auf die Symmetriestruktur einer unbekannten vollständigeren fundamentalen Theorie geschlossen. Ob und in welcher Form eine solche Theorie eine intrinsische T -Asymmetrie besitzt, bleibt für die vorliegende Notiz offen.

13. Offene Forschungsfrage

Nach vier Fehlversuchen und dem operationalen Kontrollfall bleibt eine präzisere Frage übrig als im Ausgangsmanuskript:

Welche minimale physikalische Struktur ist erforderlich, damit aus ansonsten nicht orientierten oder reversiblen Daten eine nicht-konventionelle, empirisch ausgezeichnete Prozessrichtung entsteht, und unter welchen zusätzlichen Bedingungen wird daraus ein thermodynamischer Pfeil?	(45)
--	------

Diese Frage zerfällt selbst in zwei Teile:

A. Orientierung

Welche Daten brechen die R -Symmetrie so, dass $+/-$ physikalisch unterschieden werden können?

B. Irreversibilität

Welche Größe misst nach gegebener Orientierung den nicht recoverbaren beziehungsweise statistisch asymmetrischen Anteil der Dynamik?

Für B existieren bereits mächtige Theorien: relative Entropie, Recovery, Entropieproduktion, Fluktuationstheoreme und Hypothesentests des Zeitpfeils. Für A hängt die Antwort von der Symmetriestruktur der tatsächlichen Grunddynamik und den physikalischen Randbedingungen ab.

14. Schluss

Der ursprüngliche Versuch, Zeit als „Geometrie schwindender Möglichkeiten“ zu fundieren, bündelte mehrere unterschiedliche Fragen in einem einzigen Bild. Die vorliegende Analyse

trennt diese Fragen auf. Ein Fluss ist noch keine Orientierung. Orientierung ist noch keine Irreversibilität. Irreversibilität ist noch keine Erklärung des universellen thermodynamischen Pfeils.

Die vier gescheiterten Orientierungsversuche und der positive Kontrollfall ergeben gemeinsam ein konsistentes Muster: Die untersuchten Maße charakterisieren Einschränkung, Unterscheidbarkeit, Recoverability oder Vorwärts-/Rückwärts-Asymmetrie, aber keine der geprüften Konstruktionen erzeugt aus vollständig unorientierten Daten allein ein physikalisch ausgezeichnetes Vorzeichen. Das funktionierende operationelle Maß – die Unterscheidbarkeit von Vorwärts- und Rückwärtsprozess – macht diese Grenze besonders deutlich.

Die verbleibende Forschungsfrage ist kleiner als PSO, aber schärfer: Welche minimale asymmetrische physikalische Struktur macht eine Orientierung überhaupt definierbar, und welche zusätzlichen Bedingungen verwandeln diese Orientierung in makroskopische Irreversibilität? Erst wenn diese Frage beantwortet ist, kann sinnvoll geprüft werden, ob eine prozessuale Ontologie darüber hinaus eigenständigen physikalischen Gehalt liefert.

A. Methodische Notiz zur KI-gestützten Prüfung

Die Entwicklung dieser Notiz liefert neben dem Sachresultat eine methodische Lehre. Mehrere formal elegante Vorschläge wirkten zunächst wie Fortschritt, bis elementare Gegenbeispiele oder Primärquellen sie einordneten. Die produktiven Schritte waren insbesondere:

- die direkte Rechnung $M_k = k - S_{vN}(\rho_k)$;
- die Produktzustands-Gegenprobe für das Petz-/DPI-Defizit;
- die Prüfung, dass Araki-Monotonie eine Aussage über Informationszugang, nicht über Zeit ist;
- die Primärlektüre von Benoist et al. zur Forward/Reverse-Unterscheidbarkeit;
- die Trennung von modularer Flussstruktur und thermodynamischem Pfeil;
- der Kontrollfall experimenteller T -Verletzung.

Daraus folgt eine Arbeitsregel für weitere Grundlagenarbeit:

Keine neue Theorieebene vor Gegenbeispielrechnung oder Primärquelle.	(46)
--	------

Sprachliche Kohärenz, mathematische Eleganz oder die Übereinstimmung mehrerer Modelle sind kein Ersatz für diese beiden Prüfungen.

Danksagung

Diese Notiz entstand in einer iterativen Kritikrunde zwischen dem Autor und den KI-Denkpartnern ChatGPT (Aion), Claude und DeepSeek. Mehrere zunächst vorgeschlagene Konstruktionen wurden im Verlauf durch Gegenrechnungen oder Literaturprüfung verworfen oder eingeschränkt. Gerade diese negativen Ergebnisse bilden den Kern der vorliegenden Fassung.

Literatur

- [1] Archimedes von Wien, *Eine prozessuale selbstreferenzielle Ontologie: Prozess, Zeit und die Geometrie schwindender Möglichkeit*, unveröffentlichtes Manuskript, Mai 2026.
- [2] H. Araki, *Relative Entropy of States of von Neumann Algebras*, Publ. Res. Inst. Math. Sci. **11**(3), 809–833 (1975), DOI: [10.2977/prims/1195191148](https://doi.org/10.2977/prims/1195191148).
- [3] A. Uhlmann, *Relative Entropy and the Wigner–Yanase–Dyson–Lieb Concavity in an Interpolation Theory*, Commun. Math. Phys. **54**, 21–32 (1977), DOI: [10.1007/BF01609834](https://doi.org/10.1007/BF01609834).
- [4] M. Gell-Mann and J. B. Hartle, *Quantum Mechanics in the Light of Quantum Cosmology*, in W. H. Zurek (ed.), *Complexity, Entropy, and the Physics of Information*, Addison–Wesley, pp. 425–458 (1990), [arXiv:1803.04605](https://arxiv.org/abs/1803.04605) (later archival posting).
- [5] M. Gell-Mann and J. B. Hartle, *Classical Equations for Quantum Systems*, Phys. Rev. D **47**, 3345–3382 (1993), DOI: [10.1103/PhysRevD.47.3345](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.47.3345).
- [6] J. J. Halliwell, *Somewhere in the Universe: Where Is the Information Stored When Histories Decohere?*, Phys. Rev. D **60**, 105031 (1999), DOI: [10.1103/PhysRevD.60.105031](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.60.105031).
- [7] W. H. Zurek, *Quantum Darwinism*, Nature Phys. **5**, 181–188 (2009), DOI: [10.1038/nphys1202](https://doi.org/10.1038/nphys1202).
- [8] A. Connes and C. Rovelli, *Von Neumann Algebra Automorphisms and Time–Thermodynamics Relation in General Covariant Quantum Theories*, Class. Quantum Grav. **11**, 2899–2917 (1994), [arXiv:gr-qc/9406019](https://arxiv.org/abs/gr-qc/9406019).
- [9] H.-W. Wiesbrock, *Half-Sided Modular Inclusions of von-Neumann-Algebras*, Commun. Math. Phys. **157**, 83–92 (1993), DOI: [10.1007/BF02098019](https://doi.org/10.1007/BF02098019).
- [10] H.-W. Wiesbrock, *Half-Sided Modular Inclusions of von Neumann Algebras, Erratum*, Commun. Math. Phys. **184**, 683–685 (1997).
- [11] H. Araki and L. Zsidó, *Extension of the Structure Theorem of Borchers and Its Application to Half-Sided Modular Inclusions*, Rev. Math. Phys. **17**, 491–543 (2005), DOI: [10.1142/S0129055X05002388](https://doi.org/10.1142/S0129055X05002388), [arXiv:math/0412061](https://arxiv.org/abs/math/0412061).
- [12] D. Petz, *Sufficient Subalgebras and the Relative Entropy of States of a von Neumann Algebra*, Commun. Math. Phys. **105**, 123–131 (1986).
- [13] T. Benoist, V. Jakšić, Y. Pautrat, and C.-A. Pillet, *On Entropy Production of Repeated Quantum Measurements I. General Theory*, Commun. Math. Phys. **357**, 77–123 (2018), DOI: [10.1007/s00220-017-2947-1](https://doi.org/10.1007/s00220-017-2947-1), [arXiv:1607.00162](https://arxiv.org/abs/1607.00162).
- [14] J. P. Lees *et al.* (BABAR Collaboration), *Observation of Time-Reversal Violation in the B^0 Meson System*, Phys. Rev. Lett. **109**, 211801 (2012), DOI: [10.1103/PhysRevLett.109.211801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.211801).
- [15] C. Jarlskog, *Commutator of the Quark Mass Matrices in the Standard Electroweak Model and a Measure of Maximal CP Nonconservation*, Phys. Rev. Lett. **55**, 1039–1042 (1985), DOI: [10.1103/PhysRevLett.55.1039](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.1039).
- [16] S. Navas *et al.* (Particle Data Group), *Review of Particle Physics: CKM Quark-Mixing Matrix*, Phys. Rev. D **110**, 030001 (2024), 2025 update; CKM review revised 31 May 2024, [PDG review](https://pdg.lbl.gov/).

- [17] D. Z. Albert, *Time and Chance*, Harvard University Press, Cambridge, MA (2000).
- [18] H. Price, *The Thermodynamic Arrow: Puzzles and Pseudo-puzzles*, [arXiv:physics/0402040](https://arxiv.org/abs/physics/0402040) (2004).
- [19] D. Wallace, *Gravity, Entropy, and Cosmology: In Search of Clarity*, British Journal for the Philosophy of Science **61**, 513–540 (2010), DOI: [10.1093/bjps/axp048](https://doi.org/10.1093/bjps/axp048).