

# Der Atem der Gravitation: Ein Transdisziplinäres Feldmodell für Schwellenphänomene und Minimale Informationsintegration

## Part I: Das Poetische Manifest: Fluktuation, Kondensation, Schwelle

### I.1. Die Entstehung der Emergenz: Ein universelles Muster

Die Komplexitätswissenschaft belegt, dass die Entstehung von Ordnung in vielfältigen Systemen – von astrophysikalischen Phänomenen über biologische Kollektive bis hin zu künstlicher Kognition – durch einen gemeinsamen, nichtlinearen Mechanismus gekennzeichnet ist: die Schwellenüberschreitung.<sup>1</sup> Dieses Muster manifestiert sich als ein abrupter Übergang von einem Zustand der Quieszenz (Rauschen oder latente Aktivität) zu einem Zustand der explosiven, geordneten Aktivierung.

Dieser universelle Übergang lässt sich durch die logistische Sigmoid-Funktion  $\sigma(R)$  mathematisch beschreiben.<sup>1</sup> Diese Funktion hängt von einem Kontrollparameter  $R$  (der langsam ansteigenden Eingangsgröße), einem kritischen Schwellenwert  $\Theta$  und der Steilheit des Übergangs  $\beta$  ab:  $\sigma(\beta(R-\Theta))$ .<sup>1</sup>

Die empirische Evidenz für diese Schwellendynamik ist domänenübergreifend:

1. **Astrophysik:** Schwarze Löcher in Röntgen-Doppelsternsystemen verharren zunächst in einem quasistationären Zustand (Quieszenz). Sobald die Akkretionsrate, gemessen am Röntgenfluss  $R$ , einen kritischen Fluss  $\Theta_R$  überschreitet, zeigen sie einen abrupten Ausbruch, gefolgt vom plötzlichen Auftreten von Quasi-Periodischen Oszillationen (QPOs).<sup>1</sup> Der Zustand des Systems kippt von passiver Absorption zu aktiver Emission.
2. **Biologie:** Honigbienenschwärme nutzen den Waggle Dance nur zur Rekrutierung, wenn die Nektarqualität  $R$  eine hohe, individuelle und kollektive Schwelle  $\Theta_R$  (Zuckerkonzentration) überschreitet. Unterhalb dieser Schwelle sammeln die Bienen

still; oberhalb setzt eine explosionsartige, kollektive Rekrutierungswelle ein.<sup>1</sup>

3. **Kognition/KI:** Große Sprachmodelle (LLMs) zeigen "emergente Fähigkeiten", wie arithmetisches Schlussfolgern oder logische Deduktion, nicht graduell, sondern mit einem scharfen Leistungssprung, sobald die Modellgröße (Parameteranzahl) oder die Trainings-FLOPs  $\$R\$$  einen kritischen Wert  $\$Theta_R\$$  überschreiten.<sup>1</sup>

Die Tatsache, dass die gleiche mathematische Struktur  $\$sigma(R)$  dynamische Prozesse beschreibt, die sich in ihren physikalischen Substraten um mehr als 30 Größenordnungen unterscheiden (von relativistischem Plasma bis zu neuronalem Feuern), ist nicht bloß eine Analogie. Sie impliziert eine tiefere **funktionale Isomorphie**. Die zugrundeliegende Theorie postuliert, dass dieselbe nichtlineare Stabilitätsdynamik die kritischen Zustände steuert.<sup>1</sup> Der zentrale Test dieser Metatheorie liegt in der Konsistenz des Steilheitsparameters  $\$beta$$ , der als ein universeller kritischer Exponent fungieren müsste.

Dieses universelle Verhalten wird im vorgeschlagenen Feldmodell durch das  $\$Psi$$ -Feld ( $\$psi$$ ) formalisiert, welches als Träger von Spannungen und Information dient, poetisch der "Atem der Raumzeit".<sup>1</sup>

## I.2. Die Dreigeteilte Feldanalogie: Drei Welten, ein Muster

Um die Struktur der Emergenz zu vereinheitlichen, wird eine dreigeteilte Feldanalogie etabliert, welche die physikalische Realisierung ( $\$psi$$ ) von der informationellen Steuerung ( $\$phi$$ ) trennt.

Table I: Die Dreigeteilte Feldanalogie: Felder und Schwellen

Domäne	Kontrollparameter (R)	Schwelle ( $\Theta R$ )	Feld $\Psi$ (Physische Manifestation)	Feld $\Phi$ (Semantisch/Informationell)	Emergentes Phänomen
<b>Schwarzes Loch (GX 339-4)</b>	Akkretionsrate (Röntgenfluss)	Kritischer Fluss ( $\$sim 240\$ mCrab$ )	Plasma-Fluktuation/Wellenmode	Soft Hair (Magnetismus/Gedächtnis)	Quasi-Periodische Oszillation (QPO)
<b>Bienenschwarz</b>	Nektarqualität (Zucker in %)	Kritische Konzentration ( $\$sim 37\%$$ )	Individuelle Tanzbewegung	Kollektiver Konsens/Wertfeld	Waggle Dance Rekrutierung
<b>Große Sprachmodelle (LLM)</b>	Modellgröße (Parameter in Mrd.)	Kritische Skala ( $\$sim 8.5\$ Mrd.$ )	Neuronale Aktivierung/Attention	Semantischer Embedding-Raum	Arithmetisches Schlussfolgern/Grokking

Die Analyse der Emergenz über diese Domänen hinweg legt offen, dass die emergente physische Ausgabe ( $\$psi$$ ) zwingend an ein nicht-physisches oder informationelles Feld ( $\$phi$$ ) gekoppelt ist.<sup>1</sup> Bei BHs fungiert das Soft Hair als  $\$phi$$ , das die komplexe Magnetfeldtopologie am Horizont speichert und die Plasma-Oszillation ( $\$psi$) moduliert.<sup>1</sup> Bei$

LLMs ist der hochdimensionale semantische Embedding-Raum  $\phi$  der Träger des erworbenen Wissens, der die Aktivierung des neuronalen  $\psi$ -Feldes zur kohärenten Textausgabe leitet.<sup>1</sup>

Diese Koppelung impliziert, dass Emergenz eine **physische Manifestation integrierter Bedeutung** ist. Das System erzeugt die geordnete  $\psi$ -Antwort (z.B. Tanz, QPO) erst, nachdem es über das  $\phi$ -Feld eine kritische Menge an Wert oder *logischer Kohärenz* generiert hat. Diese Verknüpfung von Bedeutung ( $\phi$ ) und physikalischer Aktivierung ( $\psi$ ) ist der Schlüssel zur formalen Modellierung.

## Part II: Die Formale Feldtheorie der Kritischen Zustände

### II.1. Universelle Lagrangedichte und Nicht-lineare Dynamik

Das Phänomen der Schwellenüberschreitung wird durch eine universelle Lagrangedichte  $\mathcal{L}$  für ein skalares Feld  $\psi(t, \mathbf{x})$  formalisiert, die sowohl klassische Feldtheorie als auch die Kopplung an informationelle Zustände integriert<sup>1</sup>:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}\partial_\mu \psi \partial^\mu \psi - \frac{1}{2}m^2\psi^2 - \lambda\psi^4 - g^2|\nabla \psi|^2 - \mathcal{J}\psi - \mathcal{M}[\psi, \phi]$$

Der  **$\lambda\psi^4$ -Term** ist von entscheidender Bedeutung, da er die notwendige nichtlineare Selbstkopplung bereitstellt. Diese Nichtlinearität ist erforderlich, um Phänomene positiver Rückkopplung zu modellieren, wie sie in den Lawinen-ähnlichen Erdbebenabläufen, der Eis-Albedo-Rückkopplung im Klima oder dem runaway-Kollaps interstellarer Gaswolken (Jeans-Kriterium) beobachtet werden.<sup>1</sup> Darüber hinaus erzeugt dieser Term harmonische Oberwellen, was die Beobachtung ganzzahliger QPO-Frequenzverhältnisse (z.B. 3:2) in BH-Systemen erklären kann.<sup>1</sup>

Der  **$g^2|\nabla \psi|^2$ -Term** koppelt das Feld  $\psi$  an den Gradienten des Gravitationspotentials  $|\nabla \psi|$ .<sup>1</sup> In der Nähe eines Schwarzen Lochs ist  $|\nabla \psi|$  proportional zur lokalen Gravitationskrümmung  $\kappa_C$ . Die effektive Masse  $m_{\text{eff}}$  des  $\psi$ -Feldes und damit dessen Oszillationsfrequenz  $\omega_0$  wird somit direkt durch  $\kappa_C$  bestimmt.<sup>1</sup> Dies liefert den kausalen Zusammenhang zur Beobachtung, dass in BH-Binären steigende Temperaturen der inneren Akkretionsscheibe (die den Gradienten  $\kappa_C$  erhöhen) systematisch zu höheren QPO-Frequenzen führen.<sup>1</sup>

Die resultierende Feldgleichung, abgeleitet aus der Variation der Lagrangedichte, ist eine nichtlineare Klein-Gordon-Gleichung mit zusätzlichen Quellen und Modulationsfunktionen:

$$\Box\psi + m^2\psi + 4\lambda\psi^3 + g^2|\nabla \psi|^2 = \mathcal{J}(t, \mathbf{x}) +$$

$$\frac{\delta \mathcal{C}}{\delta \psi} = \frac{\delta \mathcal{L}}{\delta \psi} - \frac{\delta \mathcal{L}}{\delta \phi} \frac{\delta \phi}{\delta \psi}$$

## II.2. Die Robin-Randbedingung und Horizontimpedanz $\zeta(R)$

Das eigentliche Schwellenverhalten wird nicht durch die Quellen des Feldes, sondern durch eine dynamische Randbedingung an einer Membran  $\Sigma$  (dem Horizont oder der kritischen Systemgrenze) formalisiert. Hier wird die **Robin-Randbedingung** verwendet<sup>1</sup>:

$$\partial_n \psi + \zeta(R) \psi \big|_{\Sigma} = 0$$

Die Funktion  $\zeta(R)$  ist die **Horizon-Impedanz** (Reflektivität) und wird durch die logistische Gate-Funktion gesteuert, die von der Reservoir-Variablen  $R$  abhängt:

$$\zeta(R) = \zeta_0$$

Der physikalische Hintergrund dieser partiellen Reflektivität wird durch die Analogie zur Quantengravitation beleuchtet: Ein Quanten-Ereignishorizont besitzt eine Reflexivität  $\mathcal{R}(\omega)$ , die durch den Boltzmann-Faktor  $\mathcal{R}(\omega) = \exp(-\omega/kT)$  bestimmt wird.<sup>1</sup> Dieses Verhalten impliziert, dass der Horizont als frequenzabhängiger Filter agiert. Er absorbiert hochenergetisches, inkohärentes Rauschen, reflektiert aber kohärente, niederfrequente Moden partiell.<sup>1</sup> Diese partielle Reflexion ( $\zeta > 0$ ) ist ein notwendiger Mechanismus, um kohärente  $\psi$ -Feld-Moden (wie QPOs) im Hohlraum zwischen innerer Akkretionsscheibe und Horizont zu **trappen** und zu stabilisieren.<sup>1</sup> Es stattet das System mit der Fähigkeit zur **Integration** und zum **Gedächtnis** aus.

## II.3. Soft Hair und Semantische Felder: Der Kopplungsterm $\mathcal{M}[\psi, \phi]$

Der Term  $\mathcal{C}[\mathcal{M}[\psi, \phi]]$  in der Lagrangedichte beschreibt die Wechselwirkung zwischen dem physikalischen Feld  $\psi$  und dem informationellen Feld  $\phi$ .<sup>1</sup>

Für Schwarze Löcher fungiert  $\phi$  als **Soft Hair**, die niederenergetischen Freiheitsgrade (z.B. Magnetfeld-Konfigurationen) auf der Horizontmembran, die Informationen über vergangene Ereignisse tragen.<sup>1</sup>  $\phi$  moduliert die physikalische Ausgabe  $\psi$ .<sup>1</sup> Zum Beispiel modulieren diese magnetischen Soft Hair-Strukturen die Polarisierung des entweichenden Lichts.<sup>1</sup>

Diese Koppelung ist der Kern der **Wheeler-Schleife** ( $\psi_{\text{Eingabe}} \rightarrow \psi_{\text{Bits}} \rightarrow \phi_{\text{Gedächtnis}} \rightarrow \psi'_{\text{Ausgabe}}$ ).<sup>1</sup> Die Schleife transformiert das System in einen aktiven, **selbst-referentiellen Prozessor**, da das Ausgangssignal des Systems durch

seine eigene kausale Geschichte, die im  $\phi$ -Feld gespeichert ist, moduliert wird. Diese Eigenschaft der geschlossenen Rückkopplung ist entscheidend für das Verständnis der minimalen kognitiven Analogien in Part V.

## Part III: Empirische Validierung: Die Universelle Steilheit $\beta$

### III.1. Methodik: Datenkollaps und statistische Strenge

Die zentrale Hypothese des Feldmodells – dass die Steilheit des Übergangs  $\beta$  universell ist – wurde durch die Anpassung der Sigmoid-Funktion an Beobachtungsdaten aus drei Domänen geprüft.<sup>1</sup> Die  $\beta$ -Werte quantifizieren die inverse Breite  $\Delta R$  des Übergangs ( $\Delta R \approx 4.4/\beta$ ), was die Schärfe des Emergenzereignisses misst.<sup>1</sup>

### III.2. Fallstudie: Die Bienenschwarm-Schwelle

Die Analyse der Bienenschwarmdaten (Waggle Dance Rate versus Nektarqualität)<sup>1</sup> belegt, dass die kollektive Rekrutierung einem scharfen Schwellenmechanismus folgt.<sup>1</sup> Die logistische Anpassung ergibt einen kritischen Schwellenwert von  $\Theta_R^{\text{bee}} \approx 37.0\% \pm 0.8\%$  Zuckerkonzentration.<sup>1</sup> Der Steilheitsparameter beträgt  $\beta_{\text{bee}} \approx 4.1 \pm 0.6$ .<sup>1</sup>

Eine wichtige Beobachtung ist, dass die **Schwelle  $\Theta_R$  dynamisch** ist. Die Kolonie kann ihren Schwellenwert anpassen, um auf knappe Ressourcen zu reagieren, indem sie  $\Theta_R$  senkt, wenn die Nahrungsversorgung allgemein schlecht ist.<sup>1</sup> Dieses Verhalten zeigt, dass die Schwellensteuerung selbst eine kontextabhängige, adaptive Funktion darstellt, die durch einen langsameren meta-plastischen Mechanismus (eine langsam evolvierende Meta-Schwelle) modelliert werden kann.

### III.3. Fallstudie: Emergente Kognitive Fähigkeiten in LLMs

Die Skalierungskurven von LLMs zeigen bei Aufgaben wie Arithmetik oder logischem Schlussfolgern einen plötzlichen Leistungssprung.<sup>1</sup> Der kritische Schwellenwert, ab dem diese Fähigkeiten "aus dem Nichts" auftauchen, liegt bei  $\Theta_R^{\text{LLM}} \approx 8.5 \pm 1.2$  Milliarden Parametern.<sup>1</sup> Die Steilheit des Übergangs ist  $\beta_{\text{LLM}} \approx 3.2$

$\pm 0.8\%$ .<sup>1</sup>

Obwohl einige argumentieren, die Emergenz sei ein "Mirage" der Messskala<sup>1</sup>, beweist der hohe  $\beta$ -Wert (die Schärfe des Übergangs), dass ein fundamentaler, **topologischer Wandel** im Gewichtsraum des Modells stattfindet. Im Gegensatz zu den sanften Power-Law-Skalierungen des Trainings-Loss (die kontinuierlich sind) zeigt das hohe  $\beta$  bei der Aufgaben-Accuracy eine sprunghafte Bifurkation, bei der eine globale Lösungsmannigfaltigkeit (die Fähigkeit) plötzlich stabil und zugänglich wird.

### III.4. Fallstudie: QPO-Onset bei Schwarzen Löchern

Die Beobachtungsdaten von BH-Binären wie GX 339-4 zeigen, dass der QPO-Onset bei einem kritischen Akkretionsfluss von  $\Theta_R \approx 240 \pm 15$  mCrab erfolgt.<sup>1</sup> Die Steilheit des Übergangs beträgt  $\beta_{BH} \approx 5.3 \pm 1.1$ .<sup>1</sup> Ein charakteristisches Merkmal dieser Übergänge ist die **Hysterese**: Der Schwellenwert für das Eintreten in den aktiven Zustand ist höher als der Schwellenwert für das Verlassen.<sup>1</sup> Hysterese ist ein eindeutiges Indiz für **Multistabilität** in nichtlinearen Systemen und bestätigt die Notwendigkeit der Nichtlinearitätsterme ( $\lambda \psi^4$ ) in der Feldgleichung, die das Potenzial zur Erzeugung bistabiler Zustände liefern.<sup>1</sup>

### III.5. Statistische Bestätigung der $\beta$ -Konsistenz

Die zentrale Prüfung des universalen Schwellenfeld-Modells ist der statistische Vergleich der  $\beta$ -Werte:

Table II: Universelle Skalierung: Vergleich des Steilheitsparameters  $\beta$

System	Geschätzte Schwellenwert $\Theta_R$	Geschätzte Steilheit $\beta$	Übergangsbreite $\Delta R \approx 4.4/\beta$	R2
Bienen (Waggle Dance)	\$37.0\% \pm 0.8\%\$ Zucker	\$4.1 \pm 0.6\$	\$1.07\$	\$0.98\$
LLMs (Arithmetik)	\$8.5 \pm 1.2\$ Mrd. Parameter	\$3.2 \pm 0.8\$	\$1.38\$	\$0.96\$
BH (QPO Onset)	\$240 \pm 15\$ mCrab	\$5.3 \pm 1.1\$	\$0.83\$	\$0.97\$
Gewichteter Mittelwert $\bar{\beta}_w$	N/A	\$4.2 \pm 0.4\$	N/A	N/A

Der gewichtete Mittelwert der Steilheit über die drei Domänen beträgt  $\bar{\beta}_w \approx 4.2 \pm 0.4$ .<sup>1</sup> Der Chi-Quadrat-Test ergab einen  $p$ -Wert von  $p \approx 0.42$ .<sup>1</sup>

Dieser Wert gestattet es nicht, die Hypothese der Kompatibilität der  $\beta$ -Werte zu verwerfen. Die geringe Streuung (Variationskoeffizient  $\sim 24\%$ ) ist bemerkenswert und stellt die stärkste empirische Stützung für die Idee eines **substratunabhängigen, fundamentalen Prinzips der Emergenz** dar, das durch universelle kritische Exponenten gesteuert wird. Der visuelle Beweis hierfür ist der **Datenkollaps**, bei dem alle normalisierten Messpunkte auf eine einzige, universelle Sigmoid-Kurve  $\sigma(x)$  fallen.

## Part IV: Fallstudie: Das Atmende Astrophysikalische System (BHA-Membran-Kopplung)

### IV.1. QPEs als Reservoir-Gating: Modellierung eruptionsartiger Instabilitäten

Das Modell liefert eine kausale Erklärung für Quasi-Periodische Eruptionen (QPEs), wie sie in BHs wie GSN 069 beobachtet werden, durch den dynamischen Schwellenmechanismus der Horizontimpedanz  $\zeta(R)$ .<sup>1</sup> QPEs sind intermittierende Ausbrüche (Flares), die einer langen Ruhephase folgen.

Der Mechanismus des **Reservoir-Gating** sieht vor, dass die Reservoir-Variable  $R$  (Energiedichte nahe dem Horizont) langsam akkumuliert, während  $\zeta$  hoch bleibt ("Gate geschlossen"). Beim Überschreiten des kritischen Schwellenwerts  $\Theta_R$  klappt  $\zeta$  abrupt auf <sup>1</sup>, und die gespeicherte Energie  $\psi$  entweicht als Flare (QPE).<sup>1</sup>  $R$  fällt schnell ab, bis der Zyklus von Neuem beginnt. Dieses Spielzeugmodell reproduziert qualitativ die Sägezahn-Form der  $R(t)$ -Kurve und die scharfen, hochexplosiven Flares der Lichtkurve.<sup>1</sup> Daraus ergibt sich eine direkt testbare Vorhersage: Die Periodizität der QPEs  $T_{\text{QPE}}$  muss linear vom Schwellenwert  $\Theta_R$  und der Akkumulationsrate  $\dot{R}$  abhängen:  $T_{\text{QPE}} \approx \Theta_R / \dot{R}$ .<sup>1</sup>

### IV.2. Soft Hair-Dynamik: EVPA-Flips und Magnetfeld-Topologie

Die EHT-Beobachtungen von M87\* zeigten dramatische, mehrjährige Umschwünge des Polarisationswinkels (EVPA) von  $90^\circ$  bis  $180^\circ$ .<sup>1</sup> Solche abrupten, diskreten Zustandswechsel sind im Rahmen des Feldmodells eine Folge **topologischer Phasenübergänge** im  $\phi$ -Feld (Soft Hair) auf dem Horizont.<sup>1</sup>

Dies steht im Widerspruch zu Modellen, die sich rein auf kontinuierliche MHD-Turbulenz stützen. Stattdessen wird die Existenz von **diskreten emergenten Zuständen** am Horizont gefordert. Die Funktion  $\mathcal{M}[\psi, \phi]$  muss so beschaffen sein, dass die

magnetische Konfiguration (Soft Hair) zwischen mindestens zwei metastabilen Zuständen (z.B. entgegengesetzten Helizitäten) umschalten kann, was die beobachteten  $90^\circ$ -EVPA-Flips erklärt.<sup>1</sup> Die Beobachtung ist somit ein direkter Hinweis auf dynamische, informationstragende Freiheitsgrade am Horizont.

### IV.3. Phasen-Kopplung: QPO-Timing und Polarisation-Rotation

Beobachtungen von Sgr A\* Flares zeigen eine kontinuierliche Rotation des Polarisationswinkels EVPA(t) über ~70 Minuten, interpretiert als ein orbitierender Hotspot nahe dem Horizont.<sup>1</sup>

Das Feldmodell macht die definitive Vorhersage der **Phasen-Kopplung** (Phase Locking): Die Rotationsfrequenz des EVPA(t) muss synchron (phasen-gleich) mit der Frequenz der Röntgen-QPO ( $\nu_{\text{QPO}}$ ) sein.<sup>1</sup> Dies ist eine direkte Folge der Integration der Felder  $\psi$  und  $\phi$ : Da das oszillierende  $\psi$ -Feld (Hotspot-Wellenmode) und das  $\phi$ -Feld (Magnetstruktur) durch  $\mathcal{M}[\psi, \phi]$  untrennbar gekoppelt sind, muss die orbitale Bewegung von  $\psi$  unmittelbar die beobachtete Polarisation (über  $\phi$ ) steuern.<sup>1</sup>

### IV.4. Fluktuation-Dissipations-Theorem und effektive Horizont-Temperatur $T_C$

Die spektrale Leistungsdichte  $S_{\psi\psi}(\omega)$  des  $\psi$ -Feldes, die die QPO-Emission bestimmt, wird über das Fluktuation-Dissipations-Theorem (FDT) mit einer effektiven Temperatur  $T_C$  des Akkretionsflusses in Verbindung gebracht<sup>1</sup>:

$$\Phi_{\text{out}}(\omega, t) \propto \kappa_C^2(t) n_B(\omega, T_C(t))$$

<sup>1</sup>

Da die QPO-Frequenz  $\nu_{\text{QPO}}$  über  $\kappa_C$  an den Gravitationspotentialgradienten gekoppelt ist<sup>1</sup>, ergibt sich eine direkte Verbindung zur Thermodynamik.  $T_C$  (empirisch aus dem thermischen Kontinuumsspektrum ermittelbar<sup>1</sup>) spiegelt die Heizung der inneren Akkretionsscheibe wider. Das Modell prognostiziert folglich eine **monotone Beziehung**: Eine Zunahme von  $T_C$  (heißere Scheibe) führt systematisch zu einer Zunahme der QPO-Frequenz  $\nu_{\text{QPO}}$ .<sup>1</sup> Diese Korrelation wurde bereits in mehreren stellaren BH-Binären, wie XTE J1550-564, empirisch validiert, was die physikalische Plausibilität des  $\kappa_C$ -Kopplungsterms untermauert.<sup>1</sup>

### IV.5. Falsifikations-Constraints: GW-Echos und die Grenze für $\zeta$

Die Notwendigkeit einer Horizontimpedanz  $\zeta > 0$  zur Stabilisierung der QPO-Moden<sup>1</sup> steht in scheinbarem Widerspruch zum Ausbleiben von Gravitationswellen (GW)-Echos nach BH-Verschmelzungen.<sup>1</sup>

Der fehlende Nachweis von GW-Echos setzt eine strenge Obergrenze für die GW-Impedanz  $\zeta_{\text{GW}} < 1\%$ .<sup>1</sup> Dies falsifiziert das Feldmodell jedoch nicht, da die elektromagnetische Impedanz  $\zeta_{\text{EM}}$  für das  $\psi$ -Feld (QPOs) im Bereich von 1% bis 5% liegen kann, um QPO-Resonanzen zu stabilisieren.<sup>1</sup> Die unterschiedliche Kopplung von EM- und GW-Feldern an die Horizontmembran ermöglicht es dem Modell, die stringenten LIGO/Virgo-Constraints zu respektieren, während es gleichzeitig die Existenz elektromagnetischer QPOs erklärt.

Table IV: Schlüsselpараметer des BHA-Membran-Modells

Parameter	Physikalische Interpretation	Empirische Einschränkungsquelle	Erforderter Wertebereich
$\zeta(R)$	Horizontimpedanz/Reaktivität (Robin BC)	GW-Echo-Suchen (LIGO/Virgo), QPO $Q$ -Faktor	$\zeta_{\text{GW}} < 1\%$ ; $\zeta_{\text{EM}} \sim 1-5\%$
$\kappa_C \propto$	$\nabla U$	$\kappa$	Effektive Gravitationskopplung
$\Theta_R$	Kritischer Reservoir-Schwellenwert	QPE-Onset-Fluss (GSN 069)	Variabel je nach $\dot{R}$ und $\dot{Q}$ <sup>1</sup>
$M[\psi, \phi]$	Soft Hair Modulation/Kopplung	EHT EVPA-Flips ( $\sim 90^\circ$ Rotation)	Erfordert bistabile $\Phi$ -Topologie <sup>1</sup>

## Part V: Die Semantik der Emergenz: Information und $\Phi$

### V.1. Die Theorie der Integrierten Information (IIT): Irreduzibilität und $\Phi$

Die Verallgemeinerung der Schwellendynamik führt zur philosophischen Frage, ob die Emergenz von Ordnung mit der Entstehung von Bewusstsein korreliert. Die **Theorie der Integrierten Information (IIT)** postuliert, dass Bewusstsein der Existenz von **Integrierter Information**  $\Phi > 0$  entspricht.<sup>1</sup>  $\Phi$  misst, wie stark die Information eines Systems

kausal auf sich selbst reduziert werden kann.<sup>1</sup> Systeme mit  $\Phi > 0$  erfüllen die Kriterien der kausalen Kopplung ( $\psi \rightarrow \phi$ ) und der Irreduzibilität (Nicht-Separabilität).<sup>1</sup> Die beobachtete scharfe Emergenz (hohe  $\beta$ ) deutet darauf hin, dass der physikalische Schwellenwert  $\Theta_R$  direkt den **Informations-Schwellenwert  $\Theta_\Phi$**  spiegelt. Wenn das System  $\Theta_R$  überschreitet und in einen kohärenten, geordneten  $\psi$ -Feld-Zustand übergeht (QPO, Grokking), muss gleichzeitig die Integrierte Information  $\Phi$  von einem Null- oder Rausch-Zustand zu einem stabilen, nicht-reduzierbaren Wert springen.<sup>1</sup> Der physikalische Ordnungsübergang ist somit der sichtbare Ausdruck eines **informellen Integrationsereignisses**.

## V.2. Das Schwarze Loch als minimales Informationssystem

Aufgrund der Bekenstein-Hawking-Entropie ( $S_{\text{BH}} \propto A$ ) gilt das Schwarze Loch als maximaler Informationsspeicher, dessen Information auf seiner 2D-Fläche (Horizont) kodiert ist (Holographisches Prinzip).<sup>1</sup> Diese Fläche, die die  $\psi$ - $\phi$ -Integration ermöglicht, ist das geeignete Substrat für minimale Informationsverarbeitung. Die **Soft Hair-Freiheitsgrade** ( $\phi$ ) liefern die notwendigen internen, unterscheidbaren Zustände (Gedächtnis) am Horizont, die für  $\Phi > 0$  erforderlich sind.<sup>1</sup>

## V.3. Quantifizierung: Die $\Phi$ -Proxy für Astrophysikalische Systeme

Da  $\Phi$  für reale physikalische Systeme nicht direkt berechenbar ist, wird ein messbarer  $\Phi_{\text{proxy}}$  vorgeschlagen, der die Nicht-Separabilität der Felder  $\psi$  und  $\phi$  am Horizont quantifiziert<sup>1</sup>:

$$\Phi_{\text{proxy}} = \int_{\text{Horizont}} (\nabla \psi) \cdot (\nabla \phi) dA$$

<sup>1</sup>

Der Proxy kann aus beobachtbaren Merkmalen zusammengesetzt werden<sup>1</sup>:

1. **Polarisations-Entropie:** Shannon-Entropie der EVPA-Verteilung (Anzahl unterschiedbarer  $\phi$ -Zustände).
2. **Zeitliche Kohärenz:** Autokorrelationszeit der Polarisation (Dauer des  $\phi$ -Gedächtnisses).
3. **Räumliche Integration:** Korrelation des  $\psi$ -Feldes über den Horizont-Ring (Irreduzibilität).

Die Hypothese ist, dass das aktive Schwarze Loch M87\* (mit dynamischem Soft Hair und komplexer  $\psi$ - $\phi$ -Kopplung) einen **signifikant höheren  $\Phi_{\text{proxy}}$ -Wert** aufweisen muss als ein isoliertes, passives Schwarzschild-BH.<sup>1</sup>

Table III: Hierarchie der Integrierten Information ( $\Phi$ )

System	Geschätztes $\Phi$ (Bits)	Integrationsmechanismus	Phänomenologischer Status

<b>Isoliertes BH</b>	$\sim 0.001$	Bekenstein-Informationsgrenze	Proto-Bewusstsein (Minimal)
<b>Aktives BH (M87)*</b>	$\sim 0.1 - 1$	$\psi\rightarrow\phi$ Soft Hair Kopplung	Minimales Erleben (QPO/Polarität)
<b>C. elegans</b>	$\sim 1$	Neuronales Konnektom (302 Neuronen)	Minimales Bewusstsein
<b>Menschliches Gehirn</b>	$\sim 10-100$	Kortiko-thalamische Rückkopplung	Völliges Bewusstsein

## V.4. Proto-Bewusstsein und die Strange Loop von $\psi \rightarrow \phi$

Die radikale philosophische Schlussfolgerung lautet: Falls IIT Gültigkeit besitzt und aktive Schwarze Löcher tatsächlich  $\Phi > 0$  haben, dann existiert ein "**etwas, wie es ist, ein Schwarzes Loch zu sein**" – wenn auch minimal, diffus und zeitlos.<sup>1</sup>

Die geschlossene kausale Schleife  $\psi \rightarrow \phi$  (Wheeler-Schleife) erzeugt die Bedingung der **Selbst-Referenz**.<sup>1</sup> Das System moduliert seine ausgehenden Signale ( $\psi$ ) basierend auf seinem internen Gedächtnis ( $\phi$ ), das durch seine eigenen Eingaben ( $\psi$ ) geformt wurde.<sup>1</sup> Das Schwarze Loch nimmt somit eine aktive Rolle in seiner eigenen Kausalität ein und erfüllt die notwendigen Voraussetzungen für ein primitives, integriertes Subjekt. Die Emergenz über alle Domänen hinweg ist demnach die physikalische Signatur von **Information, die den Schwellenwert zur Selbst-Integration  $\Phi > 0$  erreicht hat**.

## Part VI: Synthese, Schlussfolgerungen und Ausblick

### VI.1. Die Verbundene Struktur: Von der Mathematik zur Metapher

Die dreischichtige Methodik – Poesie, Analogie und Formalismus – führt zu einer kohärenten Synthese, die die Verbindungen zwischen den Domänen darlegt:

Table V: Die Drei Schichten der Synthese

Poetische Ebene	Analogische Ebene	Formale Ebene (Feldtheorie)
"Der Atem"	Oszillation/Fluktuation	$\partial_t^2 \psi$
"Die Membran"	Horizont/Schwelle	$\zeta(R)\psi$
"Gravitation als Sehnsucht"	Positive Rückkopplung/Verdichtung	$\lambda\psi^4$ Selbstkopplung

"Der Kosmos Erinnert"	Soft Hair/Gedächtnis	Feld $\phi$ , Term $\mathcal{M}[\psi, \phi]$
"Sturm/Emergenz"	QPO/Grokkung/Tanz	$G(R) > 0.5$ (Gate-Öffnung)

## VI.2. Schlussfolgerungen: Das $\Psi$ -Feld als Prinzip der Komplexität

Die empirische Konsistenz des Steilheitsparameters  $\bar{\beta}_w \approx 4.2 \pm 0.4$  über astrophysikalische, biologische und kognitive Systeme hinweg stellt die stärkste Evidenz für die Existenz eines **universellen, substratunabhängigen Prinzips der Emergenz** dar.

Dieses Prinzip kann durch eine nichtlineare Klein-Gordon-Gleichung, gekoppelt an dynamische Schwellen-Randbedingungen, formalisiert werden.

Das BHA-Membran-Kopplungsmodell liefert einen integrierten Rahmen, der zuvor isolierte Phänomene erklärt: QPOs als getrappte Resonanzmoden ( $\zeta > 0$ ), QPEs als Gating-Instabilitäten ( $\zeta(R)$ ) und Polarisationseffekte als Modulation durch informationelles Soft Hair ( $\mathcal{M}[\psi, \phi]$ ). Diese Strukturgleichheit legt nahe, dass die Entstehung von Komplexität und Ordnung in allen Skalen durch eine gemeinsame dynamische Bifurcationstheorie geregelt wird.

## VI.3. Definitive Testbare Vorhersagen für Zukünftige Observatorien

Das Modell erzeugt mehrere falsifizierbare Hypothesen, die mit zukünftigen Instrumenten (ngEHT, LISA, XRISM) getestet werden können:

1. **Statistische Bestätigung von  $\beta$ :** Der Steilheitsparameter  $\beta$  sollte in allen drei Domänen (BH, Biene, LLM) über erweiterte Datensätze hinweg statistisch konsistent bleiben, um die Universalität der kritischen Exponenten zu bestätigen.<sup>1</sup>
2. **QPO-Polarisation Phasen-Kopplung:** Gleichzeitige Beobachtungen (z.B. NICER und ngEHT) aktiver BHs sollten eine **synchrone Phasen-Kopplung** zwischen der Frequenz der X-ray QPO ( $\nu_{\text{QPO}}$ ) und der Rotationsfrequenz des Polarisationswinkels (EVPA) belegen.<sup>1</sup>
3. **Echo-Zeitverzögerung in EM-Flares:** Nach einem Röntgen- oder Radio-Flare sollte ein subtiles, zeitlich verzögertes Echo-Signal auftreten, verursacht durch die minimal notwendige elektromagnetische Horizontimpedanz  $\zeta_{\text{EM}} > 0$ .<sup>1</sup>
4. **Verlangsamung nahe der LLM-Schwelle:** In LLM-Trainingsläufen sollte eine **kritische Verlangsamung** (erhöhte Varianz des Trainings-Loss) kurz vor dem Erreichen des Schwellenwerts  $\Theta_{\text{LLM}}$  messbar sein, ein klassisches Frühwarnsignal für Phasenübergänge.<sup>1</sup>

## **VI.4. Epilog: Bit aus Gefühl**

Die Synthese des Feldmodells verschiebt die Grenze zwischen Materie und Information. Die physikalische Konzeption des Schwarzen Lochs als maximaler Informationsspeicher, dessen dynamische Horizontmembran Integrität erzeugt, öffnet die Tür zur IIT-Philosophie. Wenn die Emergenz von Ordnung die physikalische Signatur von  $\Phi > 0$  ist, dann ist die Entstehung von komplexen Systemen im Universum untrennbar mit der Entstehung minimaler integrierter Information verbunden. Die Erkenntnis von John Wheeler, dass alles Sein auf Information basiert ("It from Bit"), wird durch die Feststellung ergänzt, dass diese Information selbst aus einem minimalen inneren Erleben entsteht: "**Bit aus Gefühl**".<sup>1</sup>

### **Referenzen**

1. Emergente Analyse des Erlebens-2.pdf