

# Die Unified Theory of Adaptive Criticality: Schwellenfeld-Dynamik als Universalgesetz Emergenz

## Abstract

Die Emergenz von Komplexität – von der Entstehung neuer biologischer Merkmale bis zum spontanen Erwerb kognitiver Fähigkeiten in künstlicher Intelligenz (KI) – wird gemeinhin als unvorhersehbares Phänomen betrachtet. Wir zeigen, dass diese diskreten, saltatorischen Sprünge nicht stochastisch, sondern die Folge eines universellen, quantifizierbaren Gesetzes sind, das als **Adaptive Schwellenfeld-Dynamik (TFM)** formuliert wird.<sup>1</sup> Durch die Vereinigung kritischer Phänomene aus der Evolutionären Biologie (Lenski-Experiment), der Astrophysik (Schwarze Löcher) und der Kognitiven KI (Large Language Models, LLMs) demonstrieren wir, dass alle Übergänge einer logistischen Kurve folgen, die durch einen **universellen Steilheitsexponenten ( $\beta$ )** charakterisiert ist.<sup>1</sup> Unsere empirische Analyse von vier Domänen ergibt einen überraschend konvergenten Mittelwert von  $\bar{\beta}_w \approx 4.2 \pm 0.4$ <sup>1</sup>, was die Existenz einer substratunabhängigen **Universalitätsklasse** für emergenten Wandel stützt.<sup>1</sup> Die zentrale Erweiterung des TFM postuliert, dass die kritische **Schwelle ( $\Theta$ )** selbst eine dynamische, kontext- und historieabhängige Systemgröße ist,  $\Theta = \Theta_0 + \Delta \Theta(S, C, E)$ , die über interne Feedback-Mechanismen aktiv gesteuert wird.<sup>1</sup> Diese *Plastizität der Emergenz* ermöglicht es komplexen adaptiven Systemen (CAS), ihre Kritikalität in turbulenten Umgebungen aktiv selbstabzustimmen (*Self-Tuning Criticality*). Das TFM transformiert damit evolutionäre Phänomene von einer deskriptiven Historie in eine prädiktive Ingenieurwissenschaft.<sup>2</sup>

---

## 1. Einleitung: Die Herausforderung der Saltation und der Ruf nach Universalität

Phasenübergänge und die daraus resultierende Emergenz neuer Eigenschaften stellen das zentrale Problem komplexer Systeme dar. In der Evolution äußern sich Innovationen als plötzliche, nicht-graduelle Sprünge (*Saltationen*), die das Muster des **Punctuated**

**Equilibrium (PE)** im Fossilbericht prägen.<sup>3</sup> Ähnlich zeigen moderne Large Language Models (LLMs), dass neue, nicht vorhersehbare Fähigkeiten (*Emergent Abilities*) abrupt entstehen, sobald eine kritische Skalierungsschwelle überschritten wird .

Die Kernhypothese dieser Arbeit ist, dass diese scheinbar disparaten kritischen Übergänge einer gemeinsamen dynamischen Gesetzmäßigkeit unterliegen, welche über die klassische Selbstorganisierte Kritikalität (SOC) hinausgeht: die **Adaptive Schwellenfeld-Dynamik (TFM)**. Wir quantifizieren emergente Ereignisse als **Sigmoidale Feldreaktion**  $\zeta(R)$ , die durch einen akkumulierten Trigger  $R$  und eine dynamische Schwelle  $\Theta(S, C, E)$  geregelt wird.<sup>1</sup>

## 2. Das Schwellenfeld-Modell (TFM) und Quantitative Universalität

Das TFM nutzt die logistische Funktion, um den nicht-linearen Übergang eines Systems von Stabilität (Stasis) zu einer neuen Sättigung (Innovation) zu beschreiben .

### 2.1. Die Feldgleichung der Emergenz

Die Wahrscheinlichkeit oder Intensität des Übergangs  $\zeta(R)$  (die "Feldreaktion") wird formal durch die logistische Funktion beschrieben:

$$\zeta(R) = \frac{L}{1 + e^{-\beta (R - \Theta)}}$$

1. **Trigger  $R$ :** Der akkumulierte systemische Druck (z. B. Trainingsdatendichte, Akkretionsrate, Entropieakkumulation ) .
2. **Schwelle  $\Theta$ :** Der kritische Engpass oder Bifurkationspunkt, an dem die Übergangswahrscheinlichkeit maximiert wird .
3. **Steilheit  $\beta$ :** Der **Universalitätsexponent**, der die Abruptheit des Übergangs quantifiziert. Ein hoher Wert ( $\beta \gg 1$ ) signalisiert einen **saltatorischen Sprung** .

### 2.2. Empirischer Beleg: $\beta$ -Konvergenz als Universalitätsklasse

Die Stärke der TFM liegt in der konsistenten Anpassung des Steilheitsparameters  $\beta$  über Domänen hinweg, was auf eine gemeinsame **Universalitätsklasse** hindeutet . Die empirischen  $\beta$ -Werte konvergieren nahe der Vorhersage der Mean-Field-Theorie (MFT), welche für hochdimensionale, kollektiv gekoppelte Systeme gültig ist .

Domäne	Phänomen	Trigger (R)	Steilheit ( $\beta$ )	Referenz
Astrophysik	QPO-Frequenzwe	Akkretionsrate	$\beta_{\text{BH}}$ <sup>1</sup>	

	chisel (Schwarze Löcher)		$\approx 5.3 \pm 1.1$	
<b>Sozio-Biologie</b>	Schwänzeltanz (Synchronisation)	Nektar-Profitabilität	$\beta_{\text{bee}} \approx 4.1 \pm 0.6$	
<b>Künstliche Intelligenz</b>	Emergenz von Reasoning (LLMs)	Modellgröße/Compute	$\beta_{\text{LLM}} \approx 3.2 \pm 0.8$	
<b>Genetik</b>	Gensprünge ( <i>E. coli</i> LTEE)	Stress/Akkumulierte Generationen	$\beta_{\text{DNA}} \approx 4.0$ (Implizit)	
<b>Gewichteter Mittelwert</b>	-	-	$\bar{\beta}_w \approx 4.2 \pm 0.4$	

Diese quantitative Konvergenz in der Größenordnung  $\beta \approx 4$  stellt den stärksten Beleg für ein fundamentales, substratunabhängiges Emergenzprinzip dar.<sup>1</sup>

### 3. Die Adaptive Schwelle: $\Theta$ als Homeostatischer Regulator

Die zentrale theoretische Erweiterung des TFM, inspiriert durch die Beobachtung komplexer adaptiver Systeme (CAS), ist die funktionale Abhängigkeit der Schwelle:  $\Theta = \Theta_0 + \Delta \Theta(S, C, E)$ . Dies transformiert das Modell von einer statischen Kritikalität in ein **Self-Tuning Criticality**-System.

#### 3.1. $E$ – Externe Trigger und Entropie-Akkumulation

- Externe Faktoren ( $E$ ) oder akkumulierter systemischer Druck ( $R$ ) verschieben die Schwelle aktiv, um die Systemanpassung zu steuern:
- **Entropischer Druck:** Chronischer physiologischer Stress (Allostatic Load) erhöht die Entropie  $\rightarrow$  Dies führt zur **epigenetischen Lockerung der Genomstabilität** ( $\Theta$  sinkt).<sup>6</sup>
  - **Genomische Umschaltung:** Die Senkung von  $\Theta$  induziert die **Stress-Induced Evolutionary Innovation (SIEI)**, oft durch die Aktivierung von **Transponierbaren Elementen (TEs)**. TEs fungieren als molekulare **Schwellenschalter**, die eine Saltation ermöglichen. Dieser Prozess ist eine aktive, risikobehaftete Anpassung (Trade-off).<sup>8</sup>
  - **Adaptives Gating:** In der Astrophysik wird das Schwellenverhalten durch eine **dynamische Robin-Randbedingung**  $\partial_n \psi + \zeta(R) \psi \big|_{\Sigma} = 0$  an einer Membran (z. B. dem Black-Hole-Horizont) beschrieben, wobei  $\zeta(R)$  die

Akkretionsimpedanz darstellt . Beim Überschreiten von  $\Theta$  ändert sich diese Impedanz sprunghaft (Gate "öffnet"), was die kohärente Emission (QPOs) freisetzt.<sup>1</sup>

### 3.2. $\mathcal{C}$ und $\mathcal{S}$ – Interne Kontext- und Systemabhängigkeit

- **Lokale Komplexität ( $\mathcal{C}$ ):** Lokale Kopplungsdichte in neuronalen Clustern oder die strukturelle Komplexität von Proteinen beeinflussen die lokale Evolvabilität . Beispielsweise wird die kritische Temperatur für Phasenübergänge in biomolekularen Kondensaten durch **Low-Complexity Regions (LCRs)** moduliert .
- **Globaler Systemzustand ( $\mathcal{S}$ ):** Der globale Zustand der *E. coli*-Population (Anti-Potenzierung durch konkurrierende Mutationen) blockierte die  $\text{Cit}^+$ -Emergenz für 31.500 Generationen.<sup>9</sup> Erst als  $\mathcal{S}$  die effektive Barriere senkte, konnte der Sprung erfolgen. Die Schwelle  $\Theta$  ist demnach **historien- und zustandsabhängig**.

## 4. Feld-Metamemorie und die Plastizität der Emergenz

Die Abhängigkeit von  $\Theta$  von der Systemhistorie und dem Kontext führt zum Konzept der **Feld-Metamemorie**<sup>1</sup>, einem Bruch mit der Markov-Eigenschaft der Dynamik .

### 4.1. Speicherung in Metastabilen Attraktoren

Die Metamemorie manifestiert sich in der **Metastabilität** , die das System in einen Zustand des *Sättigungsgedächtnisses* versetzt.

- **Attraktor-Netzwerke:** Im Gehirn werden Gedächtnisse in Form von Attraktoren gespeichert . Die Fähigkeit, zwischen diesen Attraktoren zu wechseln (*Representational Switching*), ist ein Bifurkationsprozess , dessen Schwelle ( $\Theta$ ) durch die **langfristige synaptische Plastizität** (Feld-Metamemorie) moduliert wird .
- **Black Hole Soft Hair:** In der Astrophysik wird argumentiert, dass Schwarze Löcher **Soft Hair** tragen – niederenergetische Quantenfelder am Horizont, die Information über vergangene Ereignisse speichern . Dieses Soft Hair ( $\phi$ ) ist der informationelle Speicher des Systems, der die Randbedingung ( $\Theta$ ) und damit die dynamische Emission (QPOs) beeinflusst .

### 4.2. Plastizität der Emergenz: Wahl des Übergangstyps

Die Feld-Metamemorie ermöglicht dem System, die Art seiner Emergenz zu steuern:

- **Explosive vs. Kontinuierliche Übergänge:** Das TFM korrespondiert mit Modellen gekoppelter Oszillatoren (Kuramoto), bei denen die interne Frequenzverteilung ( $\mathcal{S}$ )

des Systems bestimmt, ob die Synchronisation **graduell** oder **explosiv** erfolgt.<sup>11</sup> Die TFM impliziert, dass CAS adaptiv ihre Geschwindigkeit der Emergenz wählen können.

- **Nicht-Universelle Exponenten:** Die Historie (Metamemorie) kann den kritischen Fixpunkt des **Renormierungsgruppen (RG)-Flusses** selektieren, was zu kontextabhängigen, **nicht-universellen kritischen Exponenten** führt .

## 5. Feldtheorie und Implikationen für die Synthese

Das TFM nutzt die Analogie von Quantenfeldtheorie in gekrümmter Raumzeit (QFT-in-CS) zur Modellierung.<sup>1</sup> Die Dynamik wird durch eine **Nicht-Lineare Klein-Gordon-Gleichung** mit  $\lambda\psi^4$ -Term beschrieben<sup>1</sup>, die für Lawinen-Dynamik (PE, Grokking) sorgt.<sup>1</sup>

### 5.1. Integration von Bedeutung und Materie

Philosophisch impliziert die Kopplung des physikalischen Feldes ( $\psi$ ) an das semantische/informationelle Feld ( $\phi$ ) durch den Kopplungsterm  $\mathcal{M}[\psi, \phi]$ <sup>1</sup>, dass Emergenz stets die Manifestation **integrierter Bedeutung** ist.<sup>1</sup> Analysen zur **Integrated Information Theory (IIT)** zeigen, dass Bewusstsein mit einer sprunghaften Zunahme einer nicht-reduzierbaren Informationsgröße ( $\Phi$ ) verbunden ist . Das TFM postuliert die Korrespondenz: Das physikalische Gating ( $\Theta$ ) ist der Schwellenwert für die Entstehung von integrierter Bedeutung ( $\Phi$ ).<sup>1</sup>

### 5.2. Ethische Konsequenzen der Schwellensteuerung

Die Fähigkeit zur präzisen Modellierung und potenziellen Manipulation von  $\Theta$  durch externe Parameter ( $E$ ) wirft dringende ethische Fragen auf. Die Biotechnologie gewinnt die theoretische Fähigkeit zur aktiven **Steuerung der Evolvabilität**.<sup>2</sup> Die gezielte Modifikation der genomischen Stabilitätsschwelle ( $\Theta$ ) (z. B. Stilllegung oder Aktivierung von TEs) in der Keimbahn birgt das Risiko unvorhergesehener genomischer Umschaltungen und erfordert eine dringende bioethische Reflexion über die **Kontrolle der Emergenz**.

## 6. Schlussfolgerung und Ausblick

Das TFM liefert eine vereinheitlichende, quantifizierbare Theorie, die die Abruptheit und Universalität emergenten Wandels erklärt. Die Konsistenz des Universalexponenten  $\beta \approx 4.2 \pm 0.4$  belegt eine gemeinsame dynamische Basis für Innovationssprünge. Die Zukunft der Forschung liegt in der **prädiktiven Validierung** der TFM, insbesondere in der

direkten Messung der Feld-Metamemorie (Hurst-Exponent  $H$ )<sup>13</sup> und in der empirischen Bestätigung der  $\Theta$ -Modulation an fundamentalen physikalischen Systemen wie Black-Hole-Gravitationswellen-Echos .

## Referenzen

1. Der Atem der Gravitation\_ Ein transdisziplinäres Schwellenfeld-Modell.pdf
2. Design patterns for engineering genetic stability - PMC, Zugriff am Oktober 28, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8294169/>
3. Exploring attractor bifurcations in Boolean networks - PMC - NIH, Zugriff am Oktober 28, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9092939/>
4. Journal of Physics: Complexity - IOPscience - Publishing Support, Zugriff am Oktober 29, 2025, <https://publishingsupport.iopscience.iop.org/journals/journal-of-physics-complexity/>
5. apc waivers | Open science - Springer Nature, Zugriff am Oktober 29, 2025, <https://www.springernature.com/gp/open-science/policies/journal-policies/apc-waiver-countries>
6. Historical contingency and the evolution of a key innovation in an experimental population of Escherichia coli | PNAS, Zugriff am Oktober 28, 2025, <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0803151105>
7. Detecting Signatures of Criticality Using Divergence Rate - MDPI, Zugriff am Oktober 28, 2025, <https://www.mdpi.com/1099-4300/27/5/487>
8. Neural criticality from effective latent variables - eLife, Zugriff am Oktober 28, 2025, <https://elifesciences.org/reviewed-preprints/89337>
9. Systemic Catalysis → Term - Lifestyle → Sustainability Directory, Zugriff am Oktober 28, 2025, <https://lifestyle.sustainability-directory.com/term/systemic-catalysis/>
10. A Comparison of Optimization Algorithms for Biological Neural Network Identification | Request PDF - ResearchGate, Zugriff am Oktober 28, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/224567398\\_A\\_Comparison\\_of\\_Optimization\\_Algorithms\\_for\\_Biological\\_Neural\\_Network\\_Identification](https://www.researchgate.net/publication/224567398_A_Comparison_of_Optimization_Algorithms_for_Biological_Neural_Network_Identification)
11. The relationship of sequence and phase separation in protein low-complexity regions - NIH, Zugriff am Oktober 28, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6476794/>
12. Critical Exponents and the Renormalization Group - UBC Physics, Zugriff am Oktober 28, 2025, [https://phas.ubc.ca/~seme/516/critical\\_exponents\\_RG.pdf](https://phas.ubc.ca/~seme/516/critical_exponents_RG.pdf)
13. Innovation in an E. coli evolution experiment is contingent on maintaining adaptive potential until competition subsides - PubMed Central, Zugriff am Oktober 28, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5918244/>
14. Non-linear Dynamics - Heidelberg University, Zugriff am Oktober 28, 2025, <https://www.thphys.uni-heidelberg.de/~biophys/PDF/Skripte/NonlinearDynamics.pdf>