Spezifikation eines deterministischen zellulären Automaten (Toy Model)

Zusammenfassung

Dieses Toy Model definiert einen streng deterministischen zellulären Automaten, der von physikalischen Konzepten wie Trägheit, Raumbindung und Erhaltungssätzen inspiriert ist. Es übersetzt abstrakte Informationszustände (lokale AND/OR-Gatter) in dynamische Größen, um Bewegung und Zerfall rein durch lokale Interaktionen zu erzeugen. Das übergeordnete Ziel ist die Erforschung, wie aus einem strikt limitierten lokalen Rechenbudget und strengen Erhaltungsregeln makroskopische Strukturen mit physikähnlichen Eigenschaften emergieren können.

Die Kernidee

Das Alleinstellungsmerkmal dieses Modells ist die direkte Verknüpfung von lokaler Rechenleistung, Informationszuständen und simulierter Dynamik. Anstatt klassische physikalische Formeln einfach auf ein Gitter zu legen, folgt dieses Universum Prinzipien einer Ressourcen-Ökonomie:

- **Zeit als lokale Ressource:** Jede Zelle besitzt ein festes Rechenbudget pro Iteration. Sammelt sich an einem Ort zu viel „Dichte“ an und nähert sich dem Sättigungslimit, verlangsamt sich dort die lokale Eigenzeit – bis hin zum Stillstand. Dies erzeugt einen Effekt, der an relativistische Zeitdilatation erinnert, hier jedoch allein aus dem verfügbaren Budget abgeleitet wird.
- **Eiserne Buchhaltung einer invarianten Substanz:** Das System führt eine konservierte Größe („Bilanz“ oder „Substanz“) mit sich, deren Gesamtsumme über alle Zellen bei jedem Tick absolut unverändert bleibt. Selbst wenn Strukturen nach vielen Zyklen instabil werden und zerfallen, wird ihre Substanz lediglich strikt lokal an die Nachbarn umverteilt – es geht nichts verloren.
- **Logik erzeugt physikalische Wirkung:** Ob eine Region im Gitter eine „Spannung“ aufbaut oder als „Masse“ erscheint, hängt maßgeblich davon ab, ob ihr interner Schalter auf AND oder OR steht. Physische Trägheit und Raumbindung sind hier das direkte Resultat lokaler Informationsverarbeitung.

1 Invarianten & Typen

1.1 Parameter-Constraints

- $|N| \geq 1$
- $0 \leq \mu \leq 1$
- $\beta \geq 0$
- $\lambda > 0$
- $\varepsilon > 0$
- $0 \leq B_{\min},\ 0 \leq B_0$
- $0 \leq H_{\text{low}} < H_{\text{high}}$
- $1 \leq K$
- $1 \leq M \leq |N|$
- $0 \leq \chi_{\max}$
- $0 \leq G_\chi$
- $0 \leq \text{Max\_Stability}$

1.2 Domänen der Zustandsvariablen

- $\rho(x) \in [0, \rho_{\max}]$
- $B_{\text{local}}(x) \geq 0$
- $\sigma(x) \in \{\text{OR}, \text{AND}\}$
- $q(x) \in \{-1, 0, +1\}$
- $r_\sigma(x) \in \{0, \ldots, K\}$
- $r_{\sigma,\text{low}}(x) \in \{0, \ldots, K\}$
  (r_σ und $r_{\sigma,low}$ sind getrennte Zähler und werden gemeinsam in π geführt.)
- $\chi(x) \in \{0, \ldots, \chi_{\max}\}$
- $\Delta_{\text{addr}}(x) \in \{0\} \cup N_{\text{step}}(x)$ (die Schrittlänge ist 0, wenn $\Delta_{\text{addr}} = 0$, sonst 1)

1.3 Notation

- $\max_{y \in N(x)}(\cdot)$ und $\arg\max_{y \in N(x)}(\cdot)$ verwenden durchgehend die Tie-Break-Ordnung $\prec_x$.
- Für jedes x existiert eine feste totale Ordnung $\prec_x$ auf $N(x)$. Bei Gleichstand im $\arg\max$ wird das kleinste Element nach $\prec_x$ gewählt.

2 Architektur: Topologie und abgeleitete Größen

Diskretes Gitter: Regelmäßiges Gitter aus Zellen der Größe l_P^3. Jede Zelle C_x speichert den Zustandsvektor Z_x.

Vakuum / Nullzustand: Z_x kann Komponenten mit 0 tragen; von Null verschiedene Zustände entstehen nur durch Initialisierung (Seeds) oder explizite Update-Regeln (kein Zufall).

Sättigungs-Anker: Die Dichte ist nach oben begrenzt: $0 \leq \rho(x) \leq \rho_{\max}$ (nach jedem Update wird ρ in dieses Intervall geklemmt).

Nachbarschaft / Rand: $N(x)$ ist für alle Zellen eine feste, endliche Menge gleicher Größe $|N|$; es wird eine periodische Randbedingung verwendet.

Tie-Break-Ordnung: Für jede Zelle x ist eine totale Ordnung $\prec_x$ auf $N(x)$ fest vorgegeben.

Gefälle-Definition:

$$\mathrm{mean}_N(\rho)(x) := \frac{1}{|N|} \sum_{y \in N(x)} \rho(y), \qquad G(x) := \rho(x) - \mathrm{mean}_N(\rho)(x)$$

Spannungs-Funktion S:

$$L^*(\rho) := \frac{1}{1 - (\rho/\rho_{\max})^2 + \varepsilon}, \quad \varepsilon > 0,$$

$$S(x) := k \cdot G(x)^2 \cdot L^*(\rho(x))$$

Hinweis: σ ändert S nicht; σ wirkt nur über eine Variante S_{map} (siehe Abschnitt 4.2) und über die Aufteilung der Bilanz.

OR/AND-Gatter: $\sigma(x)$ gibt an, ob sich die Zelle im OR- oder AND-Modus befindet.

Träge Masse (abgeleitet): Für ein Objekt (eine zusammenhängende Region) ist

$$M := \sum_{x \in \mathrm{Objekt}} S(x) \cdot l_P^3.$$

Ladung: $q(x) \in \{-1, 0, +1\}$ steuert die lokale Kopplung in der Dynamik.

3 Bilanz-Buchhaltung (Kern)

Bilanz-Definition: Jede Zelle x besitzt einen nichtnegativen Wert $B_{\mathrm{local}}(x)$.

$$B_{\mathrm{total}} := \sum_x B_{\mathrm{local}}(x)$$

Axiom: B_{total} ist unter jedem Tick-Update invariant.

Aufteilung: $B_{\mathrm{bound}}(x)$ und $B_{\mathrm{wave}}(x)$ sind **abgeleitete Größen** (kein persistenter Zustand) und werden bei jedem Tick neu aus $B_{\mathrm{local}}(x)$ und $\sigma(x)$ berechnet:

$$B_{\mathrm{local}}(x) = B_{\mathrm{bound}}(x) + B_{\mathrm{wave}}(x)$$

Bindung (Allokation, nie Erzeugung):

$$D_{\mathrm{bound}}(x) := \begin{cases} S(x) \cdot l_P^3 & \text{falls } \sigma(x) = \mathrm{AND}, \\ 0 & \text{falls } \sigma(x) = \mathrm{OR} \end{cases}$$

$$B_{\mathrm{bound}}(x) := \min\bigl(D_{\mathrm{bound}}(x),\ B_{\mathrm{local}}(x)\bigr), \qquad B_{\mathrm{wave}}(x) := B_{\mathrm{local}}(x) - B_{\mathrm{bound}}(x)$$

4 Dynamik (Φ), Bewegung, π & Zerfall

Hilfsfunktionen:

$$\mathrm{clamp}(a, lo, hi) := \min(\max(a, lo), hi),$$

$$\mathrm{clamp\_int}(n, lo, hi) := \min(\max(n, lo), hi) \quad \text{(für ganzzahlige Argumente)}$$

Zustandsvektor Z_x:

$$Z_x := \{\rho,\ q,\ \pi,\ v_{\text{eff}},\ \sigma,\ B_{\text{local}}\}, \qquad \pi := (r_\sigma,\ r_{\sigma,\text{low}},\ \chi)$$

mit $r_\sigma, r_{\sigma,\text{low}} \in \{0, \dots, K\}$, $\chi \in \{0, \dots, \chi_{\max}\}$.

Update-Reihenfolge pro Tick:

(1) σ-Update $\to$ (2) ρ-Update $\to$ (3) $S(t+1)$
$\to$ (4) Bilanz-Transport $\to$ (5) Partition
$\to$ (6) Bewegungsentscheidung $\to$ (7) χ-Update $\to$ (8) Zerfall.

4.1 σ-Update (Schritt 1)

Schalter: $\text{SIGMA\_MODE} \in \{\text{FROZEN}, \text{DYNAMIC}\}$.

- **FROZEN:**

$$\sigma(t+1, x) := \sigma(t, x), \quad r_\sigma(t+1, x) := r_\sigma(t, x), \quad r_{\sigma,\text{low}}(t+1, x) := r_{\sigma,\text{low}}(t, x)$$

- **DYNAMIC:** Bestimme $\sigma(t+1, x)$ nur aus Größen zum Zeitpunkt t. Berechne $S(t, x)$ aus $\rho(t, \cdot)$ nach Abschnitt 2.

$$H(t, x) := S(t, x) \cdot l_P^3$$

Guards:

$G1$: $B_{\text{local}}(t, x) \geq H_{\text{high}}$
$G2$: $\#\{\, y \in N(x) : H(t, y) \geq H_{\text{high}} \,\} \geq M$

Gedächtnis-Update:

$$r_\sigma(t+1, x) := \begin{cases} \min(r_\sigma(t, x) + 1,\ K) & \text{falls } (H(t, x) \geq H_{\text{high}}) \wedge G1 \wedge G2, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$r_{\sigma,\text{low}}(t+1, x) := \begin{cases} \min(r_{\sigma,\text{low}}(t, x) + 1,\ K) & \text{falls } H(t, x) \leq H_{\text{low}}, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Erweiterte Schaltregel mit Hysterese:

- Wenn $\sigma(t, x) = \text{OR}$ und $r_\sigma(t+1, x) = K$:

$$\sigma(t+1, x) := \text{AND}; \quad r_{\sigma,\text{low}}(t+1, x) := 0$$

- Sonst wenn $\sigma(t, x) = \text{AND}$ und $r_{\sigma,\text{low}}(t+1, x) = K$:

$$\sigma(t+1, x) := \text{OR}; \quad r_\sigma(t+1, x) := 0$$

- Sonst: $\sigma(t+1, x) := \sigma(t, x)$.

4.2 ρ-Update (Schritt 2)

$$D(\rho)(t,x) := \beta\big(\mathrm{mean}_N(\rho)(t,x) - \rho(t,x)\big), \quad \beta \ge 0$$

$$\mathrm{mean}_N(q\cdot\rho)(t,x) := \frac{1}{|N|}\sum_{y\in N(x)} \big(q(t,y)\,\rho(t,y)\big)$$

$$C(\rho,q)(t,x) := \alpha\, q(t,x)\ \mathrm{mean}_N(q\cdot\rho)(t,x)$$

$$\rho(t+1,x) := \mathrm{clamp}\big(\rho(t,x) + D(\rho)(t,x) + C(\rho,q)(t,x),\ 0,\ \rho_{\max}\big)$$

q-Update (Schalter):

$$\text{Q\_MODE} \in \{\text{FROZEN}\} \quad \text{(weitere Modi optional).}$$

Bei FROZEN: $q(t+1,x) := q(t,x)$.

4.3 S berechnen + Mapping-Variante (Schritt 3)

Berechne $S(t+1,x)$ aus $\rho(t+1,\cdot)$ gemäß Abschnitt 2.
Für die Verwendung in der Bewegungsregel definieren wir:

$$S_{\mathrm{map}}(t+1,x) := \begin{cases} 0 & \text{falls } \sigma(t+1,x) = \text{OR}, \\ S(t+1,x) & \text{falls } \sigma(t+1,x) = \text{AND} \end{cases}$$

Hinweis: Alle anderen Definitionen von S bleiben unverändert; σ wirkt nur über S_{map} und über D_{bound} in der Partition.

4.4 Bilanz-Transport (Schritt 4) – konservativ, lokal, nichtnegativ

Transportiert wird ausschließlich B_{local}. Die Flüsse basieren auf den Werten zum Zeitpunkt t.

Für jede gerichtete Nachbarschaftskante $(x \to y)$ mit $y \in N(x)$:

$$F_{x\to y}(t) := \mu\,\frac{\max\big(B_{\mathrm{local}}(t,x) - B_{\mathrm{local}}(t,y),\,0\big)}{|N|}, \qquad 0 \le \mu \le 1$$

Begrenzung des Abflusses:

$$\mathrm{Out}(t,x) := \sum_{y\in N(x)} F_{x\to y}(t)$$

Falls $\mathrm{Out}(t,x) > B_{\mathrm{local}}(t,x)$, skaliere alle $F_{x\to y}(t)$ dieser Zelle mit dem Faktor $B_{\mathrm{local}}(t,x)/\,\mathrm{Out}(t,x)$.

Update:

$$B_{\mathrm{local}}(t+1,x) := B_{\mathrm{local}}(t,x) + \sum_{y\in N(x)} F_{y\to x}(t) - \sum_{y\in N(x)} F_{x\to y}(t)$$

Damit gilt exakt: $\sum_x B_{\mathrm{local}}(t+1,x) = \sum_x B_{\mathrm{local}}(t,x)$ und $B_{\mathrm{local}} \ge 0$.

4.5 Partition (Schritt 5) – allokativ, nach dem Transport

$$D_{\text{bound}}(t+1,x) := \begin{cases} S(t+1,x)\cdot l_P^3 & \text{falls } \sigma(t+1,x)=\text{AND},\\ 0 & \text{falls } \sigma(t+1,x)=\text{OR} \end{cases}$$

$$B_{\text{bound}}(t+1,x) := \min\bigl(D_{\text{bound}}(t+1,x),\ B_{\text{local}}(t+1,x)\bigr)$$

$$B_{\text{wave}}(t+1,x) := B_{\text{local}}(t+1,x) - B_{\text{bound}}(t+1,x)$$

(B_{bound}, B_{wave} bleiben abgeleitet, kein Zustand.)

4.6 Bewegungsentscheidung (Δ_{addr}) und v_{eff} (Schritt 6)

Definition: $N_{\text{step}}(x) = N(x)$; $\Delta_{\text{addr}}(x) \in \{0\} \cup N_{\text{step}}(x)$ (die Schrittweite ist 0 oder 1).

Ermittlung des Zielvektors:

$$\text{Wenn } \sigma(t+1,x) = \text{AND}:$$

$$\text{dest}_{\text{raw}}(x) := \arg\max_{y\in N(x)} \bigl(S(t+1,x) - S(t+1,y)\bigr) \quad (\text{mit Tie-Break } \prec_x)$$

$$\Delta^{\text{raw}}_{\text{addr}}(x) := \text{Schritt } x \to \text{dest}_{\text{raw}}(x)$$

Wenn $\sigma(t+1,x) = \text{OR}$: $\Delta^{\text{raw}}_{\text{addr}}(x) := 0$.

Budgetfilter:

$$\Gamma_{\text{grid}}(t+1,x) := \Gamma_{\max}\left(\frac{\rho(t+1,x)}{\rho_{\max}}\right)^2$$

$$\Gamma^{\text{raw}}_{\text{trans}}(x) := \lambda\,|\Delta^{\text{raw}}_{\text{addr}}(x)|$$

Falls $\Gamma^{\text{raw}}_{\text{trans}}(x) > \Gamma_{\max} - \Gamma_{\text{grid}}(t+1,x)$, setze $\Delta_{\text{addr}}(x) := 0$, sonst $\Delta_{\text{addr}}(x) := \Delta^{\text{raw}}_{\text{addr}}(x)$.

$$v_{\text{eff}}(t+1,x) := \Delta_{\text{addr}}(x) \quad (\text{dient als Bewegungsvektor für externe Auswertungen})$$

4.7 χ-Update (Komplexität) (Schritt 7)

$$I_{\text{flip}}(x) := \begin{cases} 1 & \text{falls } \sigma(t+1,x) \neq \sigma(t,x),\\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$I_{\text{move}}(x) := \begin{cases} 1 & \text{falls } |\Delta_{\text{addr}}(x)| = 1,\\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$I_{\text{grad}}(x) := \begin{cases} 1 & \text{falls } \max\limits_{y\in N(x)} |\rho(t+1,x) - \rho(t+1,y)| \geq G_\chi,\\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\chi(t+1,x) := \text{clamp\_int}\bigl(\chi(t,x) + I_{\text{flip}}(x) + I_{\text{move}}(x) + I_{\text{grad}}(x),\ 0,\ \chi_{\max}\bigr)$$

$$\pi(t+1,x) := \bigl(r_\sigma(t+1,x),\ r_{\sigma,\text{low}}(t+1,x),\ \chi(t+1,x)\bigr)$$

$$\text{Cycle\_Length}(\pi(x)) := \chi(t+1,x) + 1$$

4.8 Zerfall (Schritt 8) – Trigger + lokale Umverteilung

Falls Cycle_Length($\pi(x)$) > Max_Stability, dann:

$$\chi(t+1,x) := 0, \qquad \pi(t+1,x) := \big(r_\sigma(t+1,x),\ r_{\sigma,\text{low}}(t+1,x),\ 0\big)$$

Lokale Bilanz-Umverteilung (nichtnegativ, erhaltend):

$$\Delta_{\text{raw}} := B_{\text{local}}(t+1,x) - B_{\min}, \qquad \Delta := \max(\Delta_{\text{raw}}, 0)$$

$$B_{\text{local}}(t+1,x) := B_{\text{local}}(t+1,x) - \Delta$$

Für jedes $y \in N(x)$:

$$B_{\text{local}}(t+1,y) := B_{\text{local}}(t+1,y) + \frac{\Delta}{|N|}$$

Die Gesamtsumme bleibt invariant, und alle B_{local} bleiben nichtnegativ.

5 Budget & Eigenzeit

Tick: Ein Iterationsschritt.
$\Gamma_{\max}$: Festes Rechenbudget pro Zelle und Tick.

$$\Gamma_{\text{grid}}(\rho) := \Gamma_{\max} \left(\frac{\rho}{\rho_{\max}}\right)^2$$

$$\Gamma_{\text{trans}}(t+1,x) := \lambda\,|\Delta_{\text{addr}}(x)|, \quad \text{es gilt } \Gamma_{\text{trans}}(t+1,x) \le \Gamma_{\max} - \Gamma_{\text{grid}}(t+1,x)$$

(erzwungen durch Schritt 4.6).

$$\Gamma_{\text{int}}(t+1,x) := \Gamma_{\max} - \Gamma_{\text{grid}}(t+1,x) - \Gamma_{\text{trans}}(t+1,x) \quad (\ge 0)$$

Eigenzeit:

$$\Delta\tau(t+1,x) := \frac{\Gamma_{\text{int}}(t+1,x)}{\Gamma_{\max}}$$

Konsequenz: $\rho \to \rho_{\max} \Rightarrow \Delta\tau \to 0$.

6 Measurement Map (abgeleitete Größen)

Träge Masse eines Objekts:

$$m := \sum_{x \in \text{Objekt}} S(x) \cdot l_P^3$$

Drift-/Kraftfeld (für Analysezwecke):

$$F_{\text{dir}}(x) := \arg\max_{y \in N(x)} \big(S(x) - S(y)\big) \quad (\text{mit Tie-Break } \prec_x),$$

$$F_{\text{mag}}(x) := \max_{y \in N(x)} \big(S(x) - S(y)\big)$$

7 Prüfpunkte (Falsifizierbare Eigenschaften)

P1 Determinismus: Gleicher Anfangszustand (inklusive aller Zufallsfreiheiten ausgeschlossen) führt zu identischem Verlauf.

P2 Bilanz: $\sum_x B_{\text{local}}(t+1,x) = \sum_x B_{\text{local}}(t,x)$ für alle t.

P3 Zeit/Budget: Bei festem Δ_{addr} gilt: je höher ρ, desto kleiner $\Delta\tau$ (monoton).

P4 Saturationslimit: Zustände mit $\rho \approx \rho_{\max}$ und $\Delta\tau$ nicht nahe 0 sind ausgeschlossen (Widerspruch zu Abschnitt 5).

P5 σ-Dynamik (SIGMA_MODE = DYNAMIC): OR $\to$ AND nur nach K Ticks mit $H \geq H_{\text{high}}$, $B_{\text{local}} \geq H_{\text{high}}$ und Kohärenz $\geq M$; AND $\to$ OR nur nach K Ticks mit $H \leq H_{\text{low}}$.

P6 Zerfall: Falls $\chi + 1 >$ Max_Stability, wird χ auf 0 gesetzt und die Bilanz lokal umverteilt (Summe invariant).

8 Parameterübersicht

Gruppe	**Parameter**	**Bedeutung**
Gitter & Skalen	l_P	Längeneinheit einer Zelle
	c	Referenzgeschwindigkeit (für spätere Erweiterungen)
	$\rho_{\max}$	Maximale Dichte einer Zelle
	$\Gamma_{\max}$	Maximales Rechenbudget pro Zelle und Tick
Dynamik-Koeffizienten	k	Skalierungsfaktor der Spannungsfunktion S
	α	Kopplungsstärke der Ladungswechselwirkung
	β	Diffusionskonstante (Dichte-Angleichung)
	λ	Kostenfaktor für Bewegung (Γ_{trans})
	ε	Kleiner Glättungsparameter in L^* (verhindert Division durch Null)
	μ	Flussrate beim Bilanz-Transport
σ-Dynamik	SIGMA_MODE	$\{\text{FROZEN}, \text{DYNAMIC}\}$ – legt fest, ob Gatter schalten
	H_{low}, H_{high}	Schwellwerte für den Hysterese-Schalter ($H = S \cdot l_P^3$)
	K	Gedächtnislänge für Schaltbedingungen
	M	Erforderliche Nachbarschafts-Kohärenz für AND-Übergang
Ladung	Q_MODE	$\{\text{FROZEN}, \dots\}$ – Modus für das q-Update
Bilanz & Zerfall	B_0	Initiale Bilanz pro Zelle (Default)
	$B_{\min}$	Untergrenze für Bilanz nach Zerfall (Rest wird umverteilt)
	Max_Stability	Maximal erlaubte Zyklenlänge ($\chi + 1$) vor Zerfall
	$\chi_{\max}$	Maximaler Wert des Komplexitätszählers
	G_χ	Schwellwert für Gradienten-Indikator I_{grad}
Tie-Break	$\prec_x$	Feste totale Ordnung auf der Nachbarschaft jeder Zelle x (Modellbestandteil)

9 Initialisierung

Init-Parameter: Gridgröße $|X|$, periodischer Rand, Boot-Parameter (siehe Abschnitt 8), optionale Seed-Liste.

Default-Initialzustand (ohne Seeds) für alle x:

$$\rho(0,x) := 0, \quad q(0,x) := 0, \quad \sigma(0,x) := \mathrm{OR}, \quad B_{\mathrm{local}}(0,x) := B_0, \quad v_{\mathrm{eff}}(0,x) := 0$$

$$\pi(0,x) := (r_\sigma = 0,\ r_{\sigma,\mathrm{low}} = 0,\ \chi = 0)$$

Damit ist $B_{\mathrm{total}} := |X| \cdot B_0$ festgelegt.

Seed-Regel (optional): Für jede Seed-Zelle x werden die angegebenen Komponenten überschrieben; nicht angegebene Komponenten bleiben im Default. Die Summe aller gesetzten $B_{\mathrm{local}}(0,x)$ definiert B_{total} und bleibt im weiteren Verlauf invariant.

10 Verwandte Arbeiten

Das vorgestellte Modell steht in der Tradition zellulärer Automaten zur Untersuchung emergenter Phänomene. Es unterscheidet sich durch die enge Kopplung von logischen Gattern mit einer invarianten Erhaltungsgröße und einem lokalen Rechenbudget.

- **Klassische zelluläre Automaten** wie Conways *Game of Life* [Gardner 1970] oder Wolframs elementare Regeln [Wolfram 2002] demonstrieren, wie komplexe Strukturen aus einfachen, deterministischen Regeln entstehen können.
- **Physikalisch inspirierte CA** wie *Lenia* [Chan 2019] oder Gittergas-Automaten [Frisch, Hasslacher, Pomeau 1986] erzeugen wellenartige oder fluiddynamische Muster, nutzen aber meist keine diskreten logischen Zustände.
- **Modelle mit Erhaltungsgrößen** (z. B. „Number-Conserving CA“) sind bekannt; die hier eingeführte Bilanz B_{total} ist jedoch keine Teilchenzahl, sondern eine kontinuierliche Größe, deren Aufteilung in gebundene und freie Anteile durch den σ-Zustand gesteuert wird.
- **Digitale Physik** (Zuse 1967, Fredkin 1990) betrachtet das Universum als Rechenprozess; unser Modell konkretisiert diesen Gedanken durch ein streng limitiertes Budget pro Zelle, das direkt die lokale Eigenzeit beeinflusst.

Die Kombination aus logikgesteuerter Massenallokation, ressourcenabhängiger Zeit und deterministischer Hysterese macht das Modell zu einem neuartigen Werkzeug für die Untersuchung informationsbasierter Physik.

11 Ausblick

Die vorliegende Spezifikation bildet die Grundlage für eine prototypische Implementierung. Erste Simulationsläufe sollen zeigen, ob und unter welchen Parameterbereichen stabile, bewegliche Strukturen („Teilchen“) entstehen, die als emergente Objekte interpretiert werden können. Geplant ist ferner die Untersuchung von Phasenübergängen in Abhängigkeit von μ, β und der Schwellwerte $H_{\mathrm{low}}/H_{\mathrm{high}}$.

12 Literatur

Literatur

[1] Chan, B. W.-C. (2019). Lenia: Biology of Artificial Life. *Complex Systems*, 28(3), 251–286. `https://doi.org/10.25088/ComplexSystems.28.3.251`

[2] Fredkin, E. (1990). Digital Mechanics. *Physica D*, 45(1–3), 254–270. `https://doi.org/10.1016/0167-2789(90)90117-S`

[3] Frisch, U., Hasslacher, B., & Pomeau, Y. (1986). Lattice-Gas Automata for the Navier-Stokes Equation. *Physical Review Letters*, 56(14), 1505–1508.

[4] Gardner, M. (1970). The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "Life". *Scientific American*, 223(4), 120–123.

[5] Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Wolfram Media.

[6] Zuse, K. (1967). Rechnender Raum. *Elektronische Datenverarbeitung*, 8, 336–344. (Auch als Buch: Vieweg+Teubner, 1969)