

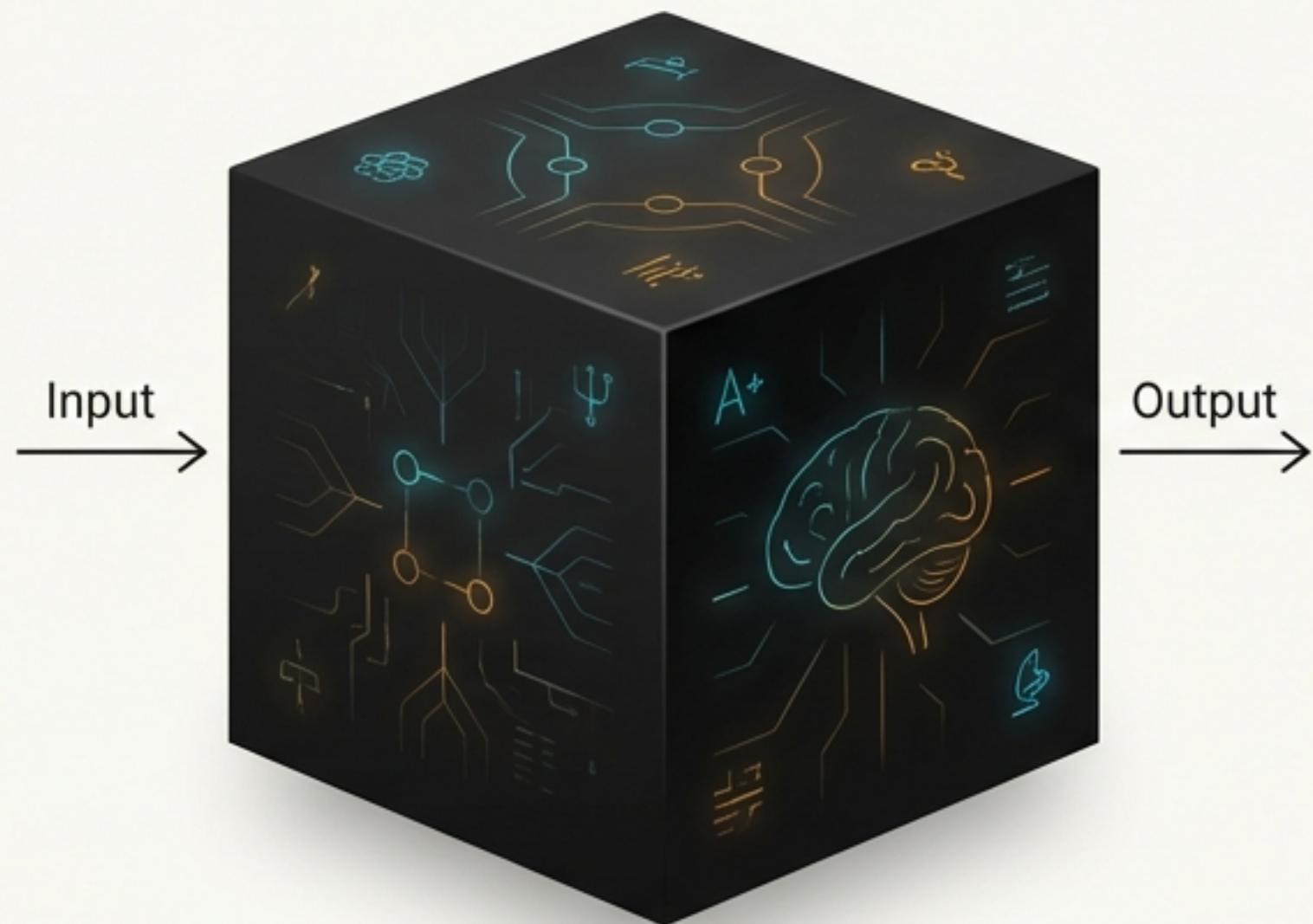
Micro-Swarm

Emergenz aus lokalen Regeln und mehrschichtigem Gedächtnis.
Ein biologisch inspiriertes Artificial-Life-System.

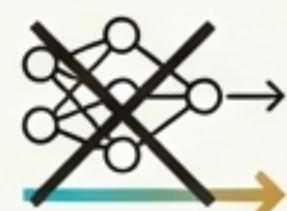
Jenseits von Backpropagation

Wie entsteht globale, intelligente Koordination aus rein lokalen Interaktionen und Gedächtnis?

Black Box: Neuronales Netz

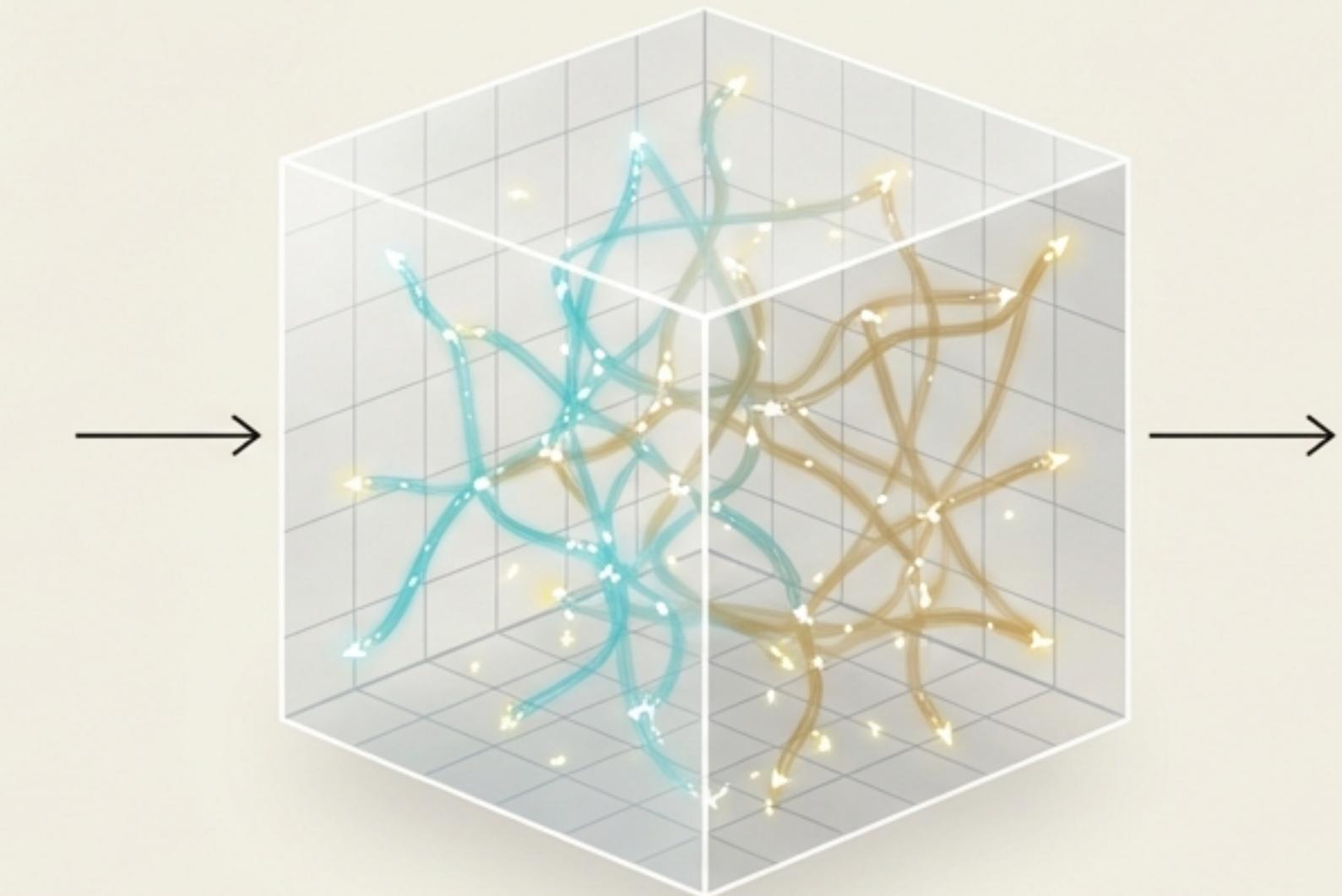


- Ohne zentrale Steuerung oder globale Sicht.



- Ohne neuronale Netze und Gradientenabstieg.

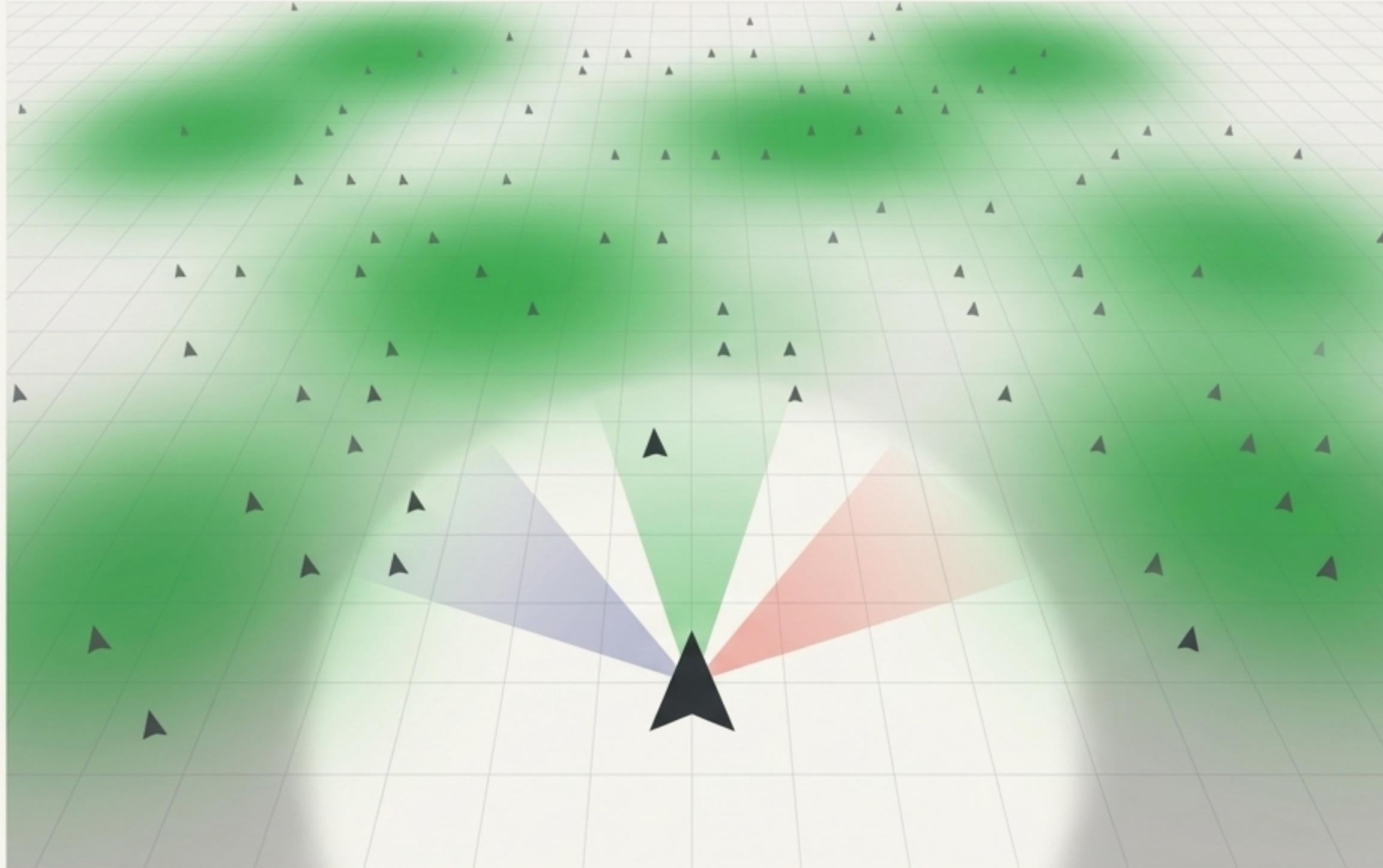
Glass Box: Micro-Swarm



- Ohne explizite Optimierungsziele (Reinforcement Learning).

Das Kollektiv: Lokale Akteure, globale Wirkung

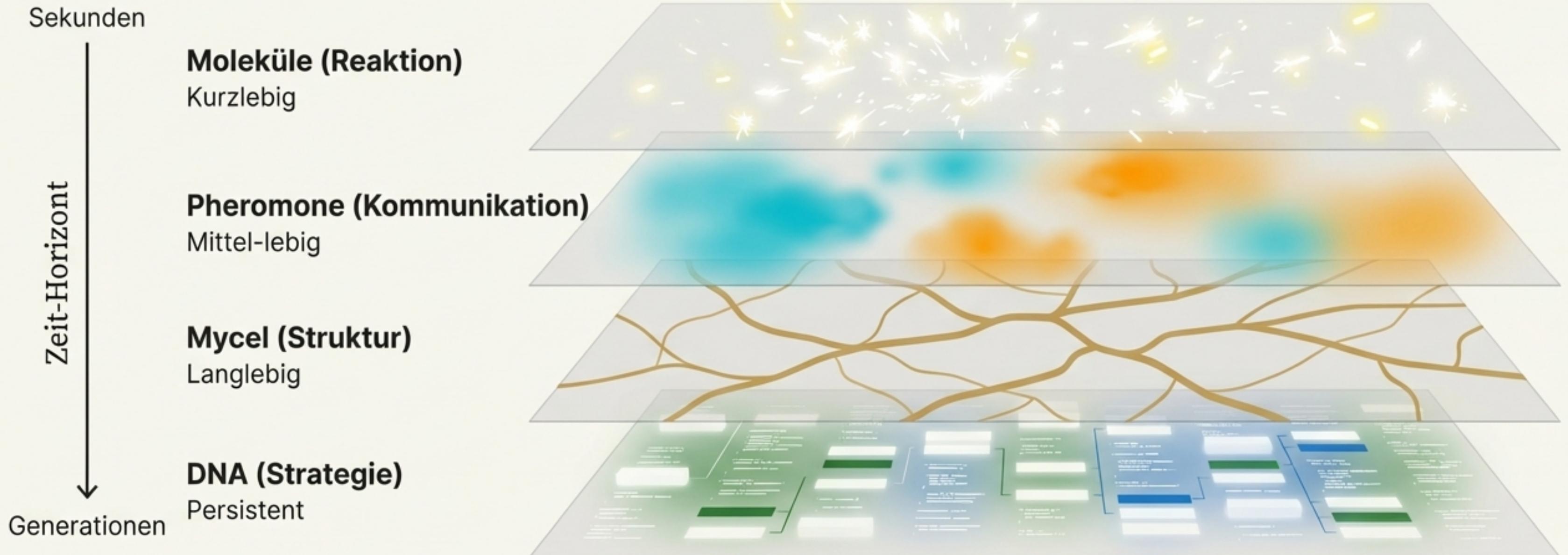
Tausende von Agenten agieren ausschließlich auf Basis ihrer direkten, lokalen Umgebung.



- Jeder Agent besitzt nur lokale Sensoren (links, vorne, rechts).
- Interner Zustand: Energie, Genom (Strategie-Parameter).
- Keine globale Sicht, keine Kenntnis des Gesamtsystems.

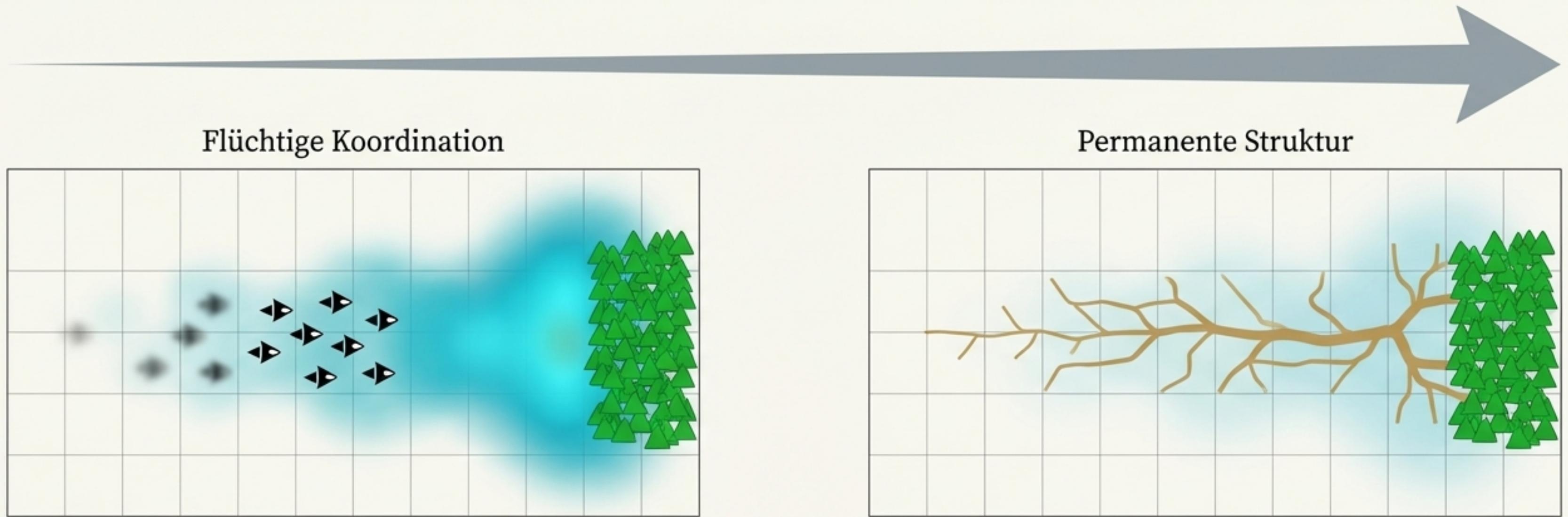
Ein Gedächtnis mit vier Zeithorizonten

Emergenz erfordert die Überlagerung von Informationsspuren mit unterschiedlicher Lebensdauer – von der flüchtigen Reaktion bis zur persistenten Strategie.



Stigmergie & Strukturbildung

Pheromone sind flüchtige Wegweiser. Mycel ist das bleibende Gedächtnis der kollektiven Erfahrung.

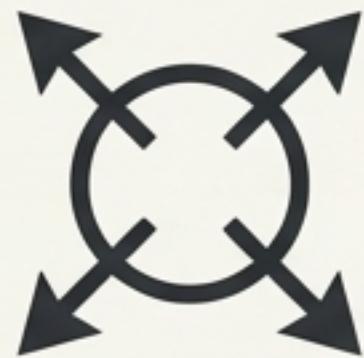


- **Pheromone (Mittelzeit-Gedächtnis):** Diffusiv und verdampfend.
- Signalisieren "Nahrung gefunden" oder "Gefahr".
- Dienen der schnellen, agilen Koordination.

- **Mycel (Langzeit-Gedächtnis):** Wächst langsam an Orten anhaltender Agenten-Aktivität.
- Stabilisiert und verstärkt erfolgreiche Pfade.
- Verfällt nur sehr langsam.

Arbeitsteilung durch Spezialisierung

Vier Spezies erfüllen unterschiedliche, komplementäre Intelligenzfunktionen im Schwarm.



Explorator (Neugier)

Eigenschaften: Hoher Exploration-Bias, geringe Pheromon-Bindung, sucht neue Gradienten.



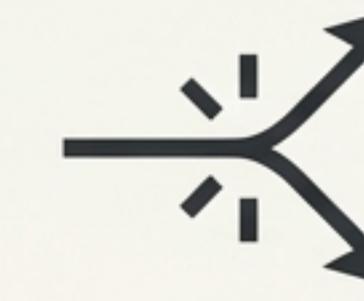
Regulator (Stabilität)

Eigenschaften: Hohe Sensitivität für "Gefahr"-Pheromone, meidet Überdichte, sorgt für negatives Feedback.



Integrator (Strukturaufbau)

Eigenschaften: Hohe Gewichtung bestehender Pfade (Pheromon/Mycel), stabilisiert und verstärkt Routen.

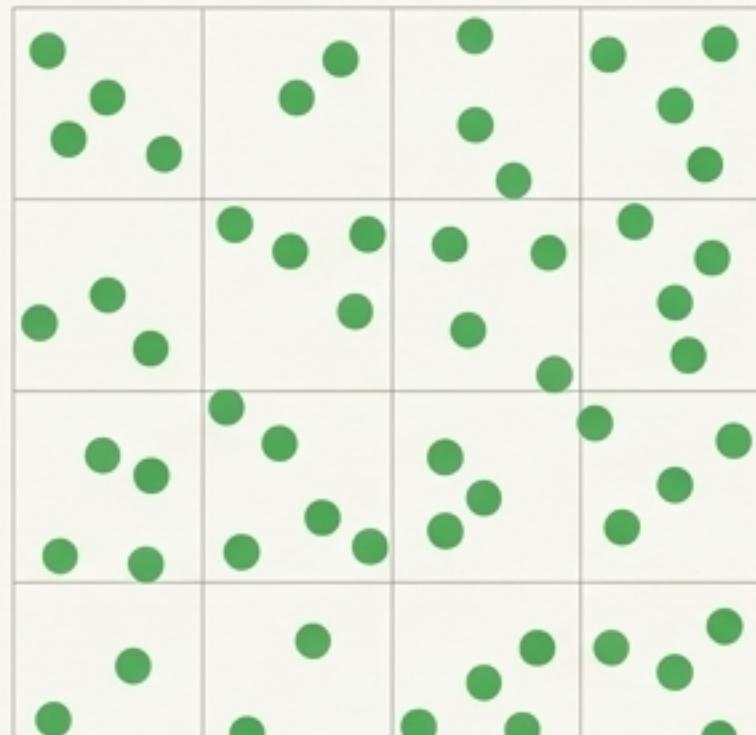


Innovator (Variation)

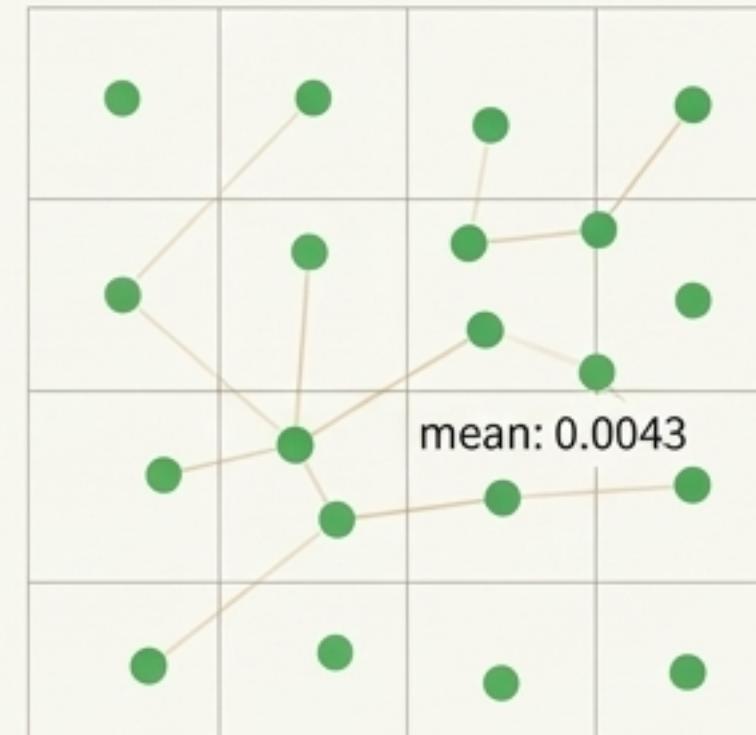
Eigenschaften: Erhöhte Mutationsrate, sucht gezielt Regionen hoher Entropie auf.

Baseline: Vom Chaos zur Struktur

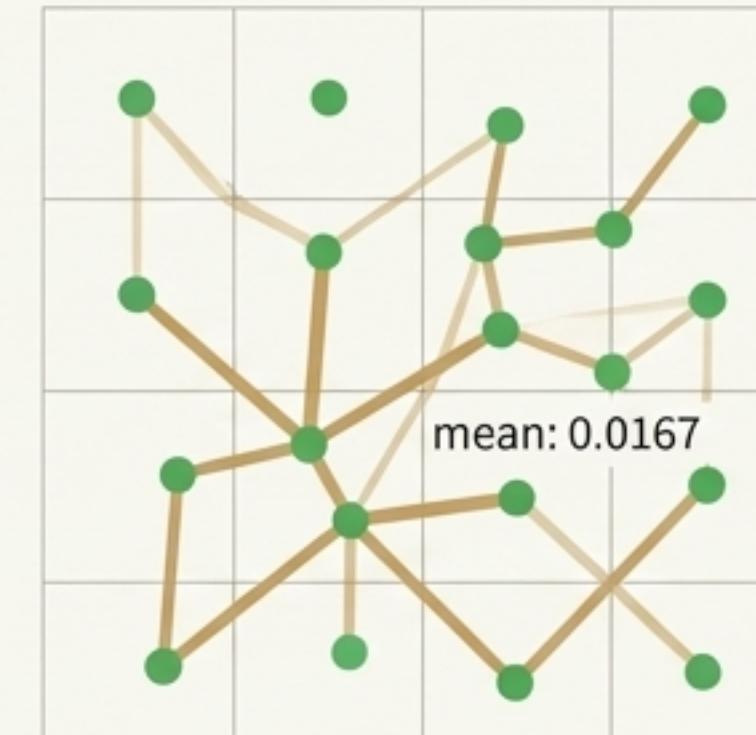
Ohne äußere Eingriffe formt der Schwarm aus einer zufälligen Verteilung ein effizientes Versorgungsnetzwerk.



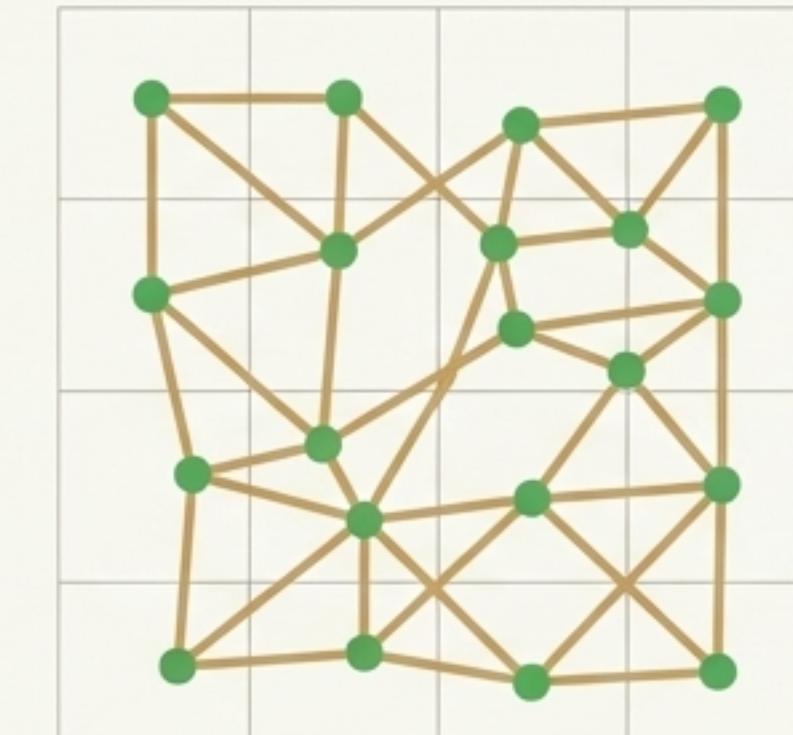
Step 0



Step 50



Step 200



Step 450

Entwicklung von `mycel mean`

Start (Step 0): 0.0000

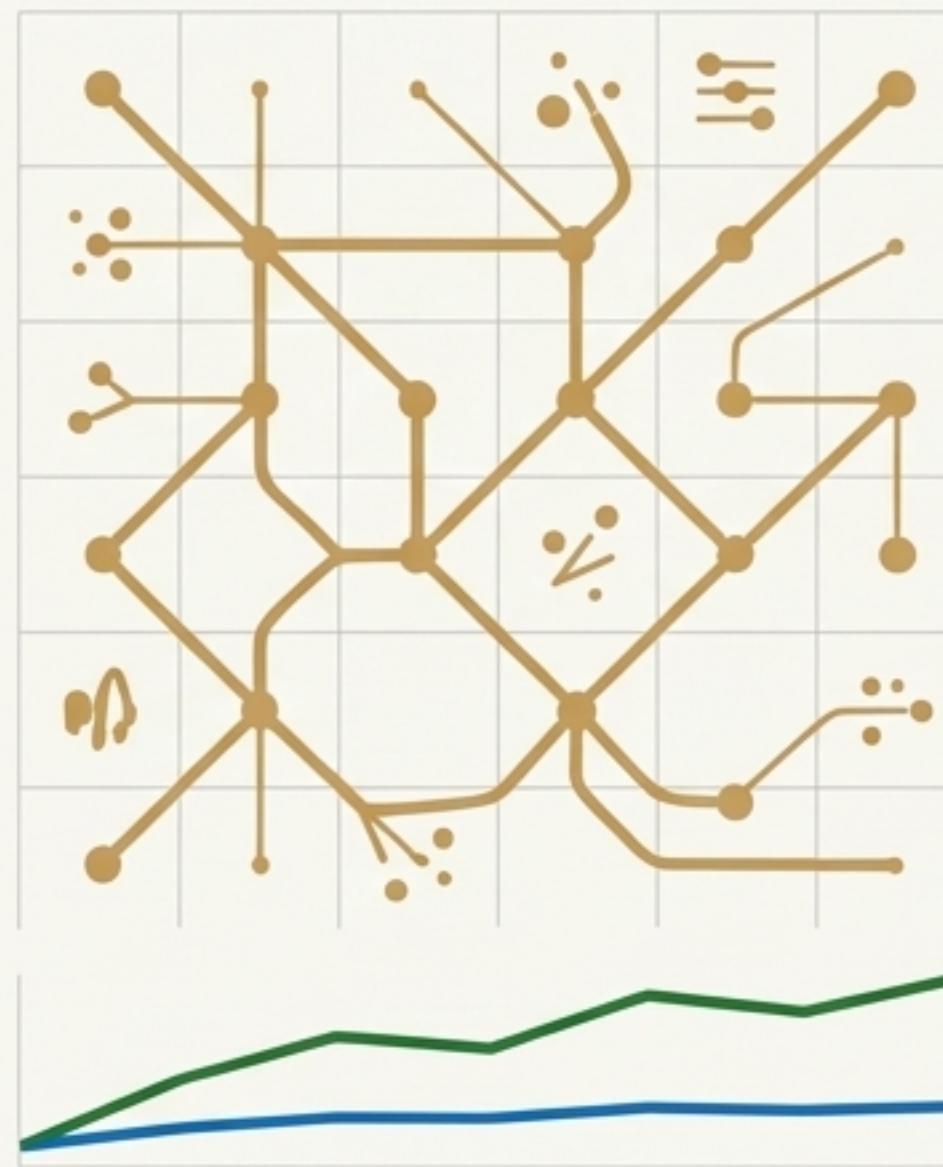
`mycel nonzero_ratio` steigt von 0.0 auf 1.0.

Ende (Step 450): 0.0831

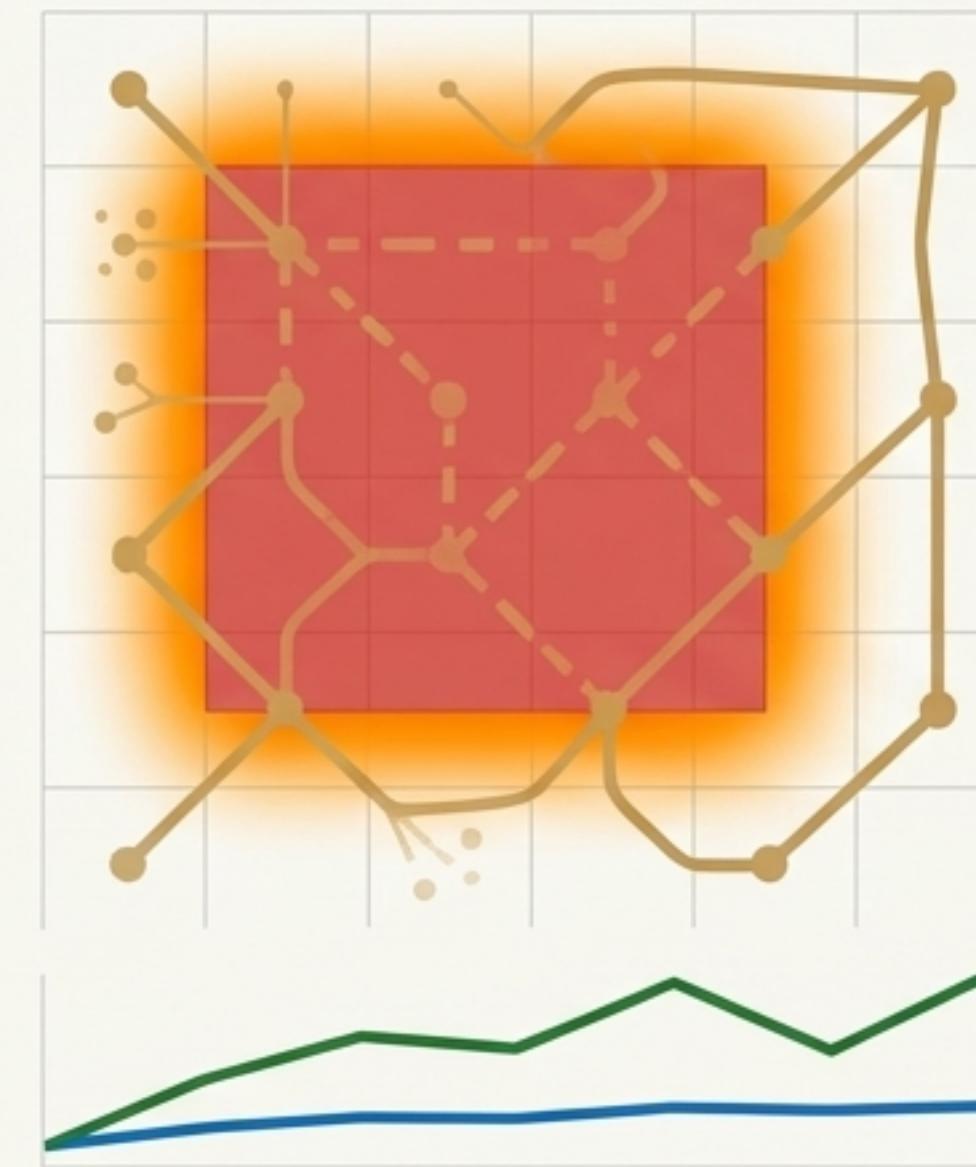
Stress-Test: Resilienz durch Umlernen

Das System reagiert auf eine plötzliche Störung (ab Step 120), indem es bestehende Pfade aufgibt und neue, effiziente Routen findet.

Stabiles Netzwerk ($t=100$)



Reorganisation nach Störung ($t>120$)

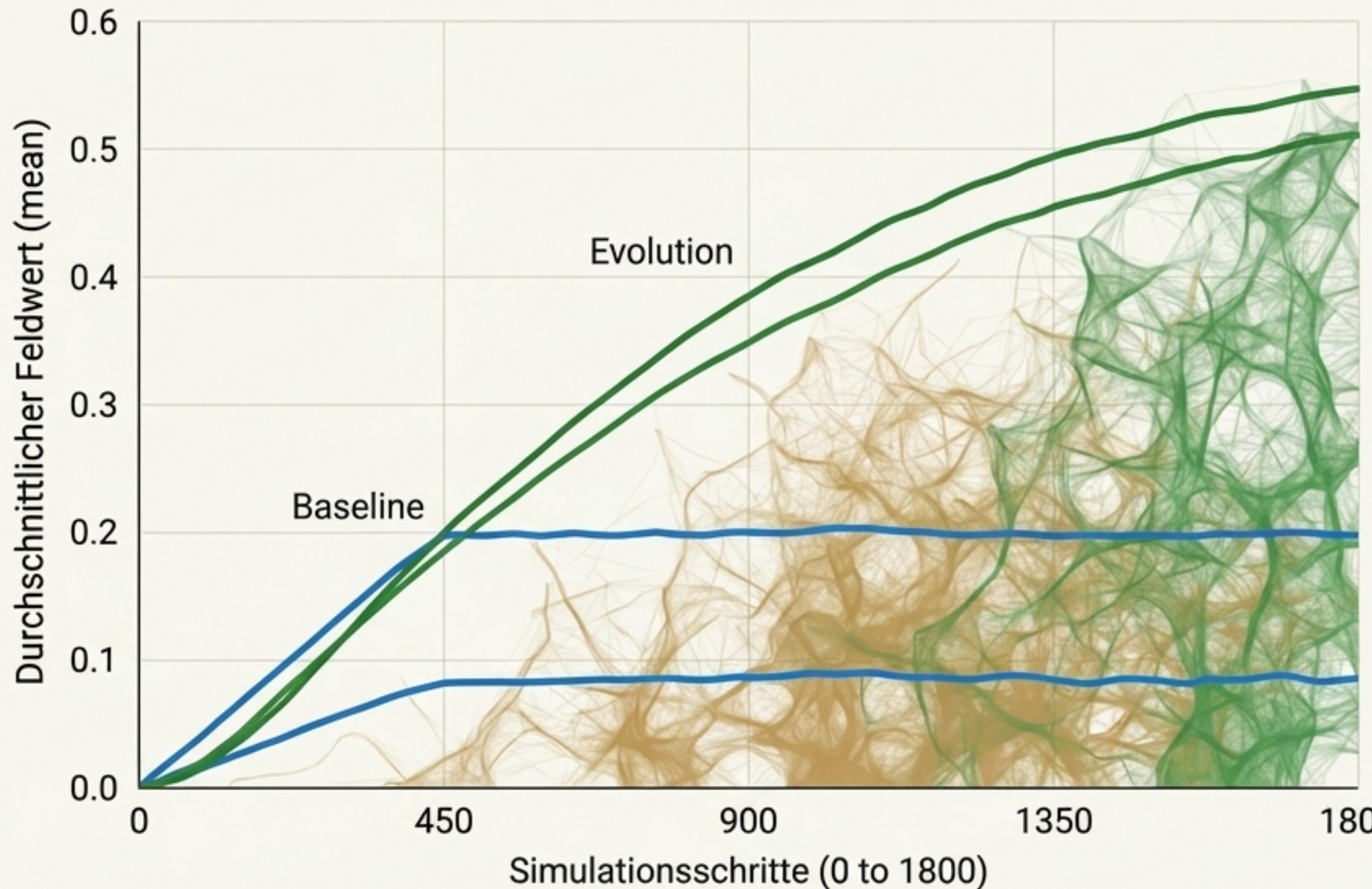


↗ Reaktion: 'phero_danger'



Evolution: Bessere Strategien durch Selektion

Durch gezielte Selektion erfolgreicher Genome (DNA) verfeinert der Schwarm seine Sammelstrategien und steigert seine Effizienz dramatisch.



Vergleich der Endwerte:

'mycel mean'
Baseline (450 Steps): **0.0831**
Evolution (1800 Steps): **0.5126**

'resources mean'
Baseline (450 Steps): **0.1992**
Evolution (1800 Steps): **0.5473**

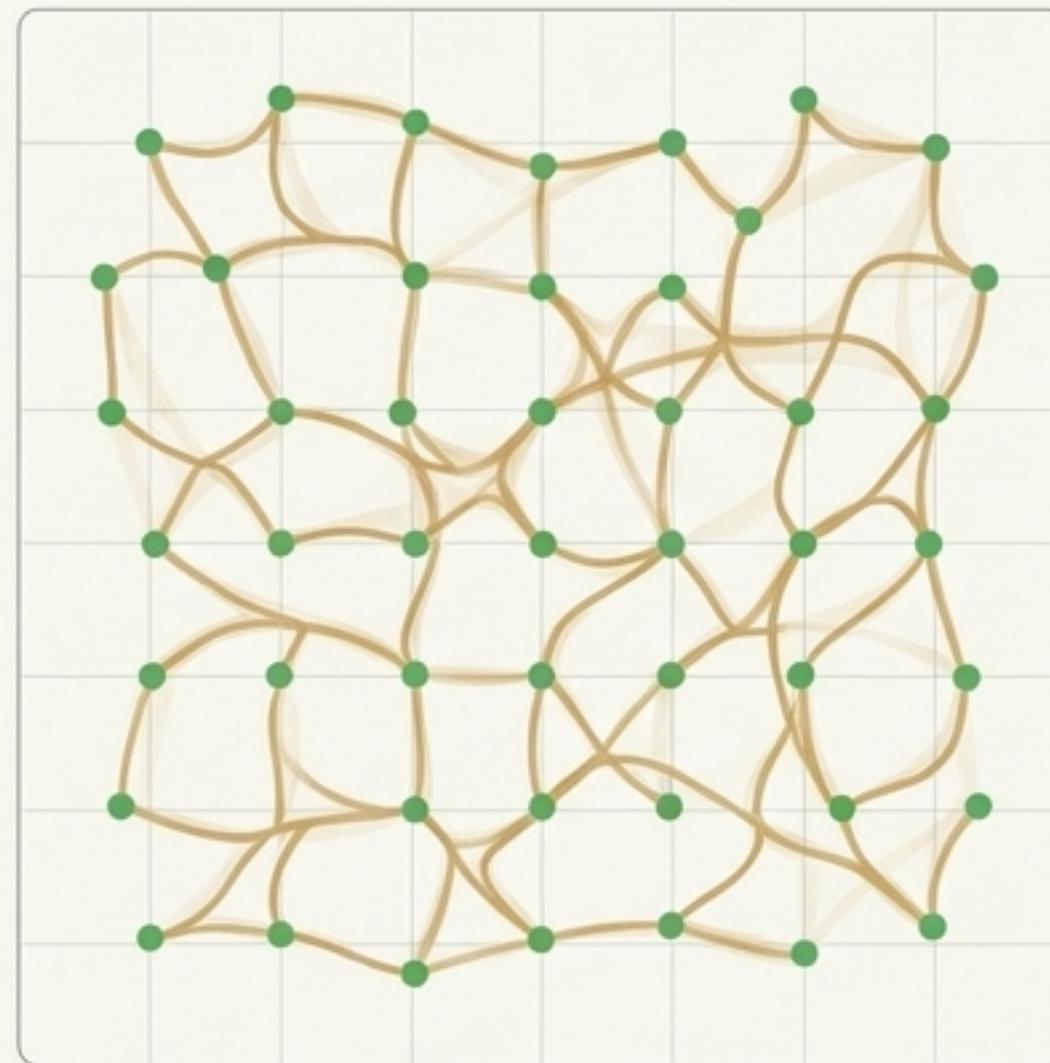
'dna_global_size' (Evolution)



Der Pool erfolgreicher Genome wächst und stabilisiert sich.

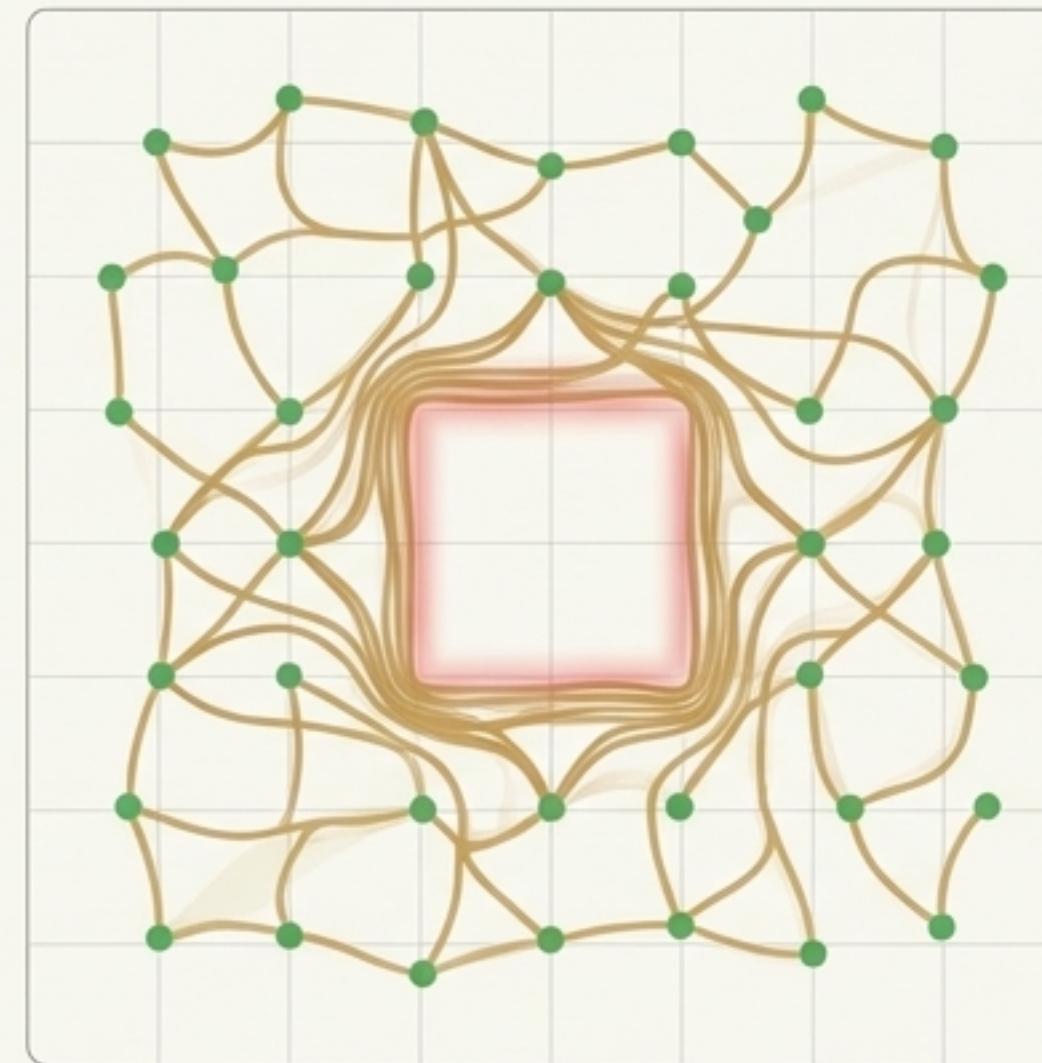
Emergenz, Adaption, Evolution

Kernaussage: Micro-Swarm ist ein Labor zur Untersuchung der fundamentalen Prozesse von Selbstorganisation, Anpassungsfähigkeit und strategischem Lernen.



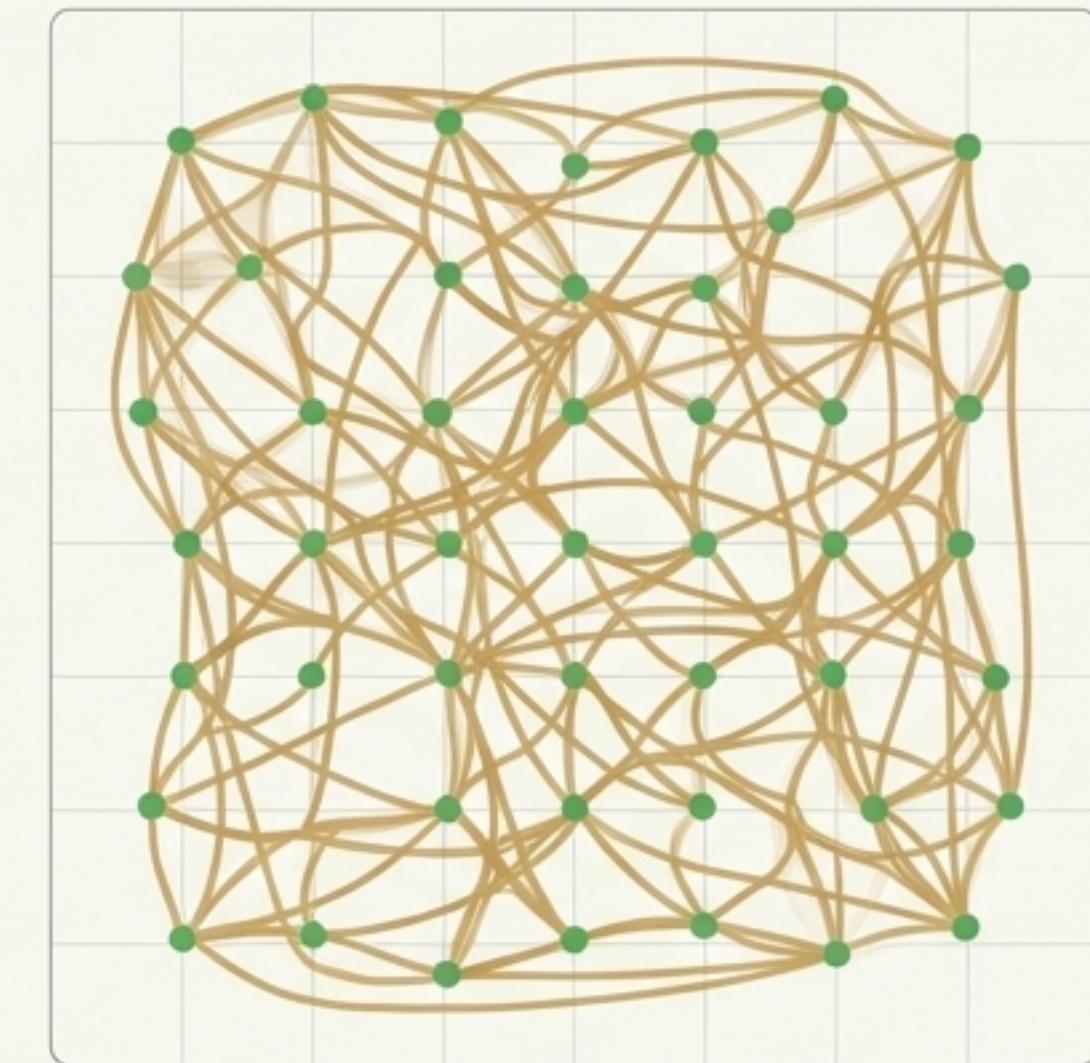
Ordnung

Final state of Baseline run, step 450



Anpassung

Final state of Stress-Test (step 450)

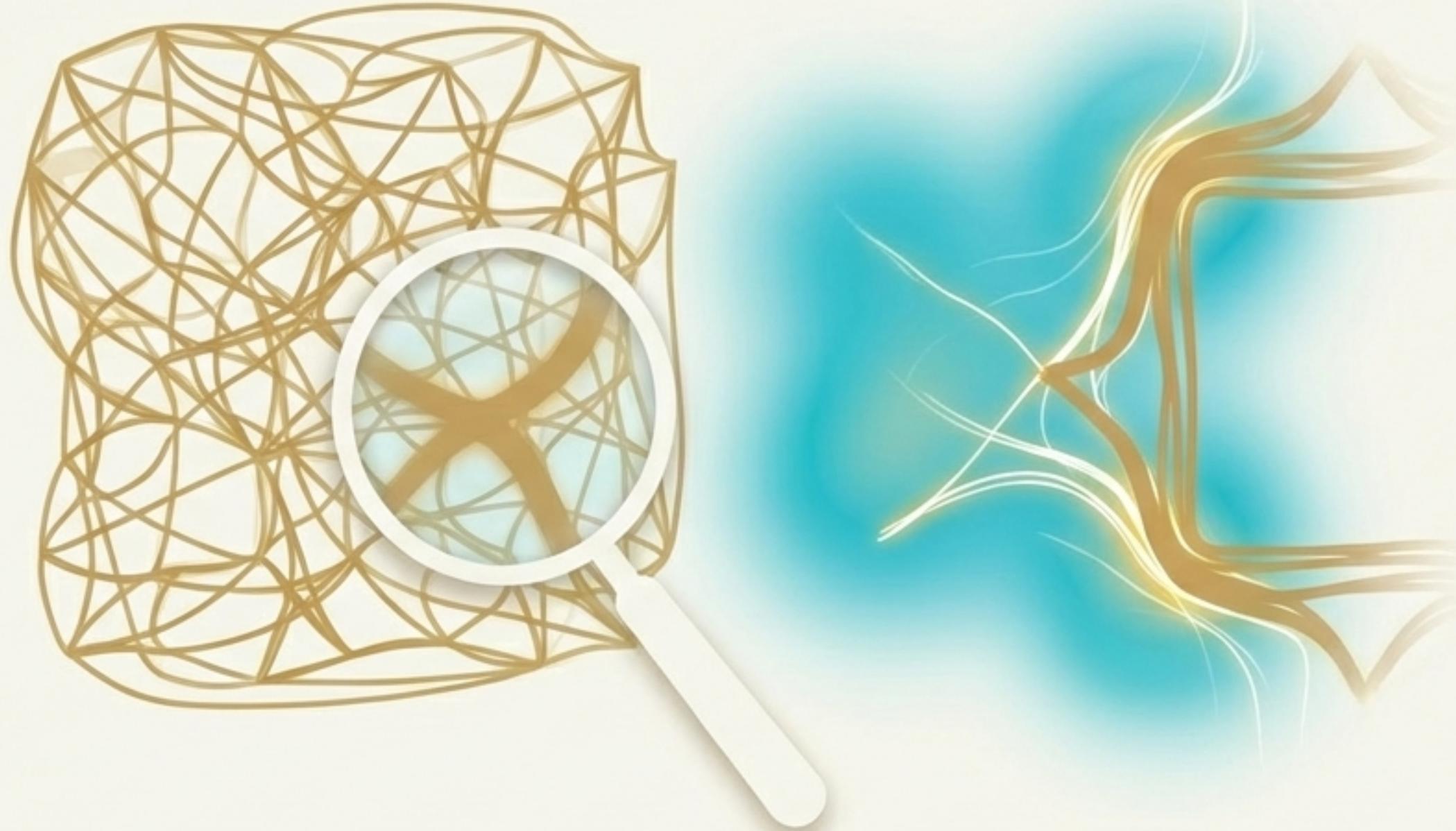


Optimierung

Final state of Evolution (step 450)

Die 'Glass Box': Jeder Effekt ist kausal erklärbar

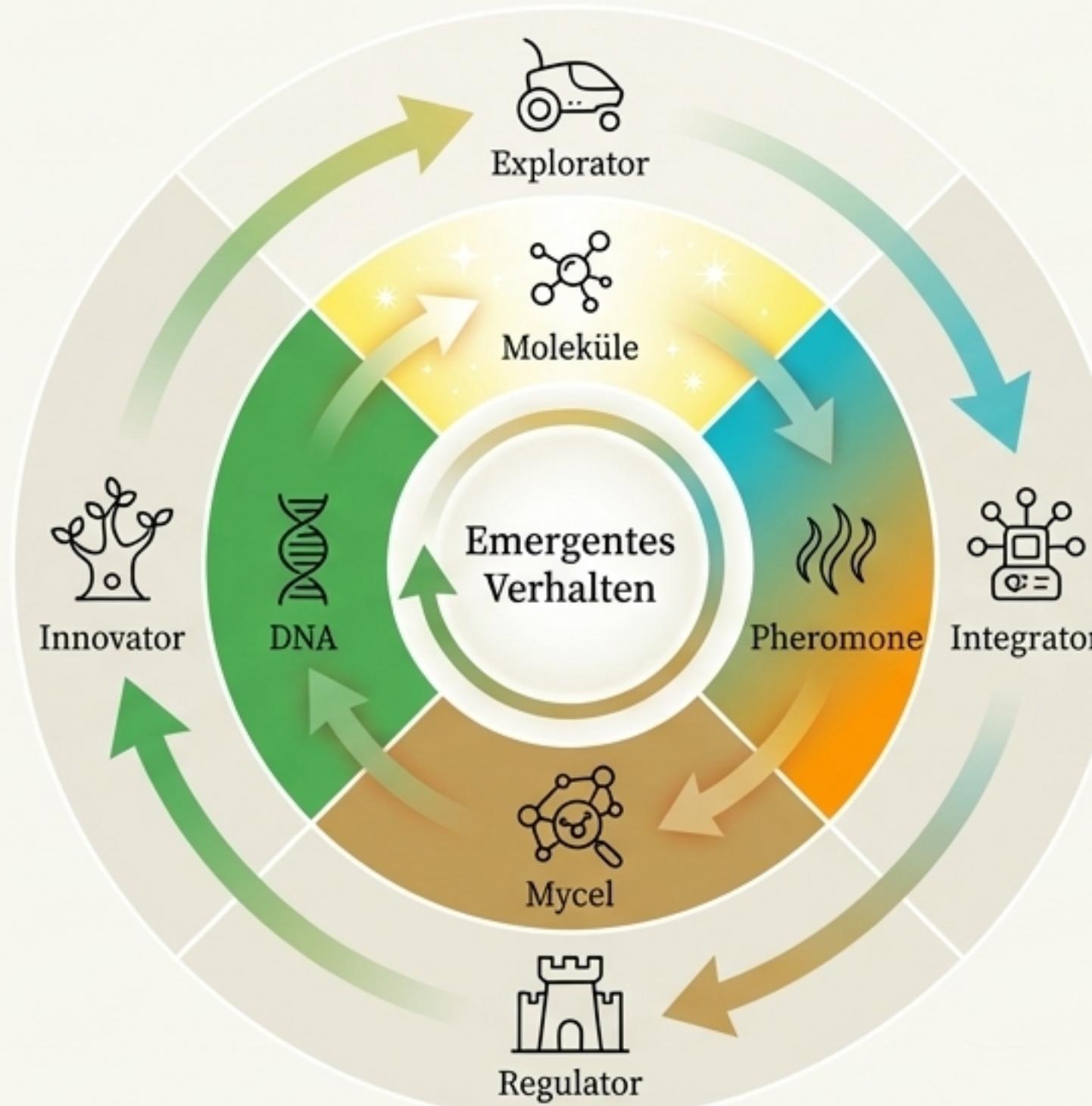
Im Gegensatz zu vielen KI-Modellen ist jeder Zustand und jede Dynamik in Micro-Swarm messbar, nachvollziehbar und kausal verknüpft. Alle Effekte sind mechanistisch erklärbar.



- Keine versteckten Schichten, keine unerklärlichen Korrelationen.
- Jeder Pfad im Mycel ist die integrierte, messbare Geschichte tausender lokaler Entscheidungen, die auf wahrgenommenen Gradienten basieren.

Intelligenz als emergenter Prozess

Kernaussage: Micro-Swarm demonstriert, wie aus dem Zusammenspiel einfacher lokaler Regeln und eines mehrschichtigen Gedächtnissystems komplexe, adaptive und evolvierende Verhaltensweisen entstehen.



Ausblick & Nächste Experimente

- Ablationstests (Deaktivieren von Pheromon, Mycel oder DNA zur Isolierung ihrer Effekte).
- Implementierung von Mehrkanal-Pheromonen.
- Entwicklung heterogenerer Agentenrollen.

Micro-Swarm

Autor: Ralf Krümmel

Forschungsfeld: Artificial Life, Emergent Systems