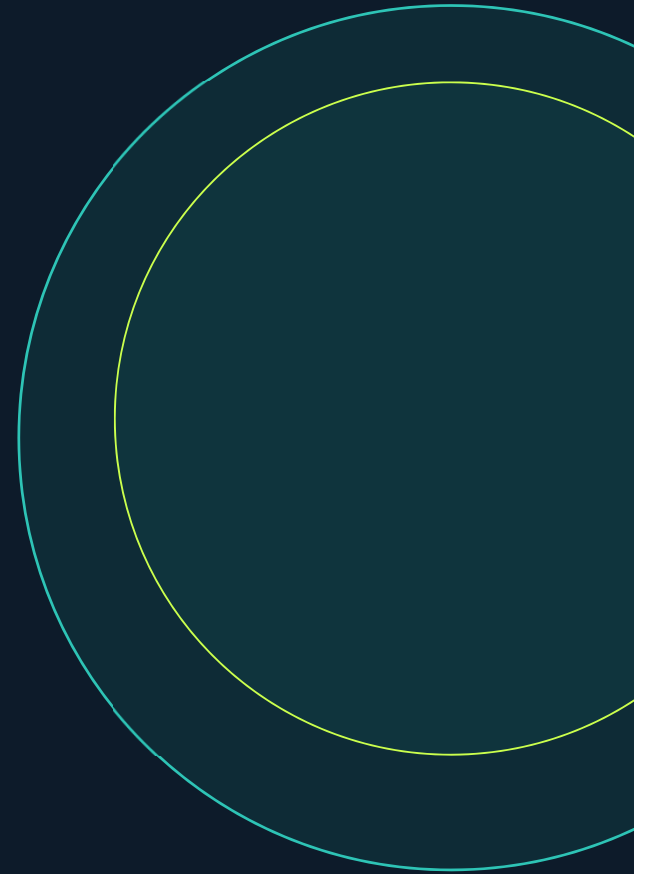


METHODEN-SPECIAL

Rückkopplungs- schleifen in digitalen Zellen

Konstruktion virtueller Zellen mit KI

Biologie × Künstliche Intelligenz



Was sind virtuelle Zellen?

Mit ausgeklügelten KI-Modellen wollen Forschende Zwillinge aus Nullen und Einsen von natürlichen Zellen generieren - die zellulären Prozesse im Computer exakt nachbilden.

Biologisches Vorbild

Echte Zellen mit all ihren Prozessen:
DNA-Replikation, Proteinbiosynthese,
Metabolismus

Digitaler Zwilling

Computersimulation, die Zellverhalten
vorhersagt - und auf Störungen reagiert
wie das Original

KI als Motor

Maschinelles Lernen ersetzt klassische
Programmierung: die KI lernt selbst,
wie eine Zelle funktioniert

Das Forschungsprojekt: Mycoplasma genitalium

Stanford University

Palo Alto & Craig-Venter-Institut in La Jolla, Kalifornien

Das einfachste lebende Organismus

Mycoplasma genitalium - nur 473 Gene

28 Sub-Modelle

Für alle zellulären Prozesse: Replikation, Proteinbiosynthese, Metabolismus ...

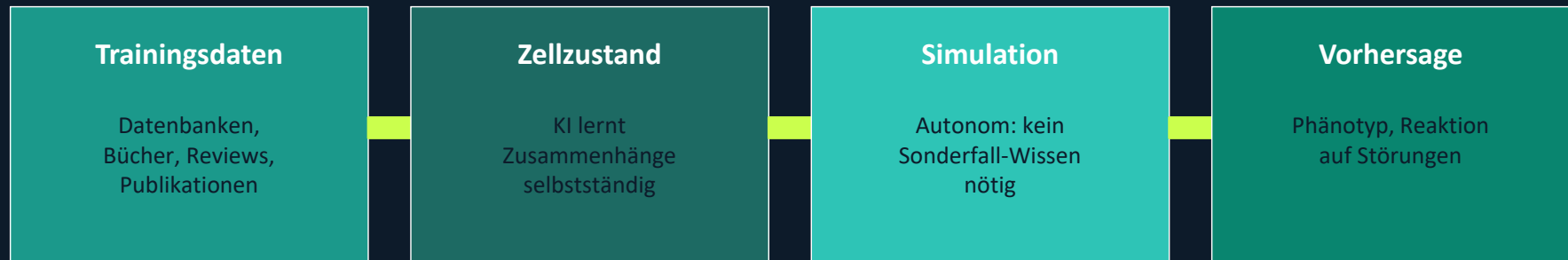
Ziel

Phänotyp aus Genotyp vorhersagen (Cell 150(2): 389-01)

WARUM Mycoplasma?

- Kleinstes bekanntes Genom eines sich selbst replizierenden Organismus
- Daher ideal als biologisches Modell
- 28 Sub-Module bilden ALLE Zellprozesse ab
- Fehlendes Gen → Simulation sagt Auswirkung voraus
- Validierung anhand echter Labordaten

Wie funktioniert KI in virtuellen Zellen?



💡 Kein klassisches Programmieren!

Statt Prompts und Tokens gibt die KI beim Programmstart verschiedene Variablen aus und generiert viele Arten von Output - ganz ohne explizite Regeln.

❌ ChatGPT & Co. konnten das nicht

Damals noch Science Fiction - heute Wirklichkeit.
Ergebnisse klar, auch wenn Module noch klassisch programmiert.

✅ Neue KI-Generation

Neuronale Netze lernen eigenständig Zusammenhänge - auch solche, die Menschen nie auffallen würden.

Rückkopplungsschleifen - das Herzstück



KI - Vom menschlichen Gehirn inspiriert

Neuronale Netze

Algorithmen, die durch maschinelles Lernen eigenständig Zusammenhänge entdecken

Muster und Repräsentationen in mehrdimensionalen mathematischen Räumen

Wie das Gehirn: spüren auch Muster auf, die Menschen in so kurzer Zeit nicht entdecken könnten

Lernen aus riesigen Datensätzen

Hochdimensionale Räume

Statt 3D denkt die KI in Hunderten oder Tausenden von Dimensionen gleichzeitig.

Was bedeutet das für Zellen?

- Jede Variable = eine Dimension
- Gen-Aktivitäten, Proteinmengen, pH-Werte ...
- KI findet Muster über ALLE Variablen gleichzeitig
- Unmöglich für Menschen allein

Wozu brauchen wir virtuelle Zellen?

Medizin

Wie reagiert eine Krebszelle auf ein neues Medikament?
→ Simulation statt Tierversuch

Genetik

Was passiert, wenn Gen X ausgeschaltet wird?
→ Phänotyp aus Genotyp vorhersagen

Schnelligkeit

Tests, die im Labor Jahre dauern, laufen in Minuten auf dem Computer

Verstehen

Störungen im System exakt nachverfolgen
→ Ursachen von Krankheiten aufdecken

Nachhaltigkeit

Weniger Ressourcen, weniger Laborabfall durch digitale Vorversuche

Seltene Krankheiten

Auch kleine Patientengruppen profitieren, da keine großen Studien nötig

Einzelzell-Transkriptomik - Zellen einzeln lesen

Modernes Werkzeug: Jede einzelne Zelle wird wie ein Buch gelesen.

1

Zelle isolieren

Einzelne Zellen werden getrennt voneinander analysiert - nicht nur Durchschnittswerte!

2

RNA ablesen

Welche Gene sind aktiv? Wie stark? Transkriptionsprofil = Fingerabdruck der Zelle

3

KI analysiert

Millionen von Zellen gleichzeitig; KI findet Zelltypen, Entwicklungsstadien, Störungen

4

Modell lernt

Zelluläre Zustände werden in der KI als Punkte im Raum dargestellt → Ähnliche Zellen = nahe Punkte

Ergebnis: Ein Atlas aller Zellzustände - die Grundlage virtueller Zellmodelle!

Herausforderungen & Grenzen

Komplexität

Echte Zellen haben Milliarden Interaktionen.
Selbst einfachste Organismen sind enorm komplex.

Datenmenge

KI-Modelle brauchen riesige, hochwertige Datensätze.
Fehler in Daten = Fehler im Modell.

Interpretierbarkeit

Black Box - die KI sagt das Ergebnis,
aber warum? Oft unklar.

Validierung

Simulation $\neq$ Realität. Alle Ergebnisse
müssen im Labor überprüft werden.

Trotz Grenzen: Virtuell getestete Hypothesen sparen Zeit, Kosten und Ressourcen enorm.

Zusammenfassung



Virtuelle Zellen

Computersimulationen echter Zellprozesse - basierend auf KI, nicht auf klassischem Code



KI lernt selbst

Statt Regeln zu programmieren, lernt die KI aus Daten: Zusammenhänge, die Menschen übersehen



Rückkopplung

Das Herzstück: Die digitale Zelle misst, korrigiert und reagiert - wie echte Biologie



Nutzen

Medizin, Genetik, Krankheitsforschung - schneller, günstiger, skalierbarer



Grenzen

Validierung im Labor bleibt nötig - aber Simulation revolutioniert den Forschungsprozess

Quellen & Literatur

[1] Primaerstudie

Karr, J.R. et al. (2012): A Whole-Cell Computational Model Predicts Phenotype from Genotype. Cell 150(2), S. 389-401.

[2] Fachzeitschrift

Labor Journal 4/2026 - Methoden-Special: Konstruktion virtueller Zellen mit KI.

[3] Craig Venter Institute

JCVI (2012): First Whole-Cell Model of Mycoplasma genitalium. www.jcvi.org

[4] KI & Deep Learning

LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. (2015): Deep learning. Nature 521, S. 436-444.

[5] Einzelzell-Transkriptomik

Macosko, E.Z. et al. (2015): Highly Parallel Genome-wide Expression Profiling of Individual Cells. Cell 161(5), S. 1202-1214.

[6] Neuronale Netze

Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. (2016): Deep Learning. MIT Press.