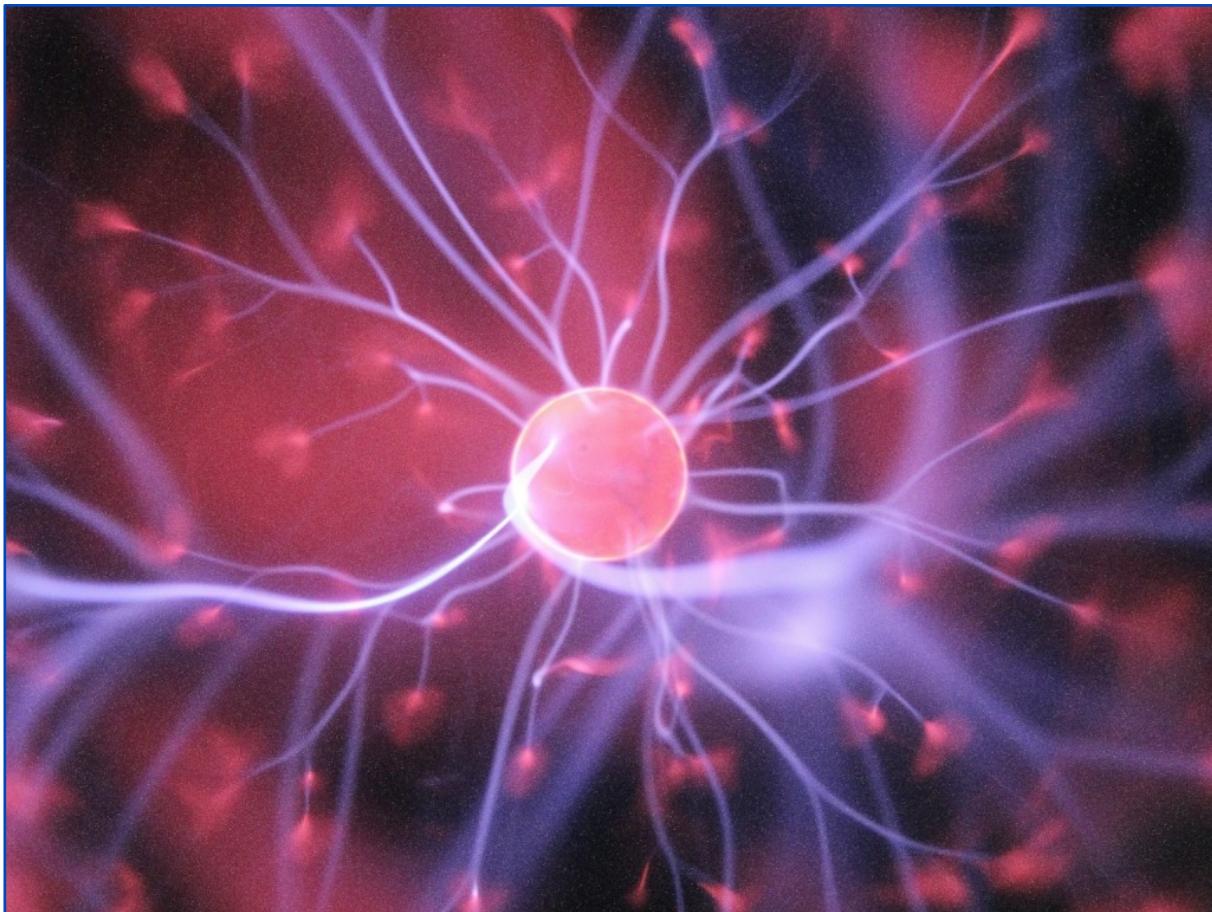


BIOCOMPUTER



© CC0 (Hal Gatewood/unsplash)

ZUSAMMENFASSUNG

Das menschliche Gehirn hat einzigartige Fähigkeiten, die technisch bisher nur teilweise nachgeahmt werden können. Allerdings orientiert sich heutige KI-Software in ihrem Aufbau, sogenannten neuronalen Netzen, an der Funktionsweise neuronalen Strukturen. Versucht wird außerdem, die physische Architektur des Gehirns in Hardware zu reproduzieren (neuromorphic engineering). Auch können biologische Systeme, wie aus menschlichen Stammzellen hergestellte *Hirnorganoide* oder Bakterienzellen, bereits für Rechenleistungen instrumentalisiert werden, während DNA als langfristiges Speichermedium fungiert. Biocomputer könnten eine Chance sein, die ressourcen- und energieintensiven herkömmlichen Rechensysteme auf längere Sicht zu ersetzen, da bereits wenige Gramm Zellen hohe parallele Rechenleistungen erbringen. Die Entwicklungen stehen aber noch am Anfang, auch wenn in den letzten Jahren beeindruckende Fortschritte gemacht wurden.

*Alternative
Biocomputer*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Der Siliziumtransistor – und mit ihm das Informationszeitalter – hat das Leben von Milliarden Menschen in wenigen Jahrzehnten grundlegend verändert. Eine Grundlage der digitalen Revolution ist die sich etwa alle 20 Monate verdoppelnde Transistordichte pro Fläche auf einem Chip, auch bekannt als Moore's Law. Nun scheint die Siliziumtechnologie langsam an physikalische Grenzen zu stoßen, da die nötige Verkleinerung der Schaltkreise nicht mehr lange fortführbar ist, auch wenn es weiterhin etwas Raum für höhere Transistordichten gibt. Die heutige Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Computern beruht daher vor allem auf Effizienzgewinnen bei der Software, auf der Entwicklung von Algorithmen für neue Problemstellungen (z. B. maschinelles Lernen) und neuen Maschinenmodellen (Parallel- und Vektorverarbeitung), die neue Hardware besser nutzt, als es das alte gängige Model (serial random-access) (Leiserson et al., 2020).

Aus diesem Grund und aufgrund des enormen *Ressourcen- und Energiebedarfs* herkömmlicher Datenverarbeitung werden alternative Rechentechnologien für die zukünftige Entwicklung interessant. Neben Systemen, die Quanteneffekte zur Informationsverarbeitung nutzen (siehe *Zukunft der Quantentechnologie*), sind auf verschiedenen Gebieten starke Fortschritte zu verzeichnen, die sich unter dem Begriff der *Biocomputer* zusammenfassen lassen. Diese versuchen, entweder biologische Strukturen wie die Hirnarchitektur nachzuahmen (neuromorph) oder direkt biologische Zellen und Systeme wie Organoide für Rechenleistungen zu instrumentalisieren.

Ein vielversprechender Ansatz alternativer Rechentechnologien besteht darin, sich die Eigendynamik einzelner Bauelemente (wie Memristoren) zunutze zu machen. Memristoren sind eine Klasse von Bauelementen, die durch ihre internen elektrophysikalischen Prozesse komplexe Datenverarbeitung erlauben, so dass jedes Element aufwendige digitale Schaltungen ersetzen kann. Solche Bauteile ermöglichen neue Computerarchitekturen, die sich beispielsweise am Aufbau des Gehirns orientieren (neuromorphe Systeme) und sowohl hohe Energieeffizienz als auch hohe Rechenkapazität erlauben (Kumar et al., 2022). Einfach ausgedrückt bestehen neuromorphe Systeme nicht wie herkömmliche Systeme aus Rechen- und Speicherelementen, sondern aus „Neuronen und Synapsen“, die beide Daten verarbeiten und speichern können (Aimone et al., 2022). Es werden verschiedene Ansätze verfolgt: künstliche synaptische Bauteile, z. B. Memtransistoren, optisch oder elektrolytisch-neurale Synapsen oder ferroelektrische Bauteile (Seok et al., 2024). Derzeit werden neuromorphe Computer vor allem für Anwendungen im Bereich des maschinellen Lernens und der Neurowissenschaften angewendet (sog. kognitive Anwendungen). Sie sind aber darüber hinaus für viele andere Berechnungsprobleme attraktiv, etwa Komposition, Graphenalgorithmen, beschränkte Optimierung und Signalverarbeitung. Insgesamt gilt neuromorphes Computing als Voraussetzung für die nächste Generation der künstlichen Intelligenz (KI), da herkömmliche Computersysteme das Potenzial von KI-Anwendungen aufgrund ihres hohen Energieverbrauchs und ihrer begrenzten Effizienz bei der Informationsverarbeitung beschränken (Ajayan et al., 2022). Der Bereich hat sich über die in akademischen Einrichtungen entwickelten Prototypen hinaus weiterentwickelt und umfasst nun Produktionssysteme, Lernmo-

*Neuromorphe Systeme,
organoide Intelligenz
und Zellen als
Computer*

*Neuromorphe
Computer:
Rechnerarchitektur
orientiert am Gehirn*

delle und Design-Tools, die mit Praxisexperimenten gekoppelt sind. Auf dieser Grundlage hat die Industrie weitere Systeme mit Anwendungen in den Bereichen wissenschaftliches Rechnen, Augmented/Virtual Reality, Wearables, Smart Farming sowie Smart Cities entwickelt (Kudithipudi et al., 2025).

Während mit neuromorphen Computern versucht wird, biologische Komponenten und Funktionen nachzuahmen, wird mit einem anderen Ansatz versucht, Zellsysteme echte Rechenoperationen durchführen zu lassen. *Organoid*, also stark vereinfachte und miniaturisierte Versionen von Organen, die aus Stammzellen gewonnen werden, sind nur wenige Millimeter groß. Durch bestimmte Signalmoleküle kann die Reifung zu Nervenzellen (Neuronen) ausgelöst werden, die als Konglomerat bestimmte Hirnfunktionen zeigen. Diese werden mit elektronischen Bauteilen kombiniert und können bereits jetzt einfache Rechenoperationen durchführen. Erste Experimente zeigen, dass neuronalen Kulturen beigebracht werden kann, Videospiele zu spielen¹ oder Merkmale des Reservoir-Computings zu zeigen, einer bestimmten Form des maschinellen Lernens. Dabei sitzt ein Hirnorganoid auf einem hochdichten Multielektroden-Array, das Senden und Empfangen von Informationen ermöglicht. Mit dieser Anordnung wurden bereits Erfolge bei Spracherkennung und komplexeren, nichtlinearen Berechnungen erzielt (Cai et al., 2023).

Organoid Intelligenz (OI) beschreibt damit ein neu entstehendes, multidisziplinäres Forschungsfeld, in dem an der Entwicklung biologischer Datenverarbeitung unter Verwendung von 3D-Kulturen menschlicher Gehirnzellen und Technologien für Gehirn-Maschine-Schnittstellen gearbeitet wird (Smirnova et al., 2023). Auch hier gibt es die Hoffnung, dass solches Biocomputing schneller, effizienter und leistungsfähiger sein könnte als Silizium-basierte Rechner und künstliche Intelligenz und dabei nur einen Bruchteil der Energie benötigt (Smirnova et al., 2023). Derzeit gibt es noch einige Hürden. Beispielsweise werden komplexere, dauerhafte Hirnorganoide benötigt, angereichert mit Zellen und Genen, die mit dem Lernen in Verbindung stehen. Außerdem werden neue mathematische Modelle, Algorithmen und Schnittstellentechnologien benötigt, um besser mit Hirnorganoiden zu kommunizieren. Aktuelle Hirnorganoide verfügen nicht über die anatomische Komplexität, Netzwerkorganisation oder sensomotorische Integration, die für Intelligenz oder Empfindungsfähigkeit erforderlich sind (Nestor & Wilson, 2025). Auch fehlt noch ein tieferes Verständnis darüber wie sie lernen und rechnen, und auch wie die riesigen Datenmengen, die sie erzeugen werden, verarbeitet und gespeichert werden können (Smirnova et al., 2023). Bei größer und intelligenter werdenden Systemen liegen ethische Fragestellungen auf der Hand, etwa, wenn Organoid Aspekte des Bewusstseins entwickeln. Auch der Schutz der Persönlichkeitsrechte und Interessen von Zellspendern ist sicherzustellen (Hartung et al., 2024). Aktuelle Darstellungen neuronaler Aktivität sind häufig vereinfachend und von Fehlinterpretationen geprägt, welche Systemen mit begrenzten biologischen Fähigkeiten fälschlicherweise neurophysiologische Eigenschaften zuschreiben (Nestor & Wilson, 2025).

Organoid Intelligenz

*Aus menschlichen
Stammzellen
gewonnene Mini-Hirne
kombiniert mit
Elektronik*

¹ spektrum.de/news/intelligenz-neurone-in-der-petrischale-lernen-pong-spielen/2078757.

In der Informatik wird aus einer Reihe von Eingaben und Regeln eine Ausgabe erzeugt. Biologische Systeme (wie menschliche oder Bakterienzellen) nehmen physio-chemische Reize wahr und reagieren darauf, um entsprechend ihrer internen Konfiguration eine Reaktion zu erzeugen, z. B. bestimmte Proteine aufzubauen. Mit Hilfe der Werkzeuge *synthetischer Biologie* (z. B. CRISPR-Cas9) können diese Abläufe so verändert werden, dass eine Programmierung von Informationsverarbeitung in lebender Materie möglich wird (Goñi-Moreno, 2024). Beide Rechenparadigmen (digital und analog) wurden bisher in lebenden Zellen implementiert, um sogenannte genetische Schaltkreise zu bauen. Eine Vielzahl von Schaltungen funktioniert auf Basis zweier diskreter, binär kodierter Ebenen (digital: 0,1), darunter Speicherelemente, Zähler, Zustandsautomaten, Kippschalter, Digitalisierer und hochkomplexe logische Funktionen. Das analoge Paradigma hingegen rechnet mit einer kontinuierlichen Menge von Zahlen und wird als Alternative für Aufgaben vorgeschlagen, die keine Entscheidungsfindung erfordern (Rizik et al., 2022).

In jeder Zelle gibt es mehrere Signalwege, die eine parallele Informationsverarbeitung ermöglichen. Daher gelingt es auch, mehrere Schaltkreise in einer einzigen Zelle – in Anlehnung an Mehrkernprozessoren – zu kombinieren, was im Prinzip enorme Rechenkapazität ermöglicht (Kim et al., 2019). Auch die Kommunikationswege zwischen biologischen Zellen erlauben neue Formen der verteilten Datenverarbeitung. Inspiriert durch die strukturelle Ähnlichkeit von künstlichen neuronalen Netzwerken (der Grundlage von KI) und zellulären Netzen, können bereits Berechnungen in Bakterienkonsortien zur Erkennung von Mustern ausgeführt werden (Li et al., 2021). Da bereits logarithmische Rechnungen ausgeführt werden können, ist eine effiziente Implementierung künstlicher neuronaler Netze mit E.coli-Zellen möglich, die als neuromorphes Computing (s. o.) mit Zellverbänden angesehen wird (Rizik et al., 2022). Insgesamt werden solche Arten von Biocomputern bereits zur Lösung praktischer Probleme in der Diagnostik, der Umweltsensorik oder bei zellbasierten Therapien eingesetzt (Qiu et al., 2025).

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Anwendungen von Biocomputern sind bei unterschiedlichen Herausforderungen wie Umweltsanierung, Arzneimittelforschung, Herstellung neuartiger Materialien und medizinischer Diagnose denkbar. Dafür sind jedoch noch erhebliche Verbesserungen bei der Manipulation biologischer Prozesse, bei der Verbesserung von Schnittstellen sowie beim Verständnis und der Messung von Zellzuständen erforderlich.² Hindernisse sind u. a. begrenzte zelluläre Ressourcen, ein hohes Maß an zufälligen Schwankungen bei den Zellreaktionen sowie unerwünschte Wechselwirkungen zwischen synthetischen Teilen und Wirtszellen (Rizik et al., 2022). Biocomputer haben das Potenzial, hohe Rechenleistung bei minimalem Ressourceneinsatz zu liefern. Hinsichtlich des riesigen und derzeit steigenden Energieverbrauchs der herkömmlichen IT-Infrastruktur und -nutzung

Zellen als Computer

*Genetische
Schaltkreise und
Bakterienkolonien als
neuronale Netzwerke*

*Hoher Bedarf an
ressourcenarmen
Computersystemen*

² radar.gesda.global/sub-topics/cellular-computing.

bei gleichzeitiger Notwendigkeit, Treibhausgasemissionen stark zu senken (siehe *Klimaschutzrisiko Digitalisierung*), ist die Erforschung alternativer ressourcenarmer Computersysteme wichtig. Die Kommerzialisierung erster Prozesse und einzelner Bauteile wird in den nächsten fünf Jahren erwartet.² Da die Erforschung von Biocomputern noch relativ neu ist, kann hier vorausschauend eine innovative Forschungs- und Entwicklungsinfrastruktur aufgebaut und parallel an der Standardisierung gearbeitet werden, um die Systemintegration zu vereinfachen.

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Während bei zellulären Computern jahrzehntelang die Theorieentwicklung im Vordergrund stand, weil die experimentellen Möglichkeiten sehr begrenzt waren, ist das heute umgekehrt. Neue Verfahren wie CRISPR eröffnen einen großen Experimentierraum, was den Ausbau der Grundlagenforschung in Überschneidungsbereichen von theoretischer Informatik und (synthetischer) Biologie lohnend macht (Goñi-Moreno, 2024). Damit sich die Technologie der organoiden Intelligenz in ethischer und sozialer Hinsicht verantwortlich weiterentwickeln kann, wird der Ansatz einer „eingebetteten Ethik“ gefordert, bei dem transdisziplinäre Teams aus Ethiker:innen, Forscher:innen und Mitgliedern der Öffentlichkeit ethische Fragen identifizieren, diskutieren und mit dem Ziel analysieren, diese Erkenntnisse in die zukünftige Forschung und Arbeit einfließen zu lassen (Smirnova et al., 2023).

„Eingebettete Ethik“
und vorausschauende
Folgenabschätzung

ZITIERTE LITERATUR

- Aimone, J. B., et al. (2022). A review of non-cognitive applications for neuromorphic computing. *Neuromorphic Computing and Engineering*, 2(3), 032003, dx.doi.org/10.1088/2634-4386/ac889c.
- Ajayan, J., et al. (2022). Advances in neuromorphic devices for the hardware implementation of neuromorphic computing systems for future artificial intelligence applications: A critical review. *Microelectronics Journal*, 130, 105634, [sciencedirect.com/science/article/pii/S0026269222002634](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026269222002634).
- Cai, H., et al. (2023). Brain organoid reservoir computing for artificial intelligence. *Nature Electronics*, 6(12), 1032-1039, doi.org/10.1038/s41928-023-01069-w.
- Goñi-Moreno, Á. (2024). Biocomputation: Moving Beyond Turing with Living Cellular Computers. *Commun. ACM*, 11, doi.org/10.1145/3635470.
- Hartung, T., et al. (2024). Brain organoids and organoid intelligence from ethical, legal, and social points of view. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 6, frontiersin.org/articles/10.3389/frai.2023.1307613.
- Kim, H., et al. (2019). A CRISPR/Cas9-based central processing unit to program complex logic computation in human cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15), 7214-7219, pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1821740116.
- Kudithipudi, D., et al. (2025). Neuromorphic computing at scale. *Nature*, 637(8047), 801-812, doi.org/10.1038/s41586-024-08253-8.
- Kumar, S., et al. (2022). Dynamical memristors for higher-complexity neuromorphic computing. *Nature Reviews Materials*, 7(7), 575-591, doi.org/10.1038/s41578-022-00434-z.

- Leiserson, C. E., et al. (2020). There's plenty of room at the Top: What will drive computer performance after Moore's law? *Science*, 368(6495), eaam9744, science.org/doi/abs/10.1126/science.aam9744.
- Li, X., et al. (2021). Synthetic neural-like computing in microbial consortia for pattern recognition. *Nature Communications*, 12(1), 3139, doi.org/10.1038/s41467-021-23336-0.
- Nestor, M. W., & Wilson, R. L. (2025). Assessing the Utility of Organoid Intelligence: Scientific and Ethical Perspectives. *Organoids*, 4(2), 9, mdpi.com/2674-1172/4/2/9.
- Qiu, X., et al. (2025). Biocomputing at the crossroad between emulating artificial intelligence and cellular supremacy. *Current Opinion in Biotechnology*, 92, 103264, scencedirect.com/science/article/pii/S0958166925000084.
- Rizik, L., et al. (2022). Synthetic neuromorphic computing in living cells. *Nature Communications*, 13(1), 5602, doi.org/10.1038/s41467-022-33288-8.
- Seok, H., et al. (2024). Beyond von Neumann Architecture: Brain-Inspired Artificial Neuromorphic Devices and Integrated Computing. *Advanced Electronic Materials*, n/a(n/a), 2300839, doi.org/10.1002aelm.202300839.
- Smirnova, L., et al. (2023). Organoid intelligence (OI): the new frontier in biocomputing and intelligence-in-a-dish. *Frontiers in Science*, 1, frontiersin.org/journals/science/articles/10.3389/fsci.2023.1017235.