

FORSCH-PROV0438 biointelligenz-technik v1.0 (DE)

- [Biointelligenz als Technik](#)
 - [Vorbemerkung zur Stellung dieses Werks](#)
 - [1 Begriffliche Dreiteilung](#)
 - [2 Substrattaxonomie](#)
 - [3 Stand der Wissenschaft](#)
 - [4 Engpässe](#)
 - [5 Prüfung verbreiteter Ansprüche](#)
 - [6 p/δ-Analyse \(Instanz zu FORSCH-0083\)](#)
 - [7 Leitplanken für diesen Strang](#)
 - [8 Neue Ansätze](#)
 - [9 Anschlussstellen](#)
 - [10 Experimentprogramm](#)
 - [11 Offene Fragen](#)
 - [12 Quellen](#)
 - [13 Glossar](#)

Biointelligenz als Technik

Substrate, Schnittstellen, Experimente — eine transdisziplinäre Landschaftsaufnahme mit Experimentprogramm

titel	Biointelligenz als Technik — Substrate, Schnittstellen, Experimente
slug	biointelligenz-technik
nummer	FORSCH-PROV0438
nummer-status	provisorisch; finale Vergabe lokal gegen das Werkregister
spur	FORSCHUNG
version	v1.0
datum	2026-10-06
autor	Thomas Schüller
autorenmarke	Thomas Schüller · Syntagma Forschung · Wien
kontakt	forschung@tschueller.com
orcid	0009-0003-9799-6747
lizenz	CC BY 4.0 (freie Fassung)
veroeffentlichung	Plattformzentriert ab 06.10.2026 — Werkzeuge, Anwendungen und Umsetzungsschicht laufen über die Plattform syntagma-science.com; der freie Werktext bleibt CC BY 4.0 und wird nachrangig als Belegfassung hinterlegt, die auf die Plattform hinführt. Ersetzt die zuvor zenodo-zentrierte Lieferform.
sprachen	DE (Master) + EN (Parität)
isInstanceOf	FORSCH-0083 (p/δ Risiko-Verfügungs-Asymmetrie)
relatedTo	FORSCH-0364 (substrat-und-erleben), FORSCH ≥0393 (kognition-ohne-zentrum), FORSCH-PROV0420 (messbarkeit-rahmentheorie), FORSCH-PROV0421 (skelett-mineralisierung-membran), bewusstsein-verhaeltnis-cluster, biochemie-zentrales-dogma, kontrollierte-umgebungen, elektronische-klangerzeugung
status	Arbeitsfassung — Verifikationsvorbehalt auf allen mit [S] und [O] markierten Aussagen

Vorbemerkung zur Stellung dieses Werks

Drei Achsen sind in diesem Strang bereits belegt:

Achse	Werk	Frage
Substrat und Erleben	FORSCH-0364	Woran hängt Erleben, wenn nicht am Kohlenstoff?
Organisation	FORSCH ≥0393 (kognition-ohne-zentrum)	Braucht Kognition ein Zentrum?
Technische Realisierbarkeit	dieses Werk	Was lässt sich mit welchem Substrat unter welchen Bedingungen tatsächlich bauen — und was davon steht einer nicht-institutionellen Forschung offen?

Dieses Werk beantwortet weder die Bewusstseinsfrage noch die Organisationsfrage neu. Es nimmt beide als

Randbedingungen und fragt nach der Ingenieursseite: Parameter, Engpässe, Kosten, Rechtslage, Zugang, und daraus abgeleitet ein Experimentprogramm, das mit vorhandener Werkstattinfrastruktur beginnbar ist.

Belegstatus. Jede Sachaussage trägt einen Marker: [P] peer-reviewed oder Primärquelle mit DOI geprüft, [S] Sekundärquelle oder Herstellerangabe, [O] offen, nur Anspruch, nicht unabhängig repliziert. Herstelleraussagen zu Energieeffizienz und Leistungsfähigkeit sind durchgehend [S] oder [O], weil die Anbieter zugleich Interessenträger sind.

Ausschlüsse. Militärische, waffentechnische und wehrtechnische Anwendungen sind über alle Stränge hinweg ausgeschlossen. Das ist in diesem Feld keine formale Klausel: mehrere der referenzierten Arbeiten zu Cyborg-Insekten und biohybrider Sensorik sind über Marineforschungsmittel finanziert. Die Ausschlussregel greift daher inhaltlich und wird in Kapitel 7 auf konkrete Ansätze angewandt.

Verfügbarkeit. Dieses Werk läuft über die Plattform. Werkzeuge, ausgearbeitete Versuchsunterlagen, Bauunterlagen und Lernmodule stehen unter syntagma-science.com; dort werden sie gepflegt, versioniert und weiterentwickelt. Der Werktext selbst — Landschaftsaufnahme, Engpassanalyse, ρ/δ -Analyse, Leitplanken, offene Fragen und alle Belege — bleibt unter CC BY 4.0 frei und vollständig zitierfähig und wird als Belegfassung hinterlegt, die auf die Plattform hinführt.

Die Reihenfolge ist seit dem 06.10.2026 umgekehrt: nicht ein Archivbestand mit angehängtem Angebot, sondern eine Plattform mit frei hinterlegtem Befund. Inhaltlich ändert das nichts an dem, was offen ist — der Befund steht vollständig im freien Teil und bleibt es.

1 Begriffliche Dreiteilung

Der Sammelbegriff »Bionik« deckt im deutschen Sprachraum drei technisch unverbundene Vorgehensweisen ab. Ihre Vermengung ist die häufigste Quelle von Fehlplanung in diesem Feld.

Ebene	Definition	Lebendes im Endprodukt	Beispiel	Reifegrad
B1 Strukturübertragung (Bionik i.e.S.)	Ein biologisches Form-, Struktur- oder Verfahrensprinzip wird abstrahiert und in totes Material überführt	nein	Exponentialhorn nach Grillenstridulation; Topologieoptimierung nach Knochentrabekeln	Serienreife
B2 Biohybridik	Lebendes Gewebe wird als Aktuator, Sensor oder Regler in ein technisches System eingebaut	ja, als Komponente	Muskelgetriebene Soft-Robotik; Insektenantenne als Gasetektor	Labor bis Demonstrator
B3 Substratrechnen	Der Rechenvorgang selbst findet im biologischen Medium statt	ja, als Rechenwerk	Hirnorganoid auf MEA; Pilzmemristor; DNA-Strangverdrängung	früh bis Nische

Abb. 1 — Drei Ebenen der Naturübertragung

Getrennte Kompetenzen, keine Vererbung zwischen den Ebenen

Ebene	Beispiel	Benötigte Kompetenz	Reifegrad
B1 Strukturübertragung Prinzip abstrahiert, totes Material	Horn nach Grille · Knochentopologie	Werkstoff + Fertigung	Serienreife
B2 Biohybridik Lebendes Gewebe als Bauteil	Muskelaktuator · Antennensensor	Gewebekultur + Regelung	Labor / Demonstrator
B3 Substratrechnen Rechnen im biologischen Medium	Organoid auf MEA · Pilzmemristor	Elektrophysiologie + Kodierung	früh / Nische

Fehlplanung entsteht, wenn B1-Kompetenz für B3-Vorhaben veranschlagt wird.

Abb. 1 — Drei Ebenen der Naturübertragung. Getrennte Kompetenzen, keine Vererbung zwischen den Ebenen.

Die Ebenen erben nicht voneinander. B1 verlangt Werkstoff- und Fertigungskompetenz, B2 Gewebekultur plus Regelungstechnik, B3 Elektrophysiologie plus Kodierungstheorie. Wer B1 beherrscht, kann daraus für B3 nichts ableiten außer Fertigungskapazität für Peripherie — was, siehe Kapitel 9, der reale Anknüpfungspunkt ist.

2 Substrattaxonomie

Sechs Substratklassen mit den Parametern, die über Machbarkeit entscheiden. Kostenangaben sind Größenordnungen für einen Einzelaufbau, nicht Angebote.

Substrat	Informationsträger	Zeitskala	Energie/Operation	Reife	Zugang für Einzelforschende	Rechtsstatus AT	Tierfrei erreichbar
Humane Hirnorganoide (hiPSC)	Spikes, synaptische Plastizität	ms-h	biologisch, s. Kap. 5	cutting-edge	Remote-Plattform oder Kooperation	BSL-2, GTG/Ethikvotum	bedingt, s. Kap. 8 N1
Primäre/immortalisierte Neuronenkulturen	Spikes	ms-h	biologisch	etabliert	Laborkooperation	BSL-2, Tierversuchsrecht bei Primärkultur	nein bei Primärkultur
Pilzmyzel (lebend/dehydriert)	elektrische Spikes; Memristanz	ms-s / μ s-ms	nicht sauber vermessen	früh	vollständig offen	keine Beschränkung	ja
Schleimpilz (<i>Physarum</i>)	Protoplasmaströmung, Netzwerktopologie	s-h	nicht vermessen	früh	vollständig offen	keine Beschränkung	ja
DNA / Nukleinsäuren	Sequenz, Hybridisierungskaskade, Faltung	s-h (Rechnen), Jahrhunderte (Speicher)	chemisch	Speicher reif, Rechnen Nische	Oligo-Bestellung möglich	keine Beschränkung bei synthetischen Oligos	ja
Organische Halbleiter (OECT/Memristor)	Ionen-/Elektronenleitung	μ s-ms	s. Kap. 5	Labor bis Vorserie	offen, druckbar	keine Beschränkung	ja

Abb. 2 — Substratlandkarte

Reifegrad gegen Zugangshürde · Kreisfarbe = ethische Vorsorgelast

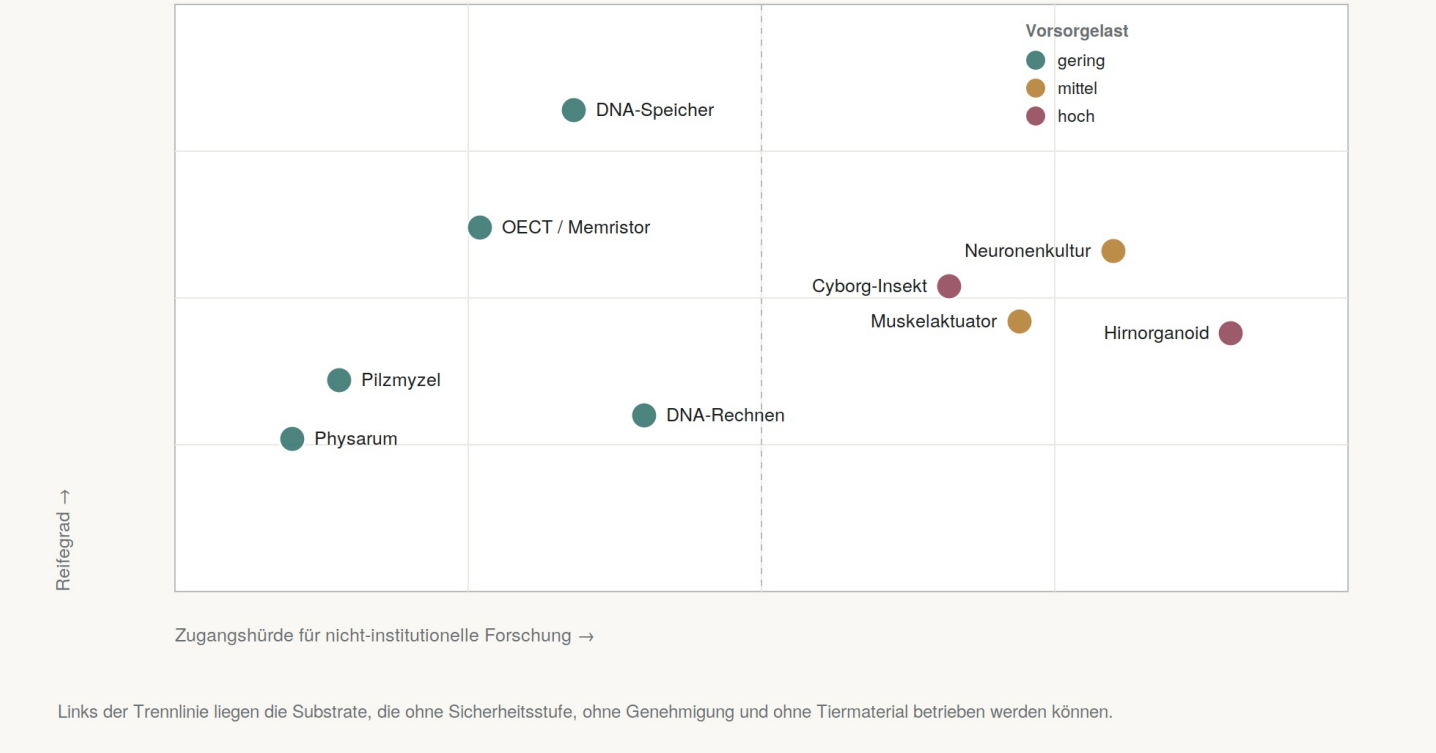


Abb. 2 — Substratlandkarte: Reifegrad gegen Zugangshürde, Farbe kodiert die ethische Vorsorgelast (Einordnung des Autors, keine Messung).

Die Spalte »Tierfrei erreichbar« ist in der Literatur nicht üblich und wird hier eingeführt; ihre Begründung steht in Kapitel 8, Ansatz N1.

3 Stand der Wissenschaft

3.1 Neuronale Wetware

Plattformen. Zwei kommerzielle Zugänge bestehen.

Merkmal	Cortical Labs CL1	FinalSpark Neuroplatform
Ort	Melbourne (AU)	Vevey (CH)
Substrat	hiPSC-abgeleitete kortikale Neuronen auf planarem Array	Vorderhirn-Organoid, ca. 500 µm Durchmesser
Elektroden	59 Elektroden pro Einheit [S]	8 Elektroden je Organoid, 4 Organoid je MEA, bis 4 MEA [P]
Kapazität	ca. 800.000 Neuronen [S]	16 Organoid, ca. 160.000 Neuronen [S]
Abtastung	sub-ms Ausgabelatenz [S]	Intan RHS, 30 kHz, 16 bit [P]
Standzeit	bis ca. 6 Monate [S]	bis ca. 100 Tage elektrophysiologisch aktiv [P]
Zugang	Kauf ca. 35.000 USD; Rack-Staffel ca. 20.000 USD/Einheit; Cloud ca. 300 USD/Woche [S]	Remote via Python; Freiplätze über Ausschreibung, sonst Abo [S]
Leistungsaufnahme	30er-Rack ca. 850-1000 W [S]	keine belastbare Angabe
Auslieferung	erste 115 Einheiten ab Sommer 2025 angekündigt (Fachpresse) [S]	Betrieb seit 15.05.2024 [S]
Finanzierung	10-Mio-USD-Runde, u. a. In-Q-Tel (nachrichtendienstnaher Risikokapitalgeber); Datierung 2023 oder 2025 je nach Quelle [S]	keine belastbare Angabe

Belegte Rechenleistungen. Der Stand ist bescheidener, als die Marktkommunikation nahelegt, aber nicht null.

Demonstration	System, Quelle	Ergebnis	Status
Braille-Erkennung; taktile Sensordaten als Stimulationsmuster über acht Elektroden	Neuroplattform; Bristol, Ward-Cherrier/Liu, arXiv:2508.20850	61 % Klassifikationsgenauigkeit mit einem Organoid, 83 % mit einem Ensemble aus drei Organoiden	[P] Preprint (v2, 02/2026), keine Zeitschriftenfassung
Reservoir-artige Sprach- und Gleichungsaufgaben	Organoid-Silizium-Verbund (Brainware, Indiana University)	verkürzte Trainingszeit gegenüber rein digitalen Vergleichssystemen berichtet	[S]
Pong unter geschlossener Rückkopplung	DishBrain (2022)	reizabhängige Aktivitätsänderung; Sentienz-Terminologie in der Folgeliteratur als überdehnt kritisiert	[S]
Digitale Zwillinge	Neuroplattform-Daten; Ulster, Wong-Lin, 2026	Modelle reproduzieren Feuerraten und Oszillationen	[S]

Reifung und Vaskularisierung sind die beiden physiologischen Engpässe. Ohne Gefäßversorgung bilden Organoide einen nekrotischen Kern; das begrenzt Größe und Reifung [P]. Vaskularisierungsansätze:

Ansatz	Prinzip	Status
Endothel-Kokultur	Einbringen von Endothelzellen in die Organoidkultur	[P]
ETV2-Überexpression	Induktion endothelialer Zellen (gentechnische Veränderung)	[P]
Fusion mit Gefäßorganoiden	Assembloid aus neuralem und vaskulärem Organoid	[P]
Perfusionschips	Durchströmung im mikrofluidischen Träger	[P]
Mikrogefäßgitter aus Zwei-Photonen-Druck	3D-gedruckte poröse Röhren mit ca. 20 µm Seitenporen	[P]

Zeitachse: eine Arbeit vom 19.08.2026 zeigt, dass Organoide unter geeigneten Bedingungen einen mehrjährigen Entwicklungstakt abbilden und Merkmale späterer Hirnentwicklungsphasen ausprägen [P] (Faravelli, Antón-Bolaños et al., *Nature*, doi:10.1038/s41586-026-10877-x). Das verschiebt die Frage nach der Reifungsgrenze, ohne sie aufzuheben.

3.2 Nicht-neuronale lebende Substrate

Pilzmemristoren. Shiitake-Myzel (*Lentinula edodes*), dehydriert und verdrahtet, zeigt gequetschte Hysteresekurven, also memristives Verhalten. Berichtet werden 95 % memristive Übereinstimmung bei 5 Vpp/10 Hz und 90 ± 1 % bei bis zu 5,85 kHz; die Proben bleiben nach Dehydrierung funktionsfähig [P] (LaRocco et al., *PLOS One*, doi:10.1371/journal.pone.0328965). Strahlungsresistenz wird dort nur in der Diskussion als Argument für Luft- und Raumfahrtanwendungen angeführt; eine Primärstudie dazu ist nicht identifiziert [0].

Pilzlogik. Boolesche Gatter und elektrische Gatter in Pilzkolonien sind seit 2020/2021 dokumentiert [P] (Adamatzky, Beasley et al.), überwiegend aus einer Arbeitsgruppe und nicht breit unabhängig reproduziert; die Deutung fungaler Spikes als „Sprache“ ist in der Fachliteratur bestritten und wird hier nicht vertreten [P]. Die Schaltzeiten liegen im Sekundenbereich; die Systeme sind nicht als Ersatz für Digitallogik gedacht, sondern als Sensor-Rechen-Verbund im Substrat selbst.

Schleimpilz. *Physarum polycephalum* bildet Näherungslösungen für Netzwerkoptimierungsprobleme; Sensor- und Rechenbauteile auf *Physarum*-Basis stammen überwiegend aus einem Labor (Unconventional Computing Laboratory, UWE Bristol; EU-Projekt PhyChip); eine belastbare Stückzahl ist nicht belegt [0]. Der Anschluss an **kognition-ohne-zentrum** (≥0393) ist inhaltlich, nicht nur thematisch; das Substrat rechnet ohne Zentralinstanz.

Bewertung. Diese Klasse ist in Reife und Leistung der neuronalen Wetware unterlegen, in Zugänglichkeit und ethischer Belastung ihr aber deutlich überlegen. Sie ist der einzige Zweig, der ohne Genehmigung, ohne Sicherheitsstufe und ohne Tiermaterial betrieben werden kann.

3.3 Biohybride Robotik

Aktuatorik. Skelettmuskel liefert präzise, gerichtete Kontraktion, Herzmuskel liefert autonome Rhythmik. Beide werden in Soft-Robotik-Skelette eingebaut [P]. Entwicklungslinien:

Baustein	Stand	Quelle (Typ)
Antagonistische Muskelpaare	verhindert Spontanschrumpfung, verlängert Standzeit gegenüber Einzelmuskel	<i>Science Robotics</i> [P]
Biohybride Sehnen	erhöhen Leistungs-Gewichts-Verhältnis und Modularität muskelgetriebener Roboter	Castro et al., <i>Adv. Sci.</i> 2026, doi:10.1002/adv.202512680; murine C2C12-Zellen, Matrigel, Pferdeserum — unter L2 nur referierend [P]
Muskel-Sehnen-Bioprinting	verzahnter myotendinöser Übergang, rechnerisch optimierte Muskelgeometrie	PMC12266124 [P]
Neuronale Reservoirregelung eines biohybriden	Regelung eines weichen biohybriden Arms über ein	<i>PNAS</i> 2026, doi:10.1073/pnas.2522094123 [P]

Arms	neuronales Reservoir	
eBibots	Integration von Neuronen, Muskel, Biomaterial und Mikroelektronik in einem Bauteil	npj Robotics Review [P]
Weiche Elektronik als Interface	löst den mechanischen Impedanzsprung zwischen Gewebe und starrer Regelung	npj Robotics 2026 [P]

Dokumentierte Grenze: Ermüdung. Bei vier Kontraktionen pro Sekunde über 30 Minuten fällt die Leistung messbar ab, bei einer Kontraktion pro Sekunde nicht [S]. Die Endfassung der Sehnenarbeit berichtet Ermüdungsversuche über mehr als 7000 Zyklen; der Vergleich vier gegen eine Kontraktion pro Sekunde ist dort nicht wiederzufinden [0]. Der Mechanismus ist offen [0].

Cyborg-Insekten. Terrestrische Cyborg-Insekten sind seit 1997 dokumentiert; Steuerung erfolgt über Stimulation an den Antennenbasen, Auslesung über implantierte Sonden im Antennallobus. Berichtete Werte: >85 % Erfolgsrate der Lenkung, 92,8 % statische Geruchserkennung, 84,8 % unter Fortbewegung [P] (Huang et al., *Adv. Mater. Technol.* 2025, doi:10.1002/admt.202501158; Förderquelle dieser Arbeit nicht ermittelt). Der Sniffbot (2026) montiert eine Heuschreckenantenne plus miniaturisierte Elektrophysiologie auf ein Fahrzeug und lokalisiert Gerüche in windstiller Umgebung schneller als Metalloxidsensoren [P] (bioRxiv 10.64898/2026.02.17.706375).

Zur Einordnung: ein erheblicher Teil dieser Linie ist über Marineforschungsmittel finanziert und explizit auf Sprengstoffdetektion ausgerichtet. Kapitel 7 behandelt die daraus folgende Ausschlussentscheidung.

3.4 Nanobiologie

Zweig	Stand	Marker
DNA-Origami-Strukturen	subnanometergenaue Platzierung von Proteinen, Nanopartikeln, Molekülen an programmierten Bindestellen	[P]
Reizreaktive Nanostrukturen	Formänderung, Frachtfreisetzung oder mechanische Arbeit auf pH-, Temperatur-, Licht- oder Biomarkerreiz; aptamer-gesteuerte Öffnung	[P]
Autonome DNA-Motoren	zweibeiniger, nicht-brückenverbrennender Motor auf Origami-Bahn, gerichtete Fortbewegung inkl. 90°-Kurven in einem Schritt	[P] (<i>Sci. Adv.</i> , doi:10.1126/sciadv.adi8444)
Protein-/Peptid-Origami	de-novo-Faltung als eigenständige Entwurfsdisziplin neben DNA-Origami	[P]
DNA-Datenspeicher	kommerzielle Dienste und Karten verfügbar; Engpass ist die Syntheserate, nicht die Dichte	[S]

Der praktische Zugang ist hier vergleichsweise gut: Oligonukleotide sind kommerziell bestellbar, Entwurfswerkzeuge (caDNAno, oxDNA) sind offen, die Validierung verlangt allerdings AFM oder Gelelektrophorese.

3.5 Halbleiterseite als Vergleichsmaßstab

Ohne diesen Vergleich lässt sich der Effizienzanspruch der Wetware nicht prüfen.

System	Energie pro Ereignis	Frequenz	Marker
Biologische Synapse	ca. 1-100 fJ pro synaptischem Ereignis (Spanne aus Abschätzungen zusammengeführt)	~1-100 Hz	[P] / [S]
CMOS-Spiking-Neuron (28/65 nm)	ca. 1,6-4 fJ pro Spike	—	[P]
Organische Nanodraht-Synapse	Femtojoule-Bereich pro Ereignis	—	[P]
OECT-Neuron (BBL-basiert)	ca. 175 nJ pro Spike, bildet 15 von 20 Neuronenmerkmalen ab	bis 100 Hz	[P]
Memristor-Crossbar (SNN)	Analogbetrieb, ereignisgesteuert; Streuung der Herstellerangaben groß	kHz-MHz	[S]
Pilzmemristor	nicht sauber vermessen	bis 5,85 kHz	[0]

Zwischen biologischer Synapse (fJ) und organischem Kunstneuron (nJ) liegen je nach Bezugswert sechs bis acht Größenordnungen; CMOS-Spiking-Neuronen liegen dagegen bereits im Femtojoule-Bereich. Der prüfbare Abstand verläuft damit zwischen Bauelementklassen, nicht zwischen »biologisch« und »technisch«. Der Vergleich mit einem Rechenzentrum vermischt zusätzlich Substrat- und Systemebene.

Die drei Werte messen verschiedene Ereignisse: der organische Wert gilt je Neuron-Spike eines Einzelbauelements, der biologische je synaptischem Ereignis (nicht je Aktionspotential; für ein ganzes Aktionspotential rechnet die Stoffwechselbilanz des Kortex mit rund 7×10⁸ ATP je Neuron [P]), der CMOS-Wert je Spike eines optimierten Einzelschaltkreises bei sehr niedriger Versorgungsspannung. Chipebene liegt höher (größenordnungsmäßig Pikojoule je synaptischer Operation). Eine Aufschlüsselung der Lebenserhaltung gegen die Rechenenergie bei Organoiden ist nicht

veröffentlicht; die kursierenden Systemleistungen sind Herstellerangaben [S].

4 Engpässe

Nr.	Engpass	Betroffene Substrate	Kern des Problems
EP1	Sauerstoff- und Nährstoffdiffusion	Organoide	nekrotischer Kern ab wenigen Hundert µm; begrenzt Größe und Reifung
EP2	Standzeit	Organoide, Neuronenkulturen	ca. 100 Tage bis 6 Monate; jede Serie beginnt biologisch neu
EP3	Elektrodendichte und -bilanz	alle B3-Substrate	8-59 Elektroden gegen 10 ⁵ -10 ⁶ Zellen; Ladungsbilanzierung begrenzt Stimulationsdauer
EP4	Fehlende Lernregel	neuronale Wetware	keine dem Backpropagation-Verfahren äquivalente, zuverlässige Trainingsvorschrift; Freie-Energie- und Reservoiransätze sind Näherungen
EP5	Informationsdichte	Organoide	Größenordnung 1 bit pro Organoid als Ausgangswert; Steigerung ist ausgeschriebenes Ziel, nicht erreichter Stand [S]
EP6	Reproduzierbarkeit der Matrix	alle Organoidkulturen	Chargenvarianz tierischer Matrices; siehe N1
EP7	Kein Fehlermodell	alle lebenden Substrate	keine etablierte Trennung von Rauschen, Drift, Zelltod und Signal
EP8	Mechanischer Impedanzsprung	Biohybridik	weiches Gewebe gegen starre Aktuatorik und Elektronik
EP9	Ermüdung	Muskelaktuatoren	Leistungsabfall bei hoher Wiederholrate, Mechanismus offen
EP10	Syntheserate	DNA-Rechnen und -Speicher	Schreibvorgang dominiert die Latenz, nicht das Lesen

Engpass EP4 ist der strukturell härteste. Solange keine belastbare Lernvorschrift existiert, ist jede Wetware-Anwendung entweder ein Reservoir mit digitalem Ausleseklassifikator — dann liegt die Intelligenz im Klassifikator — oder eine Demonstration von Reizantwortunterschieden.

5 Prüfung verbreiteter Ansprüche

Anspruch	Ursprung	Was tatsächlich gezeigt ist	Status
»Biologische Neuronen sind eine Million Mal energieeffizienter«	Plattformbetreiber	Vergleich der Leistungsaufnahme eines menschlichen Gehirns mit der eines Rechenzentrums; unterschiedliche Systemgrenzen, keine gleiche Aufgabe, keine Berücksichtigung der Life-Support-Peripherie	[0] — als Vergleich nicht tragfähig
»Neuronen zeigten Sentienz im Spiel«	DishBrain-Publikation 2022	Reizabhängige Aktivitätsänderung unter geschlossener Rückkopplung	[0] — Terminologie überdehnt, in Folgeliteratur kritisiert
»Erster codebereitstellbarer Biocomputer«	Herstellermarketing	funktionsfähige Schnittstelle mit Programmierzugang	[S] — als Produktaussage zutreffend, als Leistungsaussage leer
»Organoide sind nicht bewusstseinsfähig«	ISSCR-Leitlinien 2021	Einstufung als Kategorie 1A, von spezialisierter Aufsicht ausgenommen, begründet mit fehlender biologischer Evidenz	[P] — Leitlinienstand 2021; das Update 2025 betrifft nur Embryomodelle, Organoiden bleiben in 1A; 2025/26 mehrfach als voreilig kritisiert
»Hirnorganoide brauchen Komplexitätsgrenzen«	Ethikleitlinien der VR China für Organoidforschung, 29.04.2025	verbindlicher nationaler Rahmen mit Monitoring- und Komplexitätsvorgaben	[S] — Sekundärdarstellung, Originaltext nicht geprüft
»Organoide werden absehbar bewusst«	Gegenposition (<i>Patterns</i> 2025)	Argument, dass die Zurückweisung der Möglichkeit unbegründet ist, wenn andere Reifungsfortschritte akzeptiert werden	[S] — Plausibilitätsargument, kein Nachweis
»Pilzmemristoren erreichen 90 % Genauigkeit bei 5,85 kHz«	PLOS One 2025	memristive Übereinstimmung mit dem erwarteten Kennlinienverhalten, nicht Klassifikationsgenauigkeit einer Aufgabe	[P] — korrekt, aber häufig fehlgedeutet

Die letzte Zeile steht exemplarisch für ein Muster: dieselbe Prozentzahl bedeutet je nach Kontext Kennlinientreue, Klassifikationsgüte oder Erfolgsrate einer Steuerung. Beim Zitieren ist der Bezugswert mitzuführen.

6 p/δ-Analyse (Instanz zu FORSCH-0083)

Wer trägt das Risiko (ρ), wer hat die Verfügung (δ)?

Nr.	Risikoträger ρ	Verfügungsträger δ	Asymmetrie
A1	Zellspender:innen	Plattformbetreiber, Zelllinienbanken	Die Linie überlebt die Einwilligung; Weiterverwendungen zu Rechenzwecken waren zum Zeitpunkt der Spende meist nicht absehbar
A2	Das Substrat selbst, falls moralisch relevant	Betreiber und Nutzende	Die Entscheidung über Reifungsdauer, Reizregime und Beendigung liegt vollständig auf der Verfügungsseite
A3	Nicht-institutionelle Forschende	BSL-2-Infrastruktur, Ethikkommissionen, Anbieter	Zugang hängt an Räumen und Rechtsform, nicht an Kompetenz; Preisschwelle plus Warteliste plus Sicherheitsstufe wirken kumulativ
A4	Öffentlichkeit	Anbieter mit Deutungshoheit über Fachbegriffe	Begriffe wie Sentienz, Intelligenz, Lernen werden in Marktkommunikation gesetzt und wandern von dort in Regulierungsdebatten
A5	Versuchstiere in der Vorkette	Matrixhersteller, Medienhersteller	Der tierische Anteil steckt in Matrigel, Seren und Zusätzen, also unterhalb der Sichtbarkeitsschwelle der Anwendung
A6	Zukünftige Regulierte	Frühe Anwender, Förderlogiken	Wehrtechnische Vorfinanzierung prägt, welche Fähigkeiten zuerst reifen, und damit den Ausgangszustand jeder späteren zivilen Regelung

A3 ist der Punkt, an dem die Asymmetrie technisch, nicht bloß rhetorisch wird. Die Begründungen für BSL-2 bei humanem Zellmaterial sind arbeitsschutzrechtlich real: Kontaminationsrisiko für Arbeitende, Kreuzkontamination, Entsorgung humanen biologischen Materials. Real ist aber ebenso, dass daraus ein Infrastrukturmonopol folgt, das nicht aus der Risikohöhe abgeleitet, sondern historisch gewachsen ist. Die Gegenmaßnahme ist nicht Regelumgehung, sondern der Aufbau gemeinschaftlicher Laborinfrastruktur und die konsequente Bearbeitung der genehmigungsfreien Substratklassen. A5 ist der in der Literatur am schwächsten behandelte Punkt und Ausgangspunkt von Ansatz N1.

7 Leitplanken für diesen Strang

Vier Regeln, die aus den bestehenden Festlegungen folgen und hier auf konkrete Ansätze angewandt werden.

L1 — Kein Militär, keine Waffen, keine Wehrtechnik. Betroffen ist in diesem Feld vor allem die Cyborg-Insekten- und die biohybride Sensorik-Linie: Sprengstoffdetektion mit Heuschreckenantennen, ferngesteuerte Insekten für Aufklärung, Nano-Tattoo-Lenkung. Der Ausschluss betrifft nicht die zugrundeliegende Sinnesphysiologie und nicht die Geruchskodierung als solche. Er betrifft Aufbauten, deren Zweckbestimmung Detektion von Kampfmitteln, Aufklärung oder Zielführung ist. Die zivile Parallelanwendung — Gasleckortung, Umweltmonitoring — ist zulässig, muss aber in Zweck, Publikationsform und Förderquelle getrennt geführt werden, sonst ist der Ausschluss wirkungslos.

L2 — Kein Tiermaterial. Der Ausschluss greift nicht erst beim Versuchstier, sondern bereits im Verbrauchsmaterial. Betroffen sind: Matrigel und verwandte Matrices (murines Sarkomextrakt), fötales Kälberserum, tierische Serumersatzstoffe, tierische Antikörper in der Charakterisierung, Insektenpräparate in der Biohybridsensorik, Skelett- und Herzmuskelzellen tierischen Ursprungs in der Aktuatorik. Daraus folgt Ansatz N1 und daraus wiederum, dass die muskelgetriebene Biohybridik in diesem Strang nicht praktisch verfolgt wird, sondern nur referierend. Dasselbe gilt für Fernplattformen, deren Kulturkette tierische Bestandteile enthält; ihre Nutzung setzt eine schriftliche Auskunft des Betreibers voraus (siehe V6).

L3 — Vorsorge beim Substrat. Solange die Bewusstseinsfrage offen ist, gilt ein Vorsorgeregime, das nicht auf eine Antwort wartet. Operativ: keine Reizregime, die auf Aversion und Vermeidung aufbauen, wo Alternativen bestehen; keine Kombination von Nozizeptor-Differenzierung mit geschlossener Rückkopplung; dokumentierte Reifungsobergrenze pro Serie; Beendigungsprotokoll vorab festgelegt und mitpubliziert; keine Übernahme von Sentienz-Vokabular ohne Messgröße.

L4 — Herkunft und Einwilligung. Zelllinien nur mit dokumentierter Einwilligung, die den Rechenzweck erfasst. Wo die Einwilligung ihn nicht erfasst, ist das im Werk zu vermerken und nicht durch Verweis auf Anonymisierung zu erledigen.

8 Neue Ansätze

Fünf Vorschläge, die in der gesichteten Literatur nicht oder nur randständig besetzt sind.

N1 — Tierfreier Wetware-Stack

Beobachtung. Organoidforschung wird regelmäßig als Ersatz für Tierversuche dargestellt. Die Kulturkette enthält jedoch weiterhin tierische Bestandteile. Der Standardmatrix Matrigel ist murines Sarkomextrakt; über 14.000 Publikationen stützen sich darauf, während die verbreitetste xenofreie Vollmatrix-Alternative im niedrigen zweistelligen Bereich zitiert wird [P] (Wolff et al., *Adv. Sci.* 2025, doi:10.1002/advs.202508734; Zähldatum und Datenbank dort nicht ausgewiesen).

Verfügbare Bausteine.

Schicht	Tierhaltige Standardlösung	Tierfreie Alternative	Belegstand
2D-Beschichtung hiPSC	Matrigel	rekombinantes Vitronektin (XF)	erhält Pluripotenz, ermöglicht enzymfreies Passagieren [P]
3D-Matrix	Matrigel	Fibrin-Hydrogel; Fibrin-Laminin-511-Chimäre (3D-Vermehrung von hiPSC, doi:10.1016/j.matbio.2025.10.003; ein Mitautor am Matrixhersteller beteiligt); rekombinantes Laminin-511-Fragment; VitroGel ORGANOID (synthetisches Polysaccharid); PeptiMatrix, PuraMatrix (synthetische Peptide); GrowDex (Nanocellulose aus Holz)	für Gefäßorganoide gleichwertig belegt [P]; für zerebrale Organoide Herstellervergleich, unabhängige Replikation fehlt [0]
Medium/Zusätze	FBS, tierische Zusätze	chemisch definierte, xenofreie Systeme	verfügbar, Chargenvergleich für Hirnorganoide offen [0]
Charakterisierung	tierische Antikörper	rekombinante Antikörper, massenspektrometrische Verfahren	verfügbar [S]

Lücke. Für zerebrale Organoide, die als Rechensubstrat betrieben werden, existiert keine publizierte, durchgängig tierfreie Kette mit elektrophysiologischer Endkontrolle. Vorhanden sind Einzelvergleiche für Gefäß-, Darm- und Tumorganoide. Eine Vorrecherche (09/2026) bestätigt den Befund; die systematische Suche mit dokumentierter Strategie steht aus (Verifikationspunkt 31).

Vorschlag. Ein systematischer Vergleich mit elektrophysiologischem Endpunkt: identische Zelllinie, vier Matrixbedingungen, Endpunkte Feuerrate, Burstrate, Netzwerksynchronie, Reifungsverlauf, Chargenstreuung. Dieser Ansatz ist als reines Review sofort publizierbar und als Laborarbeit kooperationsfähig, weil er für jedes Organoidlabor unabhängig vom Rechenzweck nützlich ist. Er ist zugleich die Bedingung dafür, dass Wetware-Arbeit in diesem Strang überhaupt regelkonform ist.

N2 — Substrat-Ethik-Gradient statt Binärentscheidung

Die Debatte verläuft binär: Organoide sind bewusstseinsfähig oder nicht. Operativ brauchbar wäre ein Gradient über messbare Proxys, der Auflagen skaliert statt sie zu schalten. Kandidaten für Achsen: Zellzahl; Anteil differenzierter Neurone; Vorhandensein nozizeptiver Zelltypen; Netzwerksynchronie; Reifungsdauer; Vorhandensein geschlossener sensomotorischer Rückkopplung; Mehrregionalität (Assembloid). Der Gradient behauptet keine Bewusstseinsmessung. Er ordnet Aufbauten nach Vorsorgebedarf und macht Auflagen begründbar, bevor eine Schwelle festgestellt werden kann. Anschlussfähig an die PIS-12-Skalenlogik aus FORSCH-0333.

N3 — Spektro-temporale Kodierung als Wetware-Benchmark

Die bisher belegte Wetware-Aufgabe mit Sensorbezug ist eine taktile Klassifikation über acht Elektroden. Audio ist der naheliegende, unbesetzte Nachbarfall und methodisch günstiger: das Eingangssignal ist von Natur aus zeitlich strukturiert, die Merkmalsextraktion (Filterbank, Onset, Modulationsspektrum) ist etabliert, und es existieren harte digitale Vergleichsbasislinien. Vorschlag eines Benchmarks mit drei Stufen — Onset-Diskrimination, Timbre-Klassifikation bei gleicher Tonhöhe, Rhythmusmuster-Wiedererkennung — jeweils gegen eine Reservoir-Basislinie gleicher Auslesekomplexität. Kern der Auswertung ist der Nachweis, dass die Trennleistung im Substrat und nicht im Klassifikator entsteht: identischer Klassifikator auf gemischten Zufallsdaten muss versagen.

N4 — p/6-Zugangsindex für Biocomputing-Plattformen

Ein reproduzierbarer Index über fünf Achsen: Geldschwelle, Wartezeit, Rechtsraum, notwendige Sicherheitsstufe, Datenrückgaberecht. Anwendbar auf jede Plattform, veröffentlichungsfähig als Tabelle mit Methodenteil, und geeignet,

die in Kapitel 6 beschriebene Asymmetrie A3 aus dem Anekdotischen herauszuholen. Der Index misst nicht Qualität, sondern Verfügungsverteilung.

N5 — Terminologische Korrektur B1/B2/B3

Die Dreiteilung aus Kapitel 1 ist selbst ein Ergebnis. In der deutschsprachigen Fach- und Förderliteratur wird »Bionik« für alle drei Ebenen verwendet, was Ausschreibungen, Lehrpläne und Projektplanungen systematisch fehlleitet: Kompetenzen aus B1 werden für B3-Vorhaben veranschlagt. Ein kurzes Positionspapier mit Entscheidungstabelle ist als Unterpaper zu diesem Werk führbar.

9 Anschlussstellen

Querbezüge im Strang FORSCHUNG. Registerabgleich vom 2026-09-22; Nummern provisorisch, soweit vergeben.

Bezugswerk	Anschluss	Charakter
FORSCH-0364 substrat-und-erleben	liefert die Bewusstseinsachse, auf der L3 und N2 aufsetzen	theoretisch, direkt
FORSCH ≥0393 kognition-ohne-zentrum	Physarum und Pilznetze sind Substratbelege der dort geführten These	theoretisch, direkt
FORSCH-0083	ρ/δ-Kapitel 6 als Domäneninstanz	strukturell
bewusstsein-verhaeltnis-cluster	Bewusstsein als Verhältnis statt Besitz; gegen die Schwellenlogik zu prüfen, die L3 und N2 voraussetzen	theoretisch, zu prüfen
FORSCH-PROV0420 messbarkeit-rahmentheorie	Rekonstruierbarkeit aus wenigen Messkanälen; formaler Rahmen für EP3 und offene Frage 5	methodisch, direkt
FORSCH-PROV0421 skelett-mineralisierung-membran	Membranbiologie als Grundlage bioelektrischer Signalleitung	fachlich, mittelbar
biochemie-zentrales-dogma	biochemische Grundlage für DNA-Rechnen und - Speicher (3.4, V7)	fachlich, mittelbar
kontrollierte-umgebungen	Reinraum- und Laborumgebung als Voraussetzung für V8	fachlich, direkt
elektronische-klangerzeugung	Filterbank und Merkmalsextraktion als Voraussetzung für N3 und V6	technisch, direkt

Anwendungsfelder ohne Strangbezug.

Feld	Anschluss	Charakter
Tragbare Gasmessung (e-Nose)	biologische Olfaktion als Vergleichsmaßstab für Sensorarrays; tierfreie Variante über Rezeptorbasierte Sensorik statt Insektenpräparat	technisch, mittelbar
Peripheriefertigung (additiv, Laser, Textil)	Inkubatorgehäuse, Perfusionshalter, MEA-Fassungen, Faraday-Käfige, Trocknungsformen für Myzelproben	fertigungstechnisch, sofort
Datensouveräne Gesundheitsdaten	Spendermaterial als personenbezogenes Datum; Zero-Knowledge-Logik auf Zelllinienherkunft anwendbar	konzeptuell
Höhenexposition (Stratosphärenballon)	Strahlungsresistenz dehydrierter Pilzmemristoren als prüfbarer Nutzlastfall; Ausgangsbehauptung bislang ohne Primärstudie	experimentell

Die Zeile Peripheriefertigung ist die belastbarste: die vorhandene Kompetenz liegt in der Peripherie, nicht im Substrat. Das ist keine Einschränkung, sondern die Stelle mit dem größten Hebel, weil Peripherie in diesem Feld durchgehend teuer, proprietär und schlecht dokumentiert ist. Verknüpfungen zu gewerblichen Anwendungen stellt dieses Werk nicht her.

10 Experimentprogramm

Acht Experimente, geordnet nach steigender Zugangshürde. Kostenangaben sind Größenordnungen für einen Erstaufbau ohne Arbeitszeit.

Die Beschreibungen nennen Fragestellung, Prinzip, Messgröße, Kontrollen und Größenordnung der Kosten. Sie nennen bewusst keine Verfahrensparameter: Trocknungstemperaturen und -dauern, Schichtdicken, Abscheidungs- und Strukturierungsparameter, Mischungsverhältnisse, Bezugsquellen und Teilenummern stehen nicht hier. Das ist keine Zurückhaltung gegenüber der Prüfbarkeit — der Befund und die Argumentation stehen vollständig im freien Teil, und wer

widersprechen will, braucht keine Stückliste. Es trennt Befund von Nachbau.

Kennung	Versuch	Stufe	Kostenrahmen	Rechtsstatus	Ethikstatus	tierfrei
V1	Myzel-Memristor-Bank	0	500-1500 €	keine Beschränkung	unbedenklich	ja
V2	Physarum-Reservoir	0	200-600 €	keine Beschränkung	unbedenklich	ja
V3	Offene MEA-Hardware	0	1500-4000 €	keine Beschränkung	unbedenklich	ja
V4	Vergleich tierfreier Matrices (Literaturstufe)	0	Arbeitszeit	keine Beschränkung	unbedenklich	ja
V5	Aktuatorik ohne Tierzellen	0	300-1000 €	keine Beschränkung	unbedenklich	ja
V6	Spekro-temporale Kodierung auf einer Organoid-Plattform	1	Arbeitszeit, ggf. Plattformgebühr	Rechtsraum des Betreibers	Ethikstatus der Plattform vorab dokumentieren	offen, Auskunft des Betreibers nötig
V7	DNA-Kodierung mit physischer Endkontrolle	2	300-2000 €	keine Beschränkung bei synthetischen Oligos	unbedenklich	ja
V8	Wetware mit eigener Kultur	2	offen	BSL-2, Rechtslage offen	Vorsorgeprotokoll L3	nur mit Kette nach N1

Stufe 0 — genehmigungsfrei, tierfrei, Werkstatt

V1 — Myzel-Memristor-Bank. *Frage:* Wie streuen memristive Kennlinien über Substrat, Spezies, Trocknungsgrad und Elektrodenmaterial? *Aufbau:* Getreide- oder Hanfsubstrat, Speisepilzkultur, Elektroden aus Edelstahl und aus PEDOT:PSS-beschichtetem ITO, Trocknungsstufen definiert, I-V-Kennlinien über Frequenz und Amplitude. *Messgröße:* Fläche und Symmetrie der gequetschten Hystereseschleife, Retention über Zyklen, Streuung zwischen Proben. *Beitrag:* Die publizierte Arbeit zeigt Machbarkeit an wenigen Proben. Eine Streuungsstudie mit standardisiertem Trocknungsprotokoll und offenem Datensatz fehlt. *Bedarf:* Funktionsgenerator, Oszilloskop oder Messkarte, Feuchtekammer. 500-1500 €. *Recht:* keine Beschränkung. *Ethik:* unbedenklich.

V2 — Physarum-Reservoir. *Frage:* Taugt die Netzwerktopologie als Reservoir für eine zeitliche Klassifikationsaufgabe? *Aufbau:* Agarplatte, Haferflocken als Attraktoren, Elektrodenraster, Auslesung der Widerstandsmatrix über Zeit, digitaler Ausleseklassifikator. *Messgröße:* Trennleistung gegenüber Zufalls-Baseline und gegenüber Echo-State-Netz gleicher Auslesegröße. *Beitrag:* Direkter Beleg zur These aus ≥0393. Deutschsprachige Literatur praktisch nicht vorhanden. *Bedarf:* 200-600 €. *Recht/Ethik:* unbedenklich.

V3 — Offene MEA-Hardware. *Frage:* Lässt sich eine transparente MEA mit werkstattüblichen Mitteln in ausreichender Qualität herstellen? *Aufbau:* ITO-beschichtetes Glas, Strukturierung, PEDOT:PSS-Abscheidung auf den Kontaktflächen, Trägerplatine, Anbindung an Intan-Headstage, Erfassung über Open-Ephys-Kette; Validierung zunächst an Pilz- und Physarum-Proben, nicht an Zellkultur. *Messgröße:* Impedanz je Elektrode, Rauschgrundwert, Übersprechen. *Beitrag:* Die offenen Bauanleitungen (transparente MEA; OpenMEA) sind publiziert, aber selten unabhängig nachgebaut. Ein dokumentierter Nachbau mit Abweichungsbericht ist ein eigenständiger Beitrag und die Voraussetzung für alles Weitere. *Bedarf:* 1500-4000 € je nach Headstage. *Recht/Ethik:* unbedenklich.

V4 — Systematischer Vergleich tierfreier Matrices (Literaturstufe). *Frage:* Welche xenofreien Matrices sind für neurale 3D-Kultur mit elektrophysiologischem Endpunkt belegt, welche nur behauptet? *Aufbau:* Vollständige Recherche, Extraktionsraster (Matrix, Zelltyp, Endpunkt, Vergleichsarm, Chargenzahl, Finanzierung, Interessenlage), Bewertungsstufen. *Ergebnis:* Publikationsfähiges Review plus Laborprotokollentwurf für N1. *Bedarf:* nur Arbeitszeit. *Recht/Ethik:* unbedenklich.

V5 — Aktuatorik ohne Tierzellen. *Frage:* Welche Aktuatorleistung ist mit hygromorphen und myzelbasierten Verbunden gegenüber Muskelaktuatoren erreichbar? *Aufbau:* Feuchtegetriebene Faserverbunde und Myzelkomposite, 3D-gedruckte anisotrope Träger, Messung von Hub, Kraft, Zyklenzahl, Zeitkonstante. *Messgröße:* Arbeit pro Zyklus, Leistungsdichte, Ermüdung, Vergleich gegen publizierte Muskelwerte. *Beitrag:* Der Vergleich wird in der Biohybridliteratur nicht geführt, weil die Communities getrennt sind. Ergebnis kann auch negativ ausfallen und ist dann ebenso publikationswürdig. *Bedarf:* 300-1000 €, überwiegend vorhandene Fertigung.

Stufe 1 — Fernzugang, fremde Infrastruktur

V6 — Spekro-temporale Kodierung auf einer Organoid-Plattform (N3). *Frage:* Erzeugen Organoide unterscheidbare Antwortmuster auf spekro-temporal kodierte Audioreize, und liegt die Trennleistung im Substrat? *Aufbau:* Merkmalsextraktion lokal (Filterbank, Onset-Detektion, Modulationsspektrum), Abbildung auf acht Stimulationskanäle, Aufzeichnung über die Plattform-API, Auswertung offline. Drei Stufen: Onset, Timbre bei gleicher

Tonhöhe, Rhythmusmuster. *Kontrollen*: identischer Klassifikator auf zeitlich permutierten Reizen; identischer Klassifikator auf Leerkanal-Aufzeichnungen; Reservoir-Baseline gleicher Auslesekomplexität. *Messgröße*: Klassifikationsgenauigkeit gegen alle drei Kontrollen, Trennschärfe je Stufe. *Beitrag*: Unbesetzte Modalität, nutzt vorhandene Audiokompetenz, direkt anschlussfähig an das publizierte Braille-Protokoll. *Zugang*: Ausschreibung um Freiplatz, sonst Abo. Ethikstatus der Plattform ist vorab zu dokumentieren, nicht vorauszusetzen. *Bedarf*: Arbeitszeit plus ggf. Plattformgebühr. *Vorbehalt L2*: Die Kulturkette der Plattform (Matrix, Medium, Zusätze) ist vor der Anmeldung schriftlich zu erfragen. Enthält sie tierische Bestandteile, ist V6 nach Leitplanke L2 nicht durchführbar; der Benchmark aus N3 läuft dann auf den tierfreien Reservoiren aus V1 und V2.

Stufe 2 — kooperationsabhängig

V7 — DNA-Kodierung mit physischer Endkontrolle. *Frage*: Wie verhält sich eine selbst entworfene Kodierung mit Fehlerkorrektur bei realer Synthese und realem Auslesen? *Aufbau*: Encoder/Decoder lokal, kurze Oligos kommerziell bestellt, Auslesung über Sequenzierdienstleistung oder Nanopore-Kooperation. *Messgröße*: Rohfehlerrate je Base, Wiederherstellungsrate nach Korrektur, Kosten je Kilobyte. *Bedarf*: 300–2000 € je nach Länge und Auslesung.

V8 — Wetware mit eigener Kultur. Erst nach V1–V6 und nur unter drei Bedingungen: dokumentierte Laborkooperation mit passender Sicherheitsstufe, Matrixkette nach N1, Vorsorgeprotokoll nach L3. Ohne diese drei Punkte ist der Schritt weder rechtlich noch nach den eigenen Regeln zulässig.

Reihenfolgeempfehlung: V4 und V1 parallel starten. V4 ist reine Schreibtischarbeit mit unmittelbarem Publikationsziel, V1 liefert die erste eigene Messreihe und erzeugt den Hardwarebedarf, den V3 dann deckt. V6 wird erst angemeldet, wenn V3 die Auswertekette belegt und der Plattformbetreiber die Tierfreiheit der Kulturkette bestätigt hat; andernfalls läuft der Benchmark aus N3 auf den Reservoiren aus V1 und V2.

11 Offene Fragen

- 1. Existiert eine Lernvorschrift für dissoziierte und organoide Netze, die nicht auf Reservoir plus digitalem Ausleseklassifikator hinausläuft? [0]
- 2. Wie groß ist der tatsächliche Energiebedarf eines Wetware-Systems inklusive Life-Support pro gelöster Aufgabe? Belastbare Zahlen fehlen. [0]
- 3. Verschiebt der mehrjährige Entwicklungstakt (Nature, 08/2026) die Vorsorgeschwelle, und wenn ja, gemessen woran? [0]
- 4. Sind xenofreie Matrices für zerebrale Organoide elektrophysiologisch gleichwertig? Für Gefäßorganoide belegt, hier offen. [0]
- 5. Ab welcher Elektrodendichte kippt die Ausleseseite von Stichprobe zu Zustandsschätzung? [0]
- 6. Lässt sich Strahlungsresistenz dehydrierter Pilzmemristoren unter realer Höhenexposition bestätigen? [0]
- 7. Welche österreichischen und unionsrechtlichen Bestimmungen gelten konkret für humane iPSC-Kultur ohne gentechnische Veränderung, und wo endet die Analogie zur Gewebesicherheit? — Vorrecherche 09/2026 (keine Rechtsauskunft): Für Kultur ohne gentechnische Veränderung im nicht-klinischen Labor stehen Arbeitnehmerschutz (ASchG § 40 Abs. 5, Verordnung biologische Arbeitsstoffe) und Datenschutz (DSGVO Art. 9) im Vordergrund; Gewebesicherheitsgesetz und Gentechnikgesetz greifen nach Wortlaut nicht, Letzteres jedoch bei jeder genetischen Veränderung. Offen bleiben Risikogruppe, Gewinnungsphase und Einwilligung im Einzelfall; vor jeder Wetware-Arbeit fachkundig zu bestätigen. [0]
- 8. Ist die Kulturkette der verfügbaren Organoid-Fernplattformen (Matrix, Medium, Zusätze) tierfrei? Öffentliche Angaben der Betreiber nennen Matrix, Serum und Zusätze nicht [S]. Ohne schriftliche Auskunft des Betreibers ist V6 nach Leitplanke L2 nicht durchführbar. [0]

12 Quellen

Auswahl der tragenden Belege. Vollständige Verifikation in der Verifikationsliste im Ordner [werk/](#).

Kurzbeleg	Gegenstand	Kennung	Status
Ward-Cherrier, Liu et al.	Braille-Kodierung mit Organoiden, 61 %/83 %	arXiv:2508.20850	[P] Preprint, v2 02/2026
LaRocco et al. 2025	Shiitake-Myzel-Memristoren	doi:10.1371/journal.pone.0328965	[P]
Faravelli, Antón-Bolaños et al. 2026	mehrfähriger Entwicklungstakt in Organoiden	doi:10.1038/s41586-026-10877-x	[P]
Gazzola et al. 2026	neuronale Reservoirregelung eines biohybriden Arms	doi:10.1073/pnas.2522094123	[P]

Wolff et al. 2025	Matrigel-Ersatz, Hürden und Alternativen	doi:10.1002/advs.202508734	[P]
Scientific Reports 2025	tierfreie Matrices für hiPSC-Gefäßorganoide	doi:10.1038/s41598-025-20091-w	[P]
Science Advances	autonomer DNA-Motor auf Origami-Bahn	doi:10.1126/sciadv.adi8444	[P]
Adamatzky et al. 2020/2022	boolesche und elektrische Gatter in Pilzkolonien	Biosystems 193:104138; Log. Univers. 16(4)	[P]
Hartung, Smirnova et al. 2023	Programmartikel Organoid Intelligence	doi:10.3389/fsci.2023.1017235	[P]
Jordan et al. 2024	Neuroplattform, offener Fernzugang	doi:10.3389/frai.2024.1376042	[P]
Patterns 2025	Gegenposition zur Bewusstseinskepsis	S2666-3899(25)00213-2	[P]
Asia Pacific Neuroethics WG 2026	Konsensempfehlungen zu Hirnorganoiden	doi:10.1007/s41649-025-00398-6	[P]
Le et al. 2026	Übersicht terrestrische Cyborg-Insekten	doi:10.1002/aisy.202501119	[P]
Shvil, Ayali et al. 2026	Sniffbot, biohybride Geruchslokalisierung	bioRxiv 10.64898/2026.02.17.706375	[P] Preprint
npj Robotics 2025/2026	biohybride Aktuatorik, weiche Elektronik	doi:10.1038/s44182-025-00049-w; ...-026-00072-5	[P]
ACS Nano	3D-gedruckte Mikrogefäßgitter für Organoide	doi:10.1021/acsnano.4c07844	[P]
JACS Au 2026	DNA-Origami, Stand und Grenzen	doi:10.1021/jacsau.5c01315	[P]
OECT-Übersicht 2026	OECT-Neuronen, 175 nJ/Spike	PMC12902651	[P] (Zeitschriften-DOI offen)
Castro et al. 2026	biohybride Sehnen, 109,6 nW/mg	doi:10.1002/advs.202512680	[P]
Huang et al. 2025	Insektensonde, Lenkung und Geruchserkennung	doi:10.1002/admt.202501158	[P]
Taniguchi et al. 2025	Fibrin-Laminin-511-Chimäre, hiPSC in 3D	doi:10.1016/j.matbio.2025.10.003	[P]
ISSCR 2021	Leitlinien, Organoide Kategorie 1A	Stem Cell Reports S2213-6711(21)00263-0	[P]
Xu et al. 2016	organische Synapse, fj-Bezugswerte	doi:10.1126/sciadv.1501326	[P]
arXiv 2024	CMOS-Spiking-Neuron 1,6 fj/Spike	arXiv:2408.07734	[P] Preprint

Nicht zitiert werden: Herstellerblogs als Beleg für Leistungsaussagen, Nachrichtenaggregatoren, Social-Media-Beiträge. Wo im Text Herstellerangaben stehen, sind sie als [S] gekennzeichnet und als Angabe eines Interessenträgers ausgewiesen.

13 Glossar

Begriff	Bedeutung in diesem Werk
Assembloid	Verbund mehrerer regionsspezifischer Organoide oder Organoid plus Fremdzelltyp
Biohybridik (B2)	technisches System mit lebender Komponente als Aktuator, Sensor oder Regler
hiPSC	humane induzierte pluripotente Stammzellen
MEA	Mikroelektrodenarray
Memristanz	widerstandsartiges Bauteilverhalten mit Vorgeschichtsabhängigkeit, erkennbar an gequetschter Hystereseschleife
Reservoir Computing	Ansatz, bei dem ein festes dynamisches System Merkmale erzeugt und nur die Ausleseschicht trainiert wird
Substratrechnen (B3)	Rechenvorgang findet im biologischen Medium statt
Wetware	lebende neuronale Netze als Rechenmedium
xenofrei	ohne Bestandteile tierischen Ursprungs in der gesamten Kulturkette
p/6	Verhältnis von Risikoträgerschaft zu Verfügungsgewalt (FORSCH-0083)