

Systematische Untersuchung des Forschungsstands biointelligenter Systeme

Systematic investigation of the state of research into biointelligent systems

Carl Simon^{1,*}, Yevgeni Paliyenko¹, Dr. Ing. Daniel Roth¹, Prof. Dr. Ing. Matthias Kreimeyer¹

¹ University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial Design (IKTD)

* *Korrespondierender Autor:*

Carl Simon
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Deutschland
☎ +49 711 685 69861
✉ carl.simon@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract

The current developments towards sustainability are causing structural and technological changes in how we create value. Biointelligence is a recent innovation that combines biology, hardware and software to create powerful, efficient and sustainable technological solutions. Despite its importance and potential, the research domain of biointelligent systems is still in its early stages. The theoretical foundations, methodological approaches and classifications of biointelligent systems are yet to be developed. This article analyses the current state of research by conducting a systematic literature review. Additional findings from industry best practices and literature provide insights into the current structural and value creation logics of biointelligent systems.

Keywords

Biointelligent, biotechnical systems, sustainability, definition, Meta-analysis

1. Motivation

Unternehmen und Gesellschaft befinden sich inmitten tiefgreifender Transformationsprozesse, die durch den Klimawandel, den politischen Handlungsdruck zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen und den rasanten technologischen Fortschritt getrieben werden. Ins Zentrum zukünftiger Innovationsstrategien rückt dabei zunehmend das Konzept der Biointelligenz als neuartiger, systemischer Lösungsansatz [1]. Biointelligenz beschreibt hierbei die konvergente Verbindung von biologischen Prinzipien, technischen Artefakten und datengetriebener Informationstechnik. Mittels dieser Integration entstehen Systeme die zugleich ressourceneffizienter, robuster und leistungsfähiger sind [2]. Zusätzlich unterstreichen politische und technologische Initiativen wie der European Green Deal, New Food oder Strategien in internationalen Innovationsökosystemen (bspw. Bio-MADE, ARMI BioFabUSA) die Relevanz der biointelligenten Systeme.

Biointelligente Systeme zeichnen sich durch die Kombination biologischer, digitaler und mechatronischer Komponenten aus und sind fähig, auf externe Reize adaptiv, selbstorganisiert und effizient zu reagieren [3], [4]. In ihrer konkreten Ausgestaltung können sie sowohl physisch-biologische Intelligenzformen integrieren (z. B. lebende Zellen, Mikrobiota, neuronale Netzwerke), als auch bioinspirierte Konzepte wie modulare Anpassungsfähigkeit, Schwarmverhalten oder stochastische Entscheidungslogik abbilden [5], [6].

Erste vielversprechende Anwendungsfelder biointelligenter Systeme zeigen sich bereits in Bereichen wie der bioinspirierten Fertigung, biohybriden Robotik, der regenerativen Medizintechnik oder in adaptiven Umweltsensoriksystemen [7], [8]. Dabei ergeben sich potenzielle Mehrwerte nicht nur innerhalb einzelner Systemgrenzen, sondern entlang gesamter Wertschöpfungsketten: etwa durch biologische Selbstheilung, Regenerationsfähigkeit, sowie durch eine hohe ökologische und funktionale Anpassungsfähigkeit [9]. Prototypische Anwendungen wie Smart Biomanufacturing Devices und biohybride Sensor-Aktor-Systeme demonstrieren bereits heute, wie biologische Funktionsträger (z. B. Bakterien, Organoide) mit digitalen und KI-gestützten Steuerungseinheiten verschaltet werden können, um neue Formen kybernetischer Systemleistung zu erreichen [3], [7].

2. Problemstellung und Zielsetzung

Ungeachtet der hohen Relevanz und des erheblichen Potenzials befindet sich das Forschungsfeld der biointelligenten Systeme noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Die theoretischen Fundamente, methodischen Vorgehensweisen sowie Klassifikationen biointelligenter Systeme sind bislang nur fragmentarisch ausgearbeitet [1], [5]. Auch fehlt es an einer kohärenten Begrifflichkeit, einheitlichen Modellierungen und übergreifenden Ordnungsrahmen, die eine systematische Einordnung existierender Forschungsbeiträge und technologischer Realisierungen ermöglichen [10].

Biointelligente Systeme unterscheiden sich grundlegend von konventionellen technischen Systemen wegen der zusätzlichen biologischen Komponenten. Während klassische technische Systeme primär durch deterministische Struktur-Funktions-Zusammenhänge geprägt sind, erfordern biointelligente Systeme ein tiefes Verständnis zufälliger biologischer Mechanismen. Die Interaktion zwischen lebenden Organismen und technischen Systemen generiert eine Vielzahl an organisatorischen, technischen und methodischen Herausforderungen. Dazu gehört bspw. der Informationsaustausch, die Lebensdauer der Organismen, die Reproduzierbarkeit sowie ethische Rahmenbedingungen [3], [11]. Besonders kritisch ist die Entwicklung robuster Schnittstellen für bidirektionale Interaktion zwischen biologischen und technischen Modulen [4].

Gleichermaßen fehlen derzeit geeignete Werkzeuge zur Analyse, Modellierung und Validierung solcher Systeme. Bestehende Ansätze sind entweder domänenspezifisch (z. B. biomedizinisch, mechatronisch) oder zu abstrakt, um konkrete Entwicklungsprozesse und Systemkonfigurationen in der Praxis zu unterstützen [1]. Auch potenzielle ökologische und funktionale Wertschöpfungsmechanismen, etwa biologische Selbstheilung, ressourcenschonende Adaptivität oder regenerative Systemarchitekturen, wurden bislang nur punktuell untersucht.

Aufgrund der fehlenden methodischen Kompetenzen, finanziellen Ressourcen oder standardisierter Entwicklungsprozesse können viele Unternehmen die Potenziale biointelligenter Systeme derzeit nicht erschließen [1], [3]. Die Folge ist eine geringe Diffusion entsprechender Technologien sowie ein Mangel an industriell skalierbaren Pilotanwendungen. Daher ist es notwendig, biointelligente Systeme einer Analyse zu unterziehen und ihre wesentlichen Ausprägungen zu identifizieren. Auf dieser Grundlage gilt es zu ermitteln, wie zukünftige Methoden, Modelle und Werkzeuge für deren Entwicklung gestaltet sein müssen.

Demzufolge ist das Ziel dieses Beitrags, den aktuellen Forschungsstand und Stand der Technik im Bereich biointelligenter Systeme systematisch zu untersuchen und die folgenden Forschungsfragen zu beantworten: *Welche konstitutiven Eigenschaften und Ausprägungen kennzeichnen biointelligente Systeme?*

3. Datenerhebung und Analyse

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wird ein mehrstufiges, qualitativ-analytisches Vorgehen verfolgt, das sowohl theorie- als auch praxisbasierte Erkenntnisse integriert. Im ersten Schritt wird eine systematische Literaturrecherche durchgeführt, um den aktuellen Stand der Forschung zu biointelligenten Systemen zu erfassen. Die Recherche umfasst Fachartikel, -beiträge und -berichte aus den relevanten Fachbereichen wie Biologie, Ingenieurwissenschaft oder Medizintechnik. Es wurden dabei die vier wissenschaftlichen Datenbanken Scopus, IEEE, ScienceDirect und Web of Science gewählt, um sicherzustellen, dass möglichst die gesamte vorhandene Literatur gesichtet wird. Ziel ist es, zentrale Begriffe, Konzeptualisierungen, Systemverständnisse und Anwendungsfälle zu extrahieren und in ein übergreifendes Ordnungsraster zu überführen.

Die systematische Literaturrecherche wurde im Mai 2025 nach dem Vorgehen von Biedermann et al. (2016) durchgeführt. Die dabei verwendeten Suchparameter sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Auswahl der Suchparameter basiert auf einer vorrausgegangenen breiten Recherche des Themengebiets und einer anschließenden iterativen Optimierung des Suchstrings, basierend auf der Qualität der jeweiligen Ergebnisse.

Tabelle 1: Suchparameter der systematischen Literaturrecherche

| Leitfrage | Welche Eigenschaften zeichnen ein biointelligentes System aus? | | |
|---------------------------|---|--------------|---------|
| Datenbanken | IEEE, ScienceDirect, Scopus, Web of Science | | |
| Publikationen | Monografien, Sammelwerke, Buch-, Konferenzbeiträge, Fachzeitschriftenaufsätze | | |
| Suchbegriffe und Synonyme | biointelligent | intelligent | system |
| | biointelligence | intelligence | product |
| | bioinformatics | smart | design |
| | bioinspired | agile | |
| | biologicalisation | adaptive | |
| | biologically-inspired | | |
| Prüfschema | 1. Titel, Keywords → 2. Abstrakt und Zusammenfassung → 3. Voller Beitrag | | |
| Suchstring | TITLE (bioi* OR biolo*) AND ABS (smart OR intelligen* OR agile OR adaptive) AND ABS (system OR product OR design) | | |

Die mehrstufige Recherche zielt darauf ab, grundlegende Eigenschaften von biointelligenten Systemen zu bestimmen, um ein einheitliches Verständnis zu gewährleisten wie biointelligente Systeme definiert werden und welche Alleinstellungsmerkmale sie von deterministischen Systemen unterscheiden. Zu diesem Zweck wurden vorbereitete Such-Strings verwendet, welche aufgrund der vorwiegend in englisch veröffentlichter Literatur auch ausschließlich englischsprachige Synonyme der relevanten Suchbegriffe enthielten. Der Einsatz von booleschen Operatoren ermöglichte zudem die Berücksichtigung verschiedener Variationen dieser Begriffe.

Die initiale Recherche generierte 3742 Treffer über die vier Plattformen hinweg, welche nachfolgend anhand eines definierten Prüfschemas, wie in Abbildung 1 dargestellt, untersucht wurden. Nach einer ersten Sichtung der Titel wurde die Anzahl der Treffer auf 812 Beiträge aufgrund mangelnder Relevanz für die Forschungsfrage reduziert. Die verbleibenden Publikationen wurden daraufhin anhand ihrer Schlagwörter und Abstracts einer Überprüfung unterzogen, wodurch 554 Treffer in die nächste Analysestufe gingen. Aus den verbleibenden Veröffentlichungen wurden für die Fragestellung der Definition von Biointelligenz 49 Ergebnisse als relevant eingestuft und im Rahmen der Untersuchung als Volltexte mithilfe qualitativer Analysemethoden analysiert.

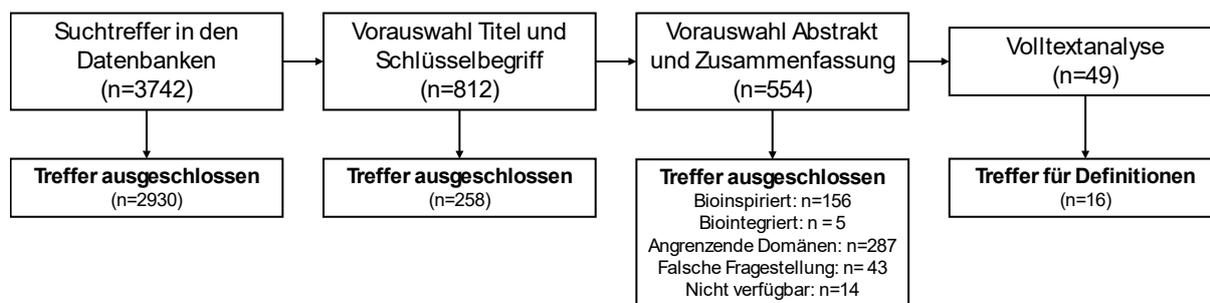


Abbildung 1: Schematische Darstellung der systematischen Literaturrecherche

Auf dieser Grundlage erfolgten nach der Literaturrecherche die Identifikation und Analyse realer Anwendungen biointelligenter und verwandter Systeme aus der Industrie. Hierdurch werden die theoretisch gewonnenen Einblicke anhand konkreter technischer Best-Practices kontextualisiert und validiert. Die Fallbeispiele decken verschiedene Anwendungsdomänen ab, wie biohybride Robotik, synthetische Biologie oder bio-digitale Sensorsysteme.

4. Ergebnisse der Untersuchung

Die Rechercheergebnisse lassen sich in zwei wesentliche Bereiche gliedern: Zum einen wurden 49 Publikationen identifiziert, die sich explizit mit dem Begriff der Biointelligenz befassen. Zum anderen wurden 505 weitere Arbeiten erfasst, die sich zwar nicht direkt mit Biointelligenz, jedoch mit verwandten Konzepten wie bioinspirierten, biohybriden oder biointegrierten Systemen beschäftigen und somit einen wertvollen Kontext für die konzeptuelle Abgrenzung bieten.

4.1. Definitionen

Aus den 49 Ergebnissen konnten insgesamt 16 verschiedene Definitionen des Begriffs Biointelligenz extrahiert werden, die in Tabelle 2 systematisch dargestellt sind. Bemerkenswert ist dabei, dass sieben dieser Definitionen einen konkreten Bezug zur Produktionstechnik aufweisen, was auf eine besondere Relevanz des Konzepts im Kontext industrieller Wertschöpfung hindeutet [3], [12–17]. Auffällig ist zudem die terminologische Dynamik der

Definitionen, wie bspw. in den Arbeiten von Mieke et al. [1], [10], [14–16], [18]. So zeigen sich im zeitlichen Verlauf mehrfache Überarbeitungen und Modifikationen der Definitionen, was die Notwendigkeit einer einheitlichen und belastbaren Begriffsklärung bestärkt.

Sieben Definitionen thematisieren zusätzlich die Integration bzw. die Fusion biologischer Materialien, Prinzipien oder Prozesse in technische Systeme [2], [3], [14], [15], [17], [19], [20]. Diese biologische Integration wird dabei nicht als Selbstzweck verstanden, sondern als funktionale Voraussetzung für die emergente Interaktion zwischen biologischen und technischen Komponenten.

Ein weiterer definitorischer Aspekt betrifft den Begriff der Intelligenz selbst. Zwei Definitionen, u. a. von Byrne et al. (2021), verstehen Intelligenz als inhärenten Bestandteil des Systems, wobei intelligente Paradigmen, wie künstliche neuronale Netze oder adaptive Algorithmen, als integrative Steuerungslogiken wirken. Mieke et al. (2020a) betonen insbesondere die Rolle künstlicher Intelligenz als Vermittlungsinstanz, die den Informationsfluss zwischen biologischen und technischen Domänen orchestriert. In vier weiteren Definitionen wird Intelligenz nicht als expliziter Bestandteil, sondern als emergentes Phänomen der Interaktion zwischen biologischen und technischen Teilsystemen verstanden [3], [18], [20], [21].

In den übrigen Definitionen wird die Intelligenz implizit über die Beschreibung des Gesamtsystems als „biointelligent“ vorausgesetzt, ohne diese Eigenschaft funktional oder strukturell näher zu spezifizieren.

Trotz disziplinärer Unterschiede lassen sich übergreifende strukturelle Gemeinsamkeiten in der Beschreibung von Biointelligenz erkennen. Zentrale Gemeinsamkeit aller Definitionen ist die Interaktion technischer, informationstechnischer und biologischer Systeme. Diese Systemkopplung sowie der damit verbundene bilaterale Informationsaustausch stellen ein konstitutives Merkmal biointelligenter Systeme dar. Dieser Aspekt wird lediglich nur von Shoshi et al. [22] nicht explizit erwähnt.

Tabelle 2: Übersicht der literaturbasierten Definitionen für biointelligente Systeme

| Quellenverweis | Definition |
|----------------------|---|
| Byrne et al. 2021 | Bio-intelligent manufacturing is realised through merging ICT enabled intelligent paradigms with bio-inspired and/or bio-integrated manufacturing solutions, incorporating information channels, sensor and actuator systems. A special form of bio-intelligent manufacturing is when co-existence, mutual interactions and co-evolution of technical, informational and biological elements (or sub-systems) take place, with the potential of converging towards living systems [12]. |
| Emer et al. 2025 | Bio-intelligent Manufacturing represents a new paradigm shift in industrial processes by integrating biological and bio-inspired principles into manufacturing technologies and systems to enhance sustainability and intelligence. This approach involves utilizing biological materials, functions, and structures to optimize manufacturing processes and achieve their full potential [3]. |
| Full et al. 2019 | Interaction describes another form of integration of biological components into technical systems which is characterized by controllable information transfer between the biosphere and technosphere through data processing systems. Such so-called biointelligent systems will probably lead to the most important innovations of the 21 st century [19]. |
| Hauf et al. 2024 | The concept of biointelligence describes the increasing fusion of biology, technology and information technology. [2] |
| Konfo et al. 2024 | In recent years, the emergence of smart bio-systems has introduced a revolutionary approach to [...] quality monitoring. These systems integrate advanced biosensors, biopolymers, and digital technologies to create intelligent solutions capable of real-time, on-site detection of [...] quality parameters [20]. |
| Mächtlen et al. 2024 | “biointeraction” – describes the interaction of information technology, biotechnology, and production technology, resulting in so-called “biointelligent systems” [13]. |
| Mieke et al. 2018 | The complete mergence of bio and technosphere in form of a thorough cross-linking of bio, manufacturing, and information technology referred to as evolvment. The result of this mode is a biointelligent manufacturing system that is designed according to the characteristics of living beings [14]. |
| Mieke et al. 2019 | A system is defined as biointelligent, if it is designed according to the fundamental principles of nature, uses bio-based resources, produces locally and autonomously, is scalable and enables a bilateral information exchange between biological and technical system [1]. |

| | |
|---------------------------------------|--|
| Miehe et al. 2020a | Ein System ist also biointelligent, wenn es eine biologische und eine technische Komponente enthält und diese in Form einer beliebigen Form interagieren (Biologie-Technik-Schnittstelle, BTI) sowie ihre Interaktion im Hinblick auf ein Gleichgewicht mittels Künstlicher Intelligenz geregelt ist [10]. |
| Miehe et al. 2020b | The comprehensive interaction of technical, informational and biological systems leads to the creation of completely new, self-sufficient production technologies and structures, so-called biointelligent manufacturing systems [15]. |
| Miehe et al. 2020c | Finally, the interaction of technical, informational and biological systems enables completely new self-sustaining production technologies and structures that are referred to as biointelligent systems (BIS). The essential levels of integration are the technical, the informational and the biological level [23]. |
| Miehe et al. 2021 | BIS [biointelligent production systems] is the increasing convergence of engineering, life, and information sciences. In the technical (explicit) sense, BIS represent a further development of the concept of cyber-physical systems (CPS) by adding a biological element [16]. |
| Miehe et al. 2023 | The presence of a biological (living) component, interaction with a technical component, the use of information technology and achieving intelligent system behavior are perceived as core features of biointelligence [18]. |
| Panagiotopoulos and Stavropoulos 2023 | Biointelligence manufacturing is addressing the complete merging and synergistical action of biosphere and technosphere, where biosphere includes biomaterials, bioresources and bioprocesses, and technosphere addressing all technological components, processes and systems. Biointelligence manufacturing is in effect a cross-link between biological systems, manufacturing and information technologies, to provide a biointelligent manufacturing system [17]. |
| Shoshi et al. 2023 | Biointelligence was introduced recently as an innovation path towards a sustainable technology future [3]. Its goal is to bring together life, engineering, and computer science to create an innovation space for companies and promote the transition to a sustainable economy [22]. |
| Shoshi et al. 2024 | The convergence of bio-ware, hardware, and software has resulted in biointelligent systems (BIS), which are intelligent systems that emulate the selfregulation and self-optimization mechanisms of natural organisms, resulting in increased efficiency and adaptability [21]. |

Basierend auf der konsolidierten Analyse der vorhandenen Definitionen sowie unter Berücksichtigung disziplinärer Perspektiven lässt sich folgende allgemeingültige Definition ableiten:

Biointelligenz bezeichnet die Interaktion biologischer, technischer und informationstechnologischer Systeme, bei der biologische Komponenten, Prinzipien oder Prozesse in technische Systeme integriert werden und in einem bilateralen Informations- oder Stoffaustausch mit diesen stehen.

Diese Definition vereint zentrale Merkmale der untersuchten Begriffsverwendungen und bietet einen Bezugsrahmen zur weiteren Untersuchung und Entwicklung biointelligenter Systeme. Sie ermöglicht zudem eine konzeptuelle Abgrenzung zu angrenzenden Begriffen wie Biohybridität, Biointegration oder Bioinspiration und bildet die Grundlage für die Klassifikation, Modellierung und methodische Unterstützung entsprechender Systementwicklungsprozesse.

4.2. Vorstellung relevanter Use-Cases

Auf Grundlage der analysierten Definitionen und der daraus abgeleiteten konzeptionellen Grundlage wurden charakteristische Ausprägungen biointelligenter Systeme identifiziert:

- Integration biologischer Elemente (z. B. Biomaterialien, lebende Organismen, biosensorische Strukturen) [3], [13], [19], [20]
- Technische und digitale Komponenten (z. B. KI, Sensorik, Automatisierungssysteme) [2], [13], [18]
- Bilateral funktionierende Schnittstellen für die Interaktion zwischen einem biologischen- und technischen System (Informations- und Stoffaustausch) [1], [12]
- Intelligentes Systemverhalten (z. B. Selbstregulierung, Selbstoptimierung, Lernfähigkeit) [3], [12], [18], [21]

Um das Verständnis dieser konstitutiven Bestandteile zu vertiefen und deren praktische Ausprägung zu veranschaulichen, werden im Folgenden drei repräsentative Use-Cases

vorgestellt. Diese wurden gezielt ausgewählt, da sie exemplarisch zeigen, welche Ausprägungen biologische, technische und informationstechnische Komponenten in realen Anwendungskontexten besitzen können.

Use Case 1 - Biointelligente Nahrungsmittelsensorik [13]: Der erste Use-Case beschreibt die Entwicklung biointelligenter Sensorsysteme zur Echtzeitüberwachung von Lebensmitteln entlang der gesamten Liefer- und Wertschöpfungskette. Ziel ist es, durch den Einsatz biologischer und informationstechnischer Komponenten eine hochsensitive und automatisierte Überwachung von Pathogenen, Verderbnisprozessen und Qualitätsparametern zu ermöglichen.

Die konstitutiven Ausprägungen biointelligenter Systeme sind in diesem Use-Case klar erkennbar. Zunächst erfolgt die Integration biologischer und chemischer Detektionsprinzipien in Form von DNA-/RNA-basierten Biosensoren, Enzymreaktionen oder biologisch aktiven Indikatoren. Diese Sensoren sind fähig, spezifische mikrobiologische Veränderungen zu überwachen und relevante Zielmoleküle wie Toxine, Pathogene oder Gärprodukte zu erkennen. Die biologischen Detektoren sind in „Smart Packaging Systemen“ integriert, die durch digitale Echtzeitverarbeitung mit Monitoring-Plattformen gekoppelt sind. Die bidirektionale Interaktion zeigt sich hier in der Form, dass biologische Sensorik kontinuierlich Daten über die Beschaffenheit des Lebensmittels liefert, welche digital erfasst, verarbeitet und in automatisierte Entscheidungsprozesse (z. B. zum Chargenmanagement, zur Rückverfolgung oder zur Alarmierung) eingespeist werden.

Use Case 2 - Bio-Hybrid Manufacturing Cell (BioMeld) [9]: Der Use-Case BioMeld beschreibt die Entwicklung und prototypische Umsetzung eines autonom agierenden, biohybriden Kathetersystems (Abbildung 2 links) ist. Der Katheter selbst besteht aus zwei Hauptkomponenten: einem steuerbaren Körper aus magnetischem Material und einer Spitze, die als aktives biohybrides Modul fungiert. Es handelt sich dabei um einen weichen Katheter, dessen Biegebewegung durch die kontraktile Kraft künstlich kultivierter Muskelzellen erzeugt wird. Diese Spitze kombiniert biologische Aktoren in Form eines Muskelzellgewebes mit einer elektronischen Einheit, die sowohl für die Stimulation der Muskelzellen als auch für den bidirektionalen Informationsaustausch zuständig ist.

Die charakteristischen Ausprägungen biointelligenter Systeme sind in diesem Anwendungsfall ebenfalls erfüllt. Die Muskelzellen werden in einem integrierten Bioreaktor kultiviert. Die Steuerung des Katheters erfolgt durch eine digitale Logik, die auf bio-inspirierten Algorithmen basiert und kontinuierlich durch sensorisches Feedback angepasst wird. Hierzu kommen organische, transistorbasierte Dehnungssensoren zum Einsatz, die die Bewegung der Katheterspitze in Echtzeit detektieren und als Input für die Steuerung dienen. Diese bidirektionale Kommunikation zwischen biologischer Aktorik, technischer Struktur und digitaler Kontrolle erlaubt eine adaptive Systemreaktion auf externe und interne Stimuli.

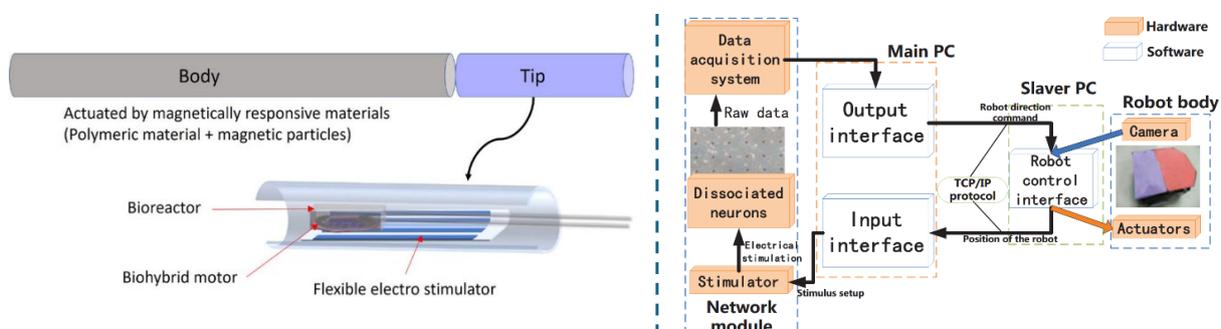


Abbildung 2: Prinzipdarstellung des BioMeld (links) [9] und Neuro-robotischen Systems (rechts) [24]

Use Case 3 - Neuro-robotisches System [24]: Der dritte Use-Case beschreibt ein experimentelles System, in dem biologische neuronale Netzwerke zur Steuerung eines mobilen Roboters eingesetzt werden (Abbildung 2 rechts). Das Ziel ist es, die grundlegende

Funktionalität biologischer Intelligenz, wie etwa das Lernen, die Adaptivität oder die sensorische Integration, direkt in ein technisches System zu überführen. Der Demonstrator koppelt dazu ein kultiviertes neuronales Netzwerk von Ratten auf einem Multi-Elektroden-Array (MEA) mit einem mobilen Roboter, der in einer Umgebung Objekte detektieren und darauf reagieren kann.

Dieser Use-Case erfüllt in hohem Maße die konstitutiven Ausprägungen biointelligenter Systeme: Im Zentrum steht die physische Integration biologischer Intelligenz, konkret lebender Nervenzellen, in ein cyber-physisches System. Der bidirektionale Informationsaustausch zwischen Biologie und Technik wird durch das MEA realisiert: Einerseits empfangen die Neuronen sensorische Eingaben aus der Umgebung über elektrische Signale, andererseits beeinflusst das Lernen die Steuerbefehle des Roboters. Diese dynamische Kopplung stellt sicher, dass das biologische System nicht nur passiver Sensor, sondern aktiver Bestandteil der Entscheidungslogik ist. Hierbei ist die Rolle der neuronalen Plastizität als „künstliche“ Intelligenz im System besonders hervorzuheben. Über Trainingszyklen hinweg verbessert sich das Verhalten des Roboters in der Zielerkennung, was zeigt, dass das System lernfähig und adaptiv ist. Die Steuerleistung des Roboters ist somit nicht ausschließlich algorithmisch determiniert, sondern das Ergebnis einer ko-evolutionären Interaktion zwischen technischem System und biologischem Netzwerk.

5. Schlussfolgerung und Ausblick

Die Analyse der bestehenden Literatur zeigt deutlich, dass eine domänenübergreifende, konsistente Definition des Begriffs Biointelligenz noch nicht vorhanden ist. Dies stellt ein zentrales Hemmnis für die koordinierte Forschung, Entwicklung und industrielle Anwendung biointelligenter Systeme dar. Unterschiedliche Verständnisse erschweren nicht nur die interdisziplinäre Zusammenarbeit, sondern verhindern auch die zielgerichtete Übertragung wissenschaftlicher Erkenntnisse in anwendungsnahe Entwicklungen. Die nun erarbeitete Definition hilft als verbindlicher Bezugsrahmen dabei, ein einheitliches Verständnis von Biointelligenz zu vermitteln und eine systematische Integration biologischer Prinzipien in technische Produkte, Verfahren und Systeme zu erleichtern. Sie wirkt disziplinübergreifend soll die Kommunikation zwischen Akteuren aus Wissenschaft, Industrie, Politik und Gesellschaft erleichtern und schafft somit eine wichtige Grundlage für einen koordinierten Innovationsprozess [18].

Des Weiteren zeigt die Untersuchung der vorgestellten Use-Cases, dass bereits Systeme existieren, die der erarbeiteten Definition von Biointelligenz entsprechen. Sie weisen jene charakteristischen Ausprägungen auf, die im Rahmen der Meta-Analyse relevanter Literatur und Praxis aus angrenzenden Domänen identifiziert wurden. Dadurch wird eine klare Abgrenzung biointelligenter Systeme gegenüber bioinspirierten oder rein biointegrierten Ansätzen ermöglicht. Dies erleichtert künftig eine präzisere Einordnung und Differenzierung des Konzepts der Biointelligenz gegenüber verwandten Themenfeldern.

Die zunehmende Integration biologischer Komponenten in technische Systeme stellt insbesondere die Produktentwicklung vor neue Herausforderungen, da eine zusätzliche, komplexe Disziplin im Entwicklungsprozess mitberücksichtigt werden muss. Klassische Entwicklungsmodelle wie das V-Modell der VDI 2206:2021 oder das Spiralmodell nach Boehm bilden diese Kopplung bislang nicht adäquat ab [10]. Ohne eine gemeinsame Begriffsbasis wäre diese Integration nur fragmentarisch möglich, was insbesondere in frühen Phasen der Konzeption, beim Prototyping sowie im industriellen Scale-up zu erheblichen Ineffizienzen führen kann. Aus methodischer Perspektive sollte der Fokus zukünftiger unterstützender Methoden in der Produktentwicklung stärker auf integrative Ansätze, wie beispielsweise Design for Biointelligence, liegen. Für die Realisierung dieses Vorhabens ist eine Erweiterung etablierter Entwicklungsprozesse um biointelligente Bewertungs-, Simulations- und Validierungsmethoden erforderlich. Die Entwicklung biointelligenter Systeme bedingt

Kompetenzen aus verschiedenen Disziplinen sowohl aus der Industrie und Forschung als auch aus der Politik [18]. Die Implementierung spezifischer Ausbildungs- und Qualifizierungsmaßnahmen, insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen, ist von ebenso hoher Relevanz wie der Aufbau technischer Infrastrukturen, wie beispielsweise digitalisierter Produktionsumgebungen, die die Adaption und Integration biologischer nachhaltiger Prozesse ermöglichen [3], [25].

Der Ausblick auf künftige Entwicklungen macht deutlich, dass Biointelligenz das Potenzial besitzt, als Innovationsmotor in Bereichen wie biohybride Elektronik, Engineered Living Materials oder personalisierte Medizin zu wirken. Gleichzeitig stellen sich Herausforderungen in Bezug auf die Skalierbarkeit, Standardisierung und Wirtschaftlichkeit solcher Lösungen [3]. Eine präzise Begriffsdefinition kann als Wegbereiter fungieren, um Forschung, Entwicklung und industrielle Umsetzung zielgerichtet zu steuern und den Transfer biointelligenter Ansätze in angrenzende Branchen wie die Medizintechnik, Lebensmittelindustrie oder auch Produktionstechnik systematisch voranzutreiben.

Die methodische Unterstützung solcher Entwicklungen steht jedoch erst am Anfang. Neben einem Reifegradmodell sind strukturierende Frameworks zur Wertschöpfungslogik, Komponentenintegration und interdisziplinären Kooperation erforderlich. Für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten empfiehlt sich der Aufbau eines modularen Methodensystems, das bestehende Produktentwicklungsprozesse erweitert und die dynamische Kopplung von Biologie, Technik und IT unterstützt. Hierbei können u. a. biointelligente Referenzarchitekturen, bioinspirierte Modellierungssprachen sowie hybride Testumgebungen entscheidende Beiträge leisten.

Der langfristige Erfolg biointelligenter Systeme hängt maßgeblich von der gezielten Unterstützung industrieller Akteure ab. Es gilt, den Unterstützungsbedarf der Unternehmen systematisch zu erfassen, um daraus explizite Anforderungen an Entwicklungsprozesse, unterstützende Methoden sowie den Betrieb biointelligenter Systeme abzuleiten. Im Fokus sollte dabei die methodische Erweiterung klassischer Entwicklungsmodelle um bio-spezifische Elemente sowie die Entwicklung praxistauglicher Werkzeuge stehen, die eine interdisziplinäre Integration biologischer, technischer und digitaler Komponenten ermöglichen. Darüber hinaus bedarf es geeigneter Betriebskonzepte, die den dynamischen Eigenschaften biologischer Subsysteme Rechnung tragen und deren Überwachung, Wartung und Regelung im industriellen Umfeld sicherstellen.

Literaturverzeichnis

- [1] MIEHE, R.; FULL, J.; SCHOLZ, P.; DEMMER, A.; BAUERNHANSL, T.; SAUER, A.; SCHUH, G.: The Biological Transformation of Industrial Manufacturing-Future Fields of Action in Bioinspired and Bio-based Production Technologies and Organization. In: *Procedia Manufacturing, 25th International Conference on Production Research Manufacturing Innovation: Cyber Physical Manufacturing August 9-14, 2019 | Chicago, Illinois (USA)*. Bd. 39 (2019), S. 737–744.
- [2] HAUF, RONNY; MIEHE, ROBERT; SCHÖLLHAMMER, OLIVER; BAUERNHANSL, THOMAS: Conceptual Thoughts on a Holistic Support Tool for Biointelligence-Related Strategic Decisions in Enterprises. In: *Procedia CIRP, CIRP BioM 2024*. Bd. 125 (2024), S. 160–165.
- [3] EMER, ASJA; DE MARCHI, MATTEO; HOFER, ANGELIKA; MARK, BENEDIKT G.; KERSCHBAUMER, WALBURGA; RAUCH, ERWIN; MATT, DOMINIK T.: Examples of Potential Applications of Bio-intelligent Manufacturing. In: *Procedia Computer Science, 6th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing*. Bd. 253 (2025), S. 2196–2205.
- [4] LUO, ZHIQIANG; WEISS, DARA E.; LIU, QINGYUN; TIAN, BOZHI: Biomimetic approaches toward smart bio-hybrid systems. In: *Nano Research* Bd. 11 (2018), Nr. 6, S. 3009–3030.
- [5] WU, Z.; REDDY, R.; PAN, G.; ZHENG, N.; VERSCHURE, P.F.M.J.; ZHANG, Q.; ZHENG, X.; PRINCIPE, J.C.; U. A.: The convergence of machine and biological intelligence. In: *IEEE Intelligent Systems* Bd. 28 (2013), Nr. 5, S. 28-43.
- [6] BAKHOUYA, M.; GABER, J.: Bio-inspired Approaches for Engineering Adaptive Systems. In: *Procedia Computer Science, The 5th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT-2014), the 4th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2014)*. Bd. 32 (2014), S. 862–869.

- [7] FARLEY, TONI; KIEFER, JEFF; LEE, PRESTON; VON HOFF, DANIEL; TRENT, JEFFREY M; COLBOURN, CHARLES; MOUSSES, SPYRO: The BioIntelligence Framework: a new computational platform for biomedical knowledge computing. In: *Journal of the American Medical Informatics Association* Bd. 20 (2013), Nr. 1, S. 128–133
- [8] LIU, ZHIRONG; HU, JUNHAO; SHEN, GUOZHEN: Bioinspired Intelligent Electronic Skin for Medicine and Healthcare. In: *Small Methods* Bd. n/a, Nr. n/a, S. 2402164
- [9] TETI, ROBERTO; CAGGIANO, ALESSANDRA; BALAZ, IGOR: Bio-intelligent manufacturing cell for bio-hybrid machines fabrication. In: *Procedia CIRP, 17th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (CIRP ICME '23)*. Bd. 126 (2024), S. 865–868.
- [10] MIEHE, ROBERT; BAUMGARTEN, YANNICK; BAUERNHANSL, THOMAS: Biointelligenz. Definition und Kategorisierung - Ein Diskussionspapier. In: *wt Werkstattstechnik online* (2020)
- [11] ROCHFORD, AMY E.; CARNICER-LOMBARTE, ALEJANDRO; CURTO, VINCENZO F.; MALLIARAS, GEORGE G.; BARONE, DAMIANO G.: When Bio Meets Technology: Biohybrid Neural Interfaces. In: *Advanced Materials* Bd. 32 (2020), Nr. 15, S. 1903182
- [12] BYRNE, G.; DAMM, O.; MONOSTORI, L.; TETI, R.; VAN HOUTEN, F.; WEGENER, K.; WERTHEIM, R.; SAMMLER, F.: Towards high performance living manufacturing systems - A new convergence between biology and engineering. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Biological Transformation – Biologicalisation in Manufacturing*. Bd. 34 (2021), S. 6–21.
- [13] MÄCHTLEN, SURYA; BAUMGARTEN, YANNICK; MÜLLER, ALEXANDRA; WOIDASKY, JÖRG; MIEHE, ROBERT: Towards a sustainability-oriented development of biointelligent products. In: *Procedia CIRP, CIRP BioM 2024*. Bd. 125 (2024), S. 201–206.
- [14] MIEHE, ROBERT; BAUERNHANSL, THOMAS; SCHWARZ, OLIVER; TRAUBE, ANDREA; LORENZONI, ANSELM; WALTERSMANN, LARA; FULL, JOHANNES; HORBELT, JESSICA; U. A.: The biological transformation of the manufacturing industry – envisioning biointelligent value adding. In: *Procedia CIRP, 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems*. Bd. 72 (2018), S. 739–743.
- [15] MIEHE, R.; BAUERNHANSL, T.; BECKETT, M.; BRECHER, C.; DEMMER, A.; DROSSEL, W. -G.; ELFERT, P.; FULL, J.; U. A.: The biological transformation of industrial manufacturing – Technologies, status and scenarios for a sustainable future of the German manufacturing industry. In: *Journal of Manufacturing Systems* Bd. 54 (2020), S. 50–61.
- [16] MIEHE, ROBERT; BUCKREUS, LORENA; KIEMEL, STEFFEN; SAUER, ALEXANDER; BAUERNHANSL, THOMAS: A Conceptual Framework for Biointelligent Production—Calling for Systemic Life Cycle Thinking in Cellular Units. In: *ResearchGate* (2021)
- [17] PANAGIOTOPOULOU, VASILIKI C.; STAVROPOULOS, PANAGIOTIS: Developing a methodology for integrating Digital Tools in Biologicalised Manufacturing. In: *Procedia CIRP, 16th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*. Bd. 118 (2023), S. 993–997.
- [18] MIEHE, ROBERT; BAUMGARTEN, YANNICK; BAUERNHANSL, THOMAS: Towards a Common Understanding of the Biointelligence Concept. In: *Procedia CIRP, 56th CIRP International Conference on Manufacturing Systems 2023*. Bd. 120 (2023), S. 1416–1421.
- [19] FULL, J.; MIEHE, R.; KIEMEL, S.; BAUERNHANSL, T.; SAUER, A.: The Biological Transformation of Energy Supply and Storage – Technologies and Scenarios for Biointelligent Value Creation. In: *Procedia Manufacturing, 25th International Conference on Production Research Manufacturing Innovation: Cyber Physical Manufacturing August 9-14, 2019 | Chicago, Illinois (USA)*. Bd. 39 (2019), S. 1204–1214
- [20] KONFO, TÉTÉDÉ RODRIGUE CHRISTIAN; TCHEKESSI, COMLAN KINTOMAGNIMESSÉ CÉLESTIN; BABA-MOUSSA, FARID ABDEL KADER: Status report on innovations and applications of smart bio-systems for real-time monitoring of food quality. In: *Applied Food Research* Bd. 4 (2024), Nr. 2, S. 100546.
- [21] SHOSHI, ARBER; GÜNDÜZ, BETÜL; MIEHE, ROBERT: Identifying intelligent data utilization in bioprocesses: overview of current research activities, opportunities and barriers. In: *Procedia CIRP, 17th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (CIRP ICME '23)*. Bd. 126 (2024), S. 869–874.
- [22] SHOSHI, ARBER; MIEHE, ROBERT; BAUERNHANSL, THOMAS: Conceptual Thoughts on Biointelligent Embedded Systems and Operating Systems Architecture. In: *Procedia Computer Science, 4th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing*. Bd. 217 (2023), S. 969–978.
- [23] MIEHE, R.; HORBELT, J.; BAUMGARTEN, Y.; BAUERNHANSL, T.: Basic considerations for a digital twin of biointelligent systems: Applying technical design patterns to biological systems. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* Bd. 31 (2020), S. 548–560.
- [24] LI, Y.; LI, H.; WANG, Y.: Neural-based control of a mobile robot: A test model for merging biological intelligence into mechanical system. In: , 2014, S. 186–190.
- [25] CHAUDHARY, VISHAL; RUSTAGI, SARVESH; KAUSHIK, AJEET: Bio-derived smart nanostructures for efficient biosensors. In: *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* Bd. 42 (2023), S. 100817