Industrie 4.0, Produktionstechnik, Technologietransfer

Biointelligenz

Definition und Kategorisierung – Ein Diskussionspapier

R. Miehe, Y. Baumgarten, T. Bauernhansl

Prof. Thomas Bauernhansl, Dr. Robert Miehe, Yannick Baumgarten

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart

Tel. +49 (0)711 / 970-1424

robert.miehe@ipa.fraunhofer.de

www.ipa.fraunhofer.de

Die Biointelligenz zählt derzeit zu den am meisten beachteten Innovationspfaden in Deutschland und Europa. Maßgeblich für die Entwicklung der Vision der Biointelligenz sind die jüngsten Erfolge der Bio- und Informationstechnologie. So ist es nicht verwunderlich, dass die wissenschaftliche Gemeinschaft, politische Entscheidungsträger wie auch Vertreter der Industrie dem Thema Biointelligenz geradezu enthusiastisch gegenüberstehen. In der Region Stuttgart-Tübingen haben sich beispielsweise über 40 Wissenschaftler im Kompetenzzentrum Biointelligenz zusammengeschlossen, um das Thema gemeinsam, interdisziplinär voranzubringen. Nicht nur die Bundesregierung, sondern auch verschiedene Landesregierungen, planen umfangreiche Fördermaßnahmen. Auf Ebene der EU-Kommission wird hinter vorgehaltener Hand teilweise sogar der Begriff Industrie 5.0 verwendet. Fakt ist, dass die Biointelligenz enormes Potential für Sprunginnovationen und Standortvorteile in nahezu allen industriellen Branchen eröffnet. Vielfach wird der Begriff jedoch missverstanden, was in letzter Konsequenz dazu führt, dass die Bedeutung ausgehöhlt und damit das Potential für den Wirtschaftsstandort Deutschland unterminiert wird. Für Wissenschaft, Industrie und Politik ist es entscheidend einen Konsens zu finden. Dazu soll dieser Artikel einen Beitrag leisten, indem er die Begriffsherkunft zusammenfasst, einen detaillierten Definitionsvorschlag präsentiert und eine Kategorisierungssystematik erarbeitet.

Biointelligence - Definition and Categorization - A Discussion Paper

Biointelligence is currently one of the most noted innovation paths in Germany and Europe. Crucial to the development of the Biointelligence vision are recent biotech and information technology breakthroughs. It is therefore not surprising that the scientific community, political decision-makers as well as industry representatives are enthusiastic about the subject of biointelligence. In the Stuttgart-Tübingen region, for example, more than 40 scientists have joined forces in the Competence Center Biointelligence to promote the topic in an interdisciplinary fashion. Not only the federal government, but also various state governments are planning extensive support measures. At the level of the European Commission, the term Industry 5.0 is sometimes even used behind closed doors. The fact is that biointelligence opens up enormous potential for break through innovations, leap frogging and competitive advantages in almost all industrial sectors. In many cases, however, the term is misunderstood, which ultimately leads to undermining the meaning and thus undermining the potential for Germany as a business location. For science, industry and politics it is crucial to find a consensus. This article thus aims to contribute by summarizing the term background, presenting a detailed definition and developing a categorization system.

1 Ausgangslage

Nachhaltigkeit im Denken und Handeln bestimmt zunehmende Teile der Gesellschaft und der Entscheidungsfindung in Unternehmen. Dies zeigen nicht zuletzt Beispiele wie die Fridays-for-Future-Bewegung sowie das medienwirksame Abrücken einer Vielzahl von Großkonzernen vom Shareholder Value Ansatz. Auslöser beider Beispiele sind die offensichtlichen Folgen unserer seit Jahrzehnten unbedachten Wirtschaftsweise. Der globale Ressourcenverbrauch stieg alleine in den letzten 30 Jahren um 118 Prozent [1]. Bis 2050 ist im Zuge des Bevölkerungswachstums auf weltweit rund 10 Mrd. Menschen mit einer weiteren Verdopplung zu rechnen [2]. Menschliche Aktivitäten haben bereits eine globale Erwärmung von etwa 1 °C gegenüber vorindustriellem Niveau verursacht [3]. Wenn sie mit der aktuellen Geschwindigkeit weiter

zunimmt, erreicht die globale Erwärmung die im Paris-Abkommen als Grenzwert vereinbarten 1,5 °C wahrscheinlich zwischen 2030 und 2052 [4].

Klar ist, dass es mit heutigen Produktionsmethoden eine gerechte Befriedigung menschlicher Bedürfnisse zukünftiger Generationen, unter Berücksichtigung planetarischer Grenzen, nicht möglich ist. Gleichzeitig muss eine Lösung der Nachhaltigkeitsfrage unter wirtschaftlichen Voraussetzungen in produzierenden Unternehmen möglich sein. Die Industrie ist der Kern der deutschen Volkswirtschaft, ihre Unternehmen in einer exklusiven Position Ort der Verwirklichung dieser Vision zu sein [5,6].

In diesem Kontext bescheinigen verschiedene Experten der Biologischen Transformation ein enormes disruptives Potential, das in den kommenden Jahrzehnten zu gravierenden Veränderungen der industriellen Wertschöpfung führen wird [7-9]. Erstmals systematisch untersucht wurde die Biologische Transformation im Rahmen des BIOTRAIN-Projekts (www.biotrain.info). Das Projekt fußte auf einer umfangreichen Szenario-Analyse, die zwischen November 2017 und Januar 2019 in Form von 123 Experteninterviews und 10 Workshops (mit insg. über 200 Teilnehmern) durchgeführt wurde. Die Ergebnisse des BIOTRAIN-Projekts umfassen eine umfangreich validierte Definition und Vision der Biologischen Transformation, drei Szenarien für eine potentielle Entwicklung in Deutschland, 10 Handlungsfelder mit insg. 200 Forschungs- und 150 Gestaltungsthemen [10].

Laut den Autoren der BIOTRAIN-Untersuchung beschreibt die Biologische Transformation „[…] die zunehmende Nutzung von Materialien, Strukturen, Prozessen und Organismen der belebten Natur in der Technik.“ [10] Dies führt zu einer verstärkten Konvergenz vormals getrennter Technologiebereiche, insb. der Produktions-, Informations- und Biotechnologie. Dabei ist die Biologische Transformation als Prozess zu verstehen, der drei Entwicklungsmodi in Abhängigkeit der Integrationstiefe technischer, biologischer und informatorischer Systeme unterscheidet:

1. Die Inspiration erlaubt es, über Jahrmillionen evolutionär entstandene biologische Phänomene auf Wertschöpfungssysteme zu übertragen. Unternehmen entwickeln mit diesem Ansatz neuartige Materialien und Strukturen (z. B. Leichtbau), Funktionalitäten (z. B. Biomechanik) sowie Organisations- und Kooperationslösungen (z. B. Schwarmintelligenz, neuronale Netze, evolutionäre Algorithmen).
2. Die Integration ermöglicht die Einbindung biologischer Systeme in Produktionssysteme (z. B. Substitution chemischer durch biologische Prozesse). Anwendungsbeispiele dieses Modus sind u.a. die Nutzung von Mikroorganismen zur Rückgewinnung von seltenen Erden aus Magneten, die Funktionalisierung von Polymeren und die Gewinnung von Biokunststoff aus CO_2-Abfallströmen.
3. Die umfassende Interaktion technischer, informatorischer und biologischer Systeme führt zur Schaffung völlig neuer, autarker Produktionstechnologien und -strukturen, sogenannter biointelligenter Wertschöpfungssysteme.

Gerade der dritte Entwicklungsmodus eröffnet enormes Potential für Sprunginnovationen und Standortvorteile in nahezu allen industriellen Branchen. Maßgeblich für die Umsetzung sind die jüngsten Erfolge der Biotechnologie (u.a. CRSPR/Cas, Biocomputing, Nutzbarmachung enzymatischer Prozesse, Bioreaktoren, Biosensorik und –aktorik) und Informationstechnologie (u.a. Machine Learning, Deep Learning, Künstliche Intelligenz) [11-16]. Bild 1 illustriert den Prozess der Biologischen Transformation in Anlehnung an Miehe et al. [17,18].

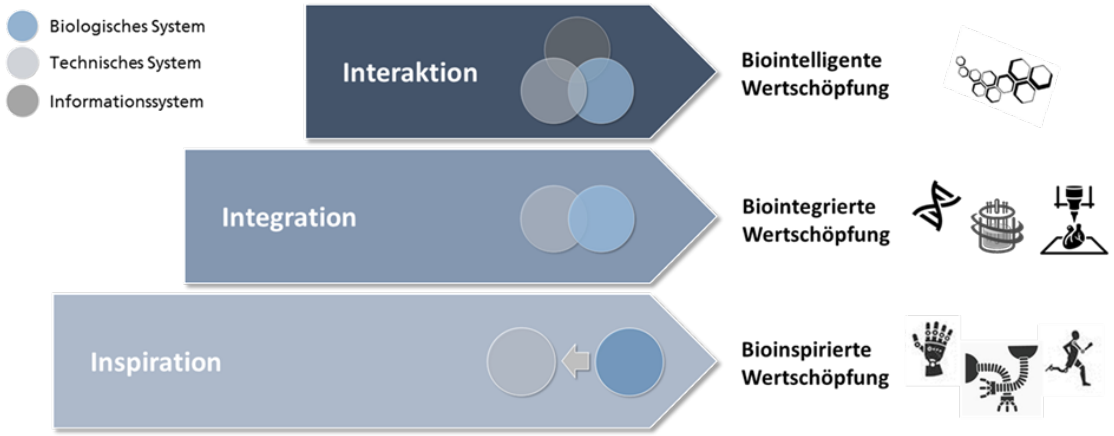

Bild 1 Entwicklungsmodi der Biologischen Transformation nach Miehe et al. [17,18]

Ein kurzer Exkurs: Die Steigerung der Rechnerleistung, gemessen durch die Anzahl der Transistoren (elektronisches Halbleiter-Bauelement zum Steuern niedriger elektrischer Spannungen und Ströme) auf einer Platine, wächst exponentiell. Zum Vergleich: Ein iPhone 4 aus dem Jahr 2010 verfügte bereits über die Rechenleistung des Cray-2 Supercomputers aus dem Jahr 1985, einem Ungetüm von 1 m^3 Größe und 2,5 t Gewicht [19]. Alleine seit dem Jahr 2010 hat sich die Rechnerleistung verachtfacht. Die Geschwindigkeit heutiger Superrechner, gemessen in FLOPS (Anzahl der Gleitkommaberechnungen pro Sekunde), übertrifft die des Jahres 1993 um das 750 Tausendfache. [20] Längst ist vollkommen klar, dass die Rechnerleistung und die damit verbundenen Fortschritte in der Informationstechnik die Grundlage nahezu aller großen Durchbrüche und Innovationen der letzten Jahre war. Ein Beispiel: Einer der größten Erfolge der letzten Jahre in der Molekularbiologie war die Entschlüsselung des menschlichen Genoms im Rahmen des US-amerikanischen Human Genome Projects. Das Vorhaben startete im Jahr 1990. Seit dem Jahr 2003 gilt das menschliche Genom offiziell als entschlüsselt. Seither sanken die Kosten für die Entschlüsselung, getrieben durch die gesteigerte Rechnerkapazität, dramatisch. Konnten im Jahr 2003 für einen US$ 383,35 DNA-Basenpaare sequenziert werden, waren es im Jahr 2015 bereits 33,32 Mio., eine Steigerung um 87 Tausendfache in nur 12 Jahren. [20] Hätte die Entschlüsselung eines menschähnlichen Lebewesens mit rund 3 Milliarden Basenpaaren im Jahr 2003 noch mehr als 7,8 Mio. US$ gekostet, waren es nur etwas mehr als eine Dekade später 90 US$.

Beispiele wie diese zeigen, welchen enormen technologischen Fortschritt die Menschheit in den letzten Jahren realisiert hat. Eine Lösung für das Nachhaltigkeitsproblem haben wir dennoch nicht. Dabei halten wir heute mehr Technologien in unseren Händen, als wir sinnvoll in der Lage sind einzusetzen. Doch gerade der sinnvolle Einsatz ist entscheidend für die Zukunftsfähigkeit unserer Wirtschaft.

Es ist also nicht verwunderlich, dass die wissenschaftliche Gemeinschaft, politische Entscheidungsträger wie auch Vertreter der Industrie dem Thema Biointelligenz geradezu enthusiastisch gegenüberstehen. So haben sich beispielsweise über 40 Wissenschaftler in der Region Stuttgart-Tübingen im Kompetenzzentrum Biointelligenz zusammengeschlossen, um das Thema gemeinsam, interdisziplinär voranzubringen. Ebenso ist das Thema in anderen Regionen Deutschland angekommen (z.B. RheinRuhr). Vielfach wird der Begriff jedoch missverstanden, was in letzter Konsequenz dazu führt, dass die Bedeutung ausgehöhlt und damit das Potential für den Wirtschaftsstandort Deutschland unterminiert wird. Für Wissenschaft, Industrie und Politik ist es entscheidend hier einen Konsens zu finden. Dazu soll dieser Artikel einen Beitrag leisten, indem er die Begriffsherkunft zusammenfasst, einen detaillierten Definitionsvorschlag auf Basis der BIOTRAIN-Vorarbeiten präsentiert und eine Kategorisierungssystematik erarbeitet.

2 Definition der Biointelligenz

Zunächst einmal stellt der Begriff Biointelligenz eine Kombination zweier separater Begriffe dar. Die Vorsilbe Bio stammt aus dem Griechischen und ist ein Synonym für Leben. Der Begriff Intelligenz entstammt dem lateinischen Wort intellegere, das häufig gleichgesetzt wird mit erkennen, einsehen oder verstehen. Während der Wortstamm eindeutig ist, gestaltet sich die Deutung beider Begriffe schwierig.

Der Begriff Intelligenz beschreibt im allgemeinen Sprachgebrauch die kognitive Leistungsfähigkeit eines Menschen, wird umgangssprachlich allerdings häufig gleichgesetzt mit einer rationalen Entscheidungsfindung (d.h. intelligentes Handeln). Eine allgemeingültige Definition des Begriffs existiert nicht. In der Regel wird der Begriff anhand einer Reihe von Merkmalen beschrieben, die ein Untersuchungsobjekt mehr oder weniger zu erfüllen vermag [21]. Gleichwohl stellt die Intelligenz heute nicht länger eine rein menschliche Eigenschaft dar. Vielmehr haben bereits heute Computer die Rechenleistung des menschlichen Gehirns zur Bewältigung einzelner Aufgaben bei weitem übertroffen. Entsprechend prägte McCarthy bereits im Jahr 1956 den Begriff der Künstlichen Intelligenz, dessen Ziel es ist „[…] Maschinen zu entwickeln, die sich verhalten, als verfügten sie über Intelligenz verfügen.“ [22] Aktuelle KI-Systeme sind zwar äußerst gut in der Lage spezifische Aufgaben zu lösen, stehen dem Menschen im Hinblick auf viele weitere Aufgaben allerdings deutlich nach. Laut Bitcom und DFKI stehen heute vier Kernfähigkeiten bei der Entwicklung von KI im Mittelpunkt: Wahrnehmen, Verstehen, Handeln und Lernen. [23] Im Gegensatz zu Systemen der elektronischen Datenverarbeitung (EDV), die nach dem Prinzip Eingabe – Verarbeitung – Ausgabe arbeiten, sind vor allem das Lernen und Verstehen eminente Eigenschaften der KI. Tabelle 1 stellt die Eigenschaften menschlicher Intelligenz denen der Künstlichen Intelligenz in Anlehnung an Helbig [21] gegenüber.

Tabelle 1 Gegenüberstellung wesentlicher Eigenschaften menschlicher und künstlichen Intelligenz in Anlehnung an Helbig [21]

Intelligenz	Künstliche Intelligenz
Wissenserwerb und Erinnerungsvermögen	Knowledge Acquisition, Modellbildung, Wissensmanagement
Einsatz des gespeicherten Wissens und Schlussfolgerung	Reasoning, Inferenz
Abstraktionsfähigkeit und Spezialisierung	induktives Schließen, Deduktion
Planungs- und Problemlösefähigkeit	*
Anpassungsfähigkeit in Echtzeit	*
Lernfähigkeit (Fort- vs. Rückschritt einschätzen)	*
Symbolverarbeitung (Wörter, Zeichen, …)	*
Handlungsfähigkeit in unvollständig beschriebenen bzw. erkannten Situationen	Fuzzy reasoning bzw. Default reasoning, approximatives Schließen
Fähigkeit der Objekt-/Mustererkennung	Besitz von Sensoren & Effektoren, situated AI
Fähigkeit zur Kommunikation (Sprachverarbeitung)	Sprachverstehen und Spracherzeugung

Es wird deutlich, dass KI-Systeme einzelne Eigenschaften menschlicher Intelligenz (teilweise) außerordentlich gut nachahmen können, diese jedoch nicht vollständig nachzubilden vermögen. Im Folgenden wird die Künstliche Intelligenz daher mit der Fähigkeit gleichgesetzt zielgerichtetes Handeln aus einer Situation abzuleiten, d.h. menschliche Intelligenz sehr gut zu imitieren. Ein System kann verschiedene Grade an Intelligenz erreichen, welche abhängen von der Selbstständigkeit, der Komplexität und der Effizienz des Problemlösens. Die Grundbausteine für solche kognitiven Leistungen sind das Wahrnehmen, Verstehen, Handeln und Lernen, wobei vor allem das Lernen als Schlüssel zur Anpassungsfähigkeit an neue Umgebungen gilt. Im weiteren Verlauf wird folgendes Verständnis vorausgesetzt:

Intelligenz im engen Sinne bezeichnet die kognitiven (d.h. erkenntnismäßigen) Fähigkeiten von lebenden Einzelsystemen (d.h. Zellen, Organismen, Menschen). Im weiten Sinne wird der Begriff gleichgesetzt mit der Fähigkeit zu rationalem Handeln. Die Künstliche Intelligenz ist hingegen das gezielte Nachahmen kognitiver Fähigkeiten von lebenden Einzelsystemen durch technische Systeme.

Für das Präfix Bio, gleichzusetzen mit Leben, konnte bis heute ebenfalls keine allgemeingültige Definition präsentiert werden. Bevor eine Definition im Rahmen des Artikels entwickelt werden kann, zunächst einige Grundüberlegungen zum Begriff Leben: Die kleinste Form von Leben ist die Zelle. Eine Zelle enthält alle für das Leben notwendigen Bestandteile und grenzt diese von der Außenwelt durch eine Zellhülle ab. Reist diese Hülle auf, stirbt die Zelle. Alle bekannten Lebensformen bestehen aus mindestens einer Zelle. Die notwendigen Bestandteile innerhalb der Zelle, sind in allen Lebensformen gleich strukturiert. Egal ob Pflanzenzelle, Tierzelle oder Mikroorganismus die wichtigsten Bestandteile bestehen aus Molekülen und erfüllen überall dieselben Aufgaben. Lipide wirken beim Aufbau der Zellhülle, Kohlenhydrate sind Grundlage für den Stoffwechsel und die Nucleinsäuren sind Building Blocks für die Speicherung von Erbmaterial. Die Speicherung des Bauplans und der Organisation des Organismus basiert bei allen Lebensformen auf der Kombination von gerade einmal vier Nucleinsäuren, dem genetischen Code, obwohl chemisch gesehen eine Vielfalt an Nucleinsäuren denkbar wäre. Um Leben von der unbelebten Chemie abzugrenzen wird sich, ähnlich dem Intelligenzbegriff, mit einer Liste von Merkmalen beholfen, die je nach Autor mehr oder weniger Punkte aufführt, im Grunde jedoch die gleichen Aussagen trifft [24,25]. Die Strukturierung von Leben in **Zellen** bedingt einen inneren Zustand **niedriger Entropie**, welcher durch einen andauernden **Energieaustausch** aufrecht gehalten werden kann. Die Energieaufnahme erfolgt über den **Stoffwechsel** basierend auf der Umstrukturierung von **Molekülen**, welche von der Zelle leichter erreicht werden, wenn sie **Informationen** über ihre Umwelt aufnehmen und verarbeiten kann. Ergibt sich aufgrund guter Umweltbedingungen ein **Wachstum** der Zelle bis zur natürlichen Grenze, so kann sich diese teilen, um ihren **genetischen Code** zu verbreiten. Dieses Prinzip der **Fortpflanzung** unterliegt der **Evolution**, bei der nur die am besten angepasste Lebensform überlebt [24,25]. Die aufgeführten Eigenschaften gelten für jegliche Lebewesen auf der Erde. Jedoch gibt es selbst hier Grenzfälle. Kryptobiotische Lebensformen stellen die Definition von Leben vor eine Herausforderung. Tardigrades (Bärtierchen) beispielsweise fahren bei schlechten Umweltbedingungen ihren Stoffwechsel soweit herunter, dass dieser nicht mehr messbar ist. Ein ähnlicher Mechanismus ist bei bestimmten Bakterien beobachtbar. Diese Bakterien bilden bei schlechten Umweltbedingungen Kapseln, in welchen sie ohne messbaren Stoffwechsel überleben. Neben den Kryptobiotischen Lebensformen gelten auch Viren als Grenzfälle. Sie besitzen zwar ihre eigene DNA, können sich jedoch nicht selbst fortpflanzen, sondern benötigen eine Wirtszelle. Daher werden Viren nicht zu den Lebewesen gezählt. Jedoch besitzen beispielsweise Pandoraviren über 90% bislang vollkommen unbekannte Gene. Eine Einordnung nach den oben aufgeführten Kriterien konnte entsprechend noch nicht zufriedenstellend abgeschlossen werden. Entscheidend ist also nicht die Erfüllung einzelner, sondern die Summe aller Eigenschaften. Im weiteren Verlauf wird folgendes Verständnis vorausgesetzt:

Der Begriff Leben beschreibt die Summe von Eigenschaften, die in Gänze erfüllt sein müssen, um ein System von der unbelebten Materie abzugrenzen.

Nachdem die Begriffe Bio und Intelligenz separat diskutiert wurden, nun zum eigentlichen Thema des Artikels: Der Biointelligenz. An erster Stelle ist festzuhalten, dass der Begriff keine Neuerfindung im Rahmen des BIOTRAIN-Projekts war, sondern bereits vorher in den USA geprägt wurde, hier allerdings in einem Kontext, der lediglich in Teilen mit dem unten ausgeführten Verständnis zu tun hat. Die erste bekannte Nennung erfolgt durch Pearce im Jahr 2012 [26]. Dabei beschreibt er, wie sich selbst verbessernde organische Roboter ihren eigenen Quellcode modifizieren und sich selbstständig optimieren. Während die Vision sich selbst verbessernder organischer Roboter bereits Elemente des unten ausgeführten Verständnisses beinhaltet, greift es in Bezug auf den Einsatzzweck und die zeitliche Perspektive im Vergleich zu dem von den BIOTRAIN-Autoren propagierten Verständnis zu kurz. Was also ist die Biointelligenz?

Die Biointelligenz ist ein Wissenschaftszweig, der einen wesentlichen Beitrag zur Lösung des Nachhaltigkeitsproblems in der systematischen informationstechnischen Vernetzung von biologischen und technischen Systemen sieht. Im Vergleich zu anderen Wissenschaftsdisziplinen steht hierbei weniger die Erkenntnis, als die Anwendung im Fokus. Maßgeblich für das Anwendungspotential ist nicht ausschließlich die Wirtschaftlichkeit, sondern ein Gleichgewicht aus ökonomischer, ökologischer und sozialer Vorteilhaftigkeit. Die Biointelligenz kann damit als anwendungsbezogene Wissenschaftsdisziplin verstanden werden.

Unterschieden werden dabei Motiv-Dimension (explizite vs. implizite Bedeutung) und Format-Dimension (eng vs. weit). Während das explizite Verständnis des Begriffs Biointelligenz ein rein technisches ist, also ausschließlich auf die Mikro-Ebene (d.h. Einzelsysteme wie Maschinen, Menschen etc.) fokussiert, stellt die implizite Deutung eine ganzheitliche Sichtweise dar (Makro-Ebene). Anhand dieser Unterscheidungsmerkmale ergeben sich die drei nachfolgend skizzierten Begriffsauslegungen, die gleichermaßen Gültigkeit besitzen.

1. *Explizit-technisches Verständnis der Biointelligenz im engen Sinn*: In diesem Verständnis sieht die systematische informationstechnische Vernetzung von biologischen und technischen Systemen den zielgerichteten Einsatz von Künstlicher Intelligenz vor. Da die Künstliche Intelligenz am ehesten dem oben ausgeführten Verständnis von Intelligenz entspricht und als elementarer Bestandteil autonom agierender, ausgewogener Systeme dient, wäre diese Definition im strengen Sinne die wahrhaftige. 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.

2. *Explizit-technisches Verständnis der Biointelligenz im weiten Sinn*: Nicht immer ist die Nutzung von KI notwendig um ein Biologie-Technik-System hinreichend intelligent zu gestalten. Im weiten Sinne kann ein System also als biointelligent bezeichnet werden es eine biologische und eine technische Komponente enthält und diese in Form einer beliebigen Form interagieren (Biologie-Technik-Schnittstelle) sowie ihre Interaktion in Form einer **herkömmlichen Regelung** (z.B. elektronische Datenverarbeitung nach dem Prinzip Eingabe – Verarbeitung – Ausgabe) reguliert wird.

3. *Implizit-nachhaltigkeitsorientiertes Verständnis der Biointelligenz*: Die Kombination der Begriffe Bio und Intelligenz führt zu einem weiteren, im Subtext mitschwingenden Verständnis: *Der intelligenten Bewirtschaftung biologischer Ressourcen*. Nach dieser Definition ist ein System biointelligent, wenn es sich im **Gleichgewicht** mit seiner lebenden Umwelt befindet, d.h. keine negativen Einflüsse auf die Umwelt ausübt. Im Fall eines Produktionssystems würde dies bedeuten 100%-rezyklierbar/-bioabbaubar, 100%-emissionsneutral (d.h. schädliche Emissionen), 100%-lokale Ressourcen (dezentral) und verschwendungsfrei (keine Transportwege, kein stofflicher Abfall).

Anhand der Verschiedenartigkeit der oben skizzierten Deutungen wird ersichtlich, dass es den einen Biointelligenz-Zustand nicht gibt. Vielmehr kann ein System im Hinblick auf seinen Biointelligenz-Grad bewertet werden. Tabelle 2 fasst die für ein Biointelligentes System entscheidenden Eigenschaften in Form eines morphologischen Kastens zusammen.

Tabelle 2 Kategorisierungssystematik eines biointelligenten Systems

		Erfüllung		Grad der Erfüllung		
Biologische Komponente	Niedrige Entropie	Ja	Nein	-	-	-
	Energieaustausch	Ja	Nein	-	-	-
	Stoffwechsel	Ja	Nein	-	-	-
	Informationsaufnahme und –verarbeitung	Ja	Nein	-	-	-
	Wachstum	Ja	Nein	-	-	-
	Fortpflanzung	Ja	Nein	-	-	-
	Evolution	Ja	Nein	-	-	-
Technische Komponente	Bestehend aus unbelebter stofflich-konkreter Materie (d.h. Werkstoffe mit definierten Eigenschaften)	Ja	Nein	-	-	-
	Nutzenorientierung	Ja	Nein	-	-	-
	Eindeutiges Funktionsprinzip (um Stoff/Masse, Energie und/oder Information zu wandeln, zu transportieren und/oder zu speichern)	Ja	Nein	-	-	-
	Räumliches Gebilde mit geometrisch definierter Gestalt	Ja	Nein	-	-	-
BTI	Bidirektionaler Signal-/Informationsaustausch (in Echtzeit)	Ja	Nein	-	-	-
	Regelung im Hinblick auf ein globales Optimum (Gleichgewichtsorientierung)	Ja	Nein	-	-	-
	KI-Regelung im Hinblick auf ein globales Optimum (Gleichgewichtsorientierung)	Ja	Nein	-	-	-
Intelligenz	Wissenserwerb und Erinnerungsvermögen	Ja	Nein	hoch	mittel	gering
	Einsatz des gespeicherten Wissens und Schlussfolgerungen	Ja	Nein	hoch	mittel	gering
	Abstraktionsfähigkeit und Spezialisierung	Ja	Nein	hoch	mittel	gering
	Planungs- und Problemlösungsfähigkeit	Ja	Nein	hoch	mittel	gering
	Anpassungsfähigkeit in Echtzeit	Ja	Nein	hoch	mittel	gering
	Lernfähigkeit (Fort- und Rückschritt einschätzen)	Ja	Nein	hoch	mittel	gering
	Symbolverarbeitung (Wörter, Zeichen, Formen etc.)	Ja	Nein	hoch	mittel	gering
	Handlungsfähigkeit in unvollständig beschriebenen bzw. erkannten Situationen	Ja	Nein	hoch	mittel	gering
	Fähigkeit der Objekt- und Mustererkennung	Ja	Nein	hoch	mittel	gering
	Fähigkeit zur Kommunikation (z.B. Sprachverarbeitung)	Ja	Nein	hoch	mittel	gering
Ganzheit-lichkeit	Rezyklierbarkeit	Ja	Nein	hoch	mittel	gering
	Bioabbaubarkeit	Ja	Nein	hoch	mittel	gering
	Emissionsneutralität	Ja	Nein	hoch	mittel	gering
	Produktionstechnische Verschwendungsfreiheit	Ja	Nein	hoch	mittel	gering
	Lokalität der genutzten Ressourcen	Ja	Nein	hoch	mittel	gering

	Explizit-technisches Verständnis der Biointelligenz im engen Sinn
	Explizit-technisches Verständnis der Biointelligenz im weiten Sinn
	Implizit-nachhaltigkeitsorientiertes Verständnis der Biointelligenz

Die hier eingeführte Kategorisierungssystematik kann als Kern eines Reifegradmodells für das Biointelligenz-Roadmapping (z.B. für politische Maßnahmen, Förderungen oder strategische Positionierung in Unternehmen) genutzt werden. Ein solches Reifegradmodell könnte widerum zur Bestimmung des Biointelligenz-Grads existierender Technologien und/oder neuer Technologiekonzepte genutzt werden. Deutlich wird dies anhand des von Miehe et al. skizzierten Konzepts der Smart Biomanufacturing Devices (SBMD) [27]. Diese als verteilte, personalisierte und skalierbare Produktioneinheiten beschriebenen Entitäten stellen das Fundament zur Schaffung der neuen technologischen Basis einer nachaltigen Wirtschaft dar. Im Sinne der Konvergenz entstehen sie aus dem Verbund unterschiedlichster vorhandener Einzeltechnologien (z.B. additive Fertigung, Bioprinting, Biosynthese, Bioreaktoren etc.). Bild 2 illustriert ein SBMD-Konzept als Kombination eines Mehrprodukt-Bioreaktors, eines Biodruckers und einer Kommunikationsschnittstelle nach Miehe et al [27].

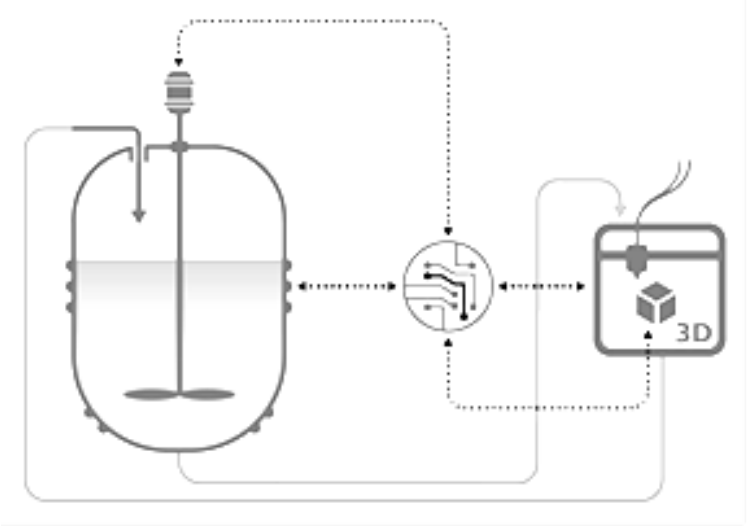

Bild 2 Beispiel eines Smart Biomanufacturing Device nach Miehe et al. [27]

Ein solches Konzept könnte unterschiedliche Grundstoffe vor Ort produzieren, diese in Echtzeit an die Anforderung der Produktion anpassen und vollkommen verschiedenartige Produkte herstellen. Die biologische Komponente wird hierbei durch das Substrat gewährleistet, während die technische Komponente die Anlage an sich ist. Die BTI ist die Kommunikationsschnittstelle, die sowohl im engen als auch im weiten Verständnis realisiert werden könnte. Gleichzeitig werden ein Großteil der Intelligenzkriterien erfüllt (u.a. Anpassungsfähigkeit in Echtzeit, Lern- und Kommunikationsfähigkeit, Wissenserwerb über die Zeit). In diesem Sinne wäre ein solches System als wesentlich biointelligenter einzustufen als die bloße Einzeltechnologie eines Bioprinters.

3 Fazit und Ausblick

Das Thema Biointelligenz zählt derzeit zu den am meisten beachteten Innovationspfaden in Deutschland und Europa. Vielfach wird der Begriff jedoch missverstanden, was in letzter Konsequenz dazu führt, dass die Bedeutung ausgehöhlt und damit das Potential für den Wirtschaftsstandort Deutschland unterminiert wird. Für Wissenschaft, Industrie und Politik ist es entscheidend einen Konsens zu finden. Dazu sollte dieser Artikel einen Beitrag leisten, indem er eine detaillierte Definition präsentiert und eine Kategorisierungssystematik erarbeitet. Die Biointelligenz wird dabei als anwendungsorientierter Wissenschaftszweig verstanden, der einen wesentlichen Beitrag zur Lösung des Nachhaltigkeitsproblems in der systematischen informationstechnischen Vernetzung von biologischen und technischen Systemen sieht. In Abhängigkeit von Motiv- und Format-Dimension werden drei Begriffsauslegungen präsentiert, die für sich genommen gleichermaßen Gültigkeit besitzen. Gründend auf der Feststellung, dass die Biointelligenz nicht als absoluter Zustand verstanden werden kann, präsentieren die Autoren eine Reihe von Eigenschaften, die eine Einordnung des Grads der Biointelligenz ermöglicht. Entscheidend sind dabei das Vorhandensein einer biologischen und einer technischen Komponente, einer Biologie-Technik-Schnittstelle sowie informationstechnisch ausgestalteten Regelung. Diese Kategorisierungssystematik kann Unternehmen, Wissenschaft und Politik als Grundlage einer Klassifikation und einer strategischen Verortung dienen und soll zu der Entwicklung Biointelligenter Systeme beitragen. Die hier präsentierten Ansätze stellen keine finalen Ergebnisse dar, sondern sollen der kritischen Diskussion und spezifischen Weiterentwicklung des Themas in der wissenschaftlichen Gemeinschaft, der Politik, der Industrie und der interessierten Öffentlichkeit dienen.

Literatur

[1] Sustainable Europe Research Institute (SERI) / Vienna University of Economics and Business (WU Vienna) [Hrsg]: Global resource extraction by material category; 1980- 2011. Verfügbar: http://www.materialflows.net/trends/analyses-1980-2011/global-resource-extraction-by-material-category-1980-2011/
[2] Fischer-Kowalski M, von Weizsäcker E, Ren Y, Moriguchi Y, Crane W, Krausmann F, et al.: Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth: Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel. Paris; 2011. ISBN: 978-92-807-3167-5
[3] Intergovernmental Panel on Climate Change [Hrsg.]: 1,5°C Globale Erwärmung - Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger 2018.
[4] Europäische Umweltagentur [Hrsg.]: Energie und Klimawandel. Kopenhagen, 2017. Verfügbar: https://www.eea.europa.eu/de/signale/die-zukunft-der-energie-in-1/artikel/energie-und-klimawandel
[5] Günther, E.; Nowack, M.: CO2-Management von Unternehmen. uwf UmweltWirtschaftsForum 16 2008 (2), S. 49–51.
[6] Reichwald, R.; Piller, F.: Interaktive Wertschöpfung: Open Innovation, Individualisierung und neue Formen der Arbeitsteilung. 2 Aufl. Wiesbaden : Gabler, 2009. ISBN 978-3-8349-0972-5
[7] Zinke, H. In: M. Telgheder: Die Biologisierung der Welt. In: Handelsblatt, 17.09.2009. Verfügbar:

www.handelsblatt.com/technik/forschung-innovation/zukunft-der-industrie-die-biologisierung-der-welt/3260566.html
[8] Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. [Hrsg.]: Die Synthetische Biologie in der öffentlichen Meinungsbildung - Überlegungen im Kontext der wissenschaftsbasierten Beratung von Politik und Öffentlichkeit. Halle, 2015.
[9] Deutsche Akademie der Technikwissenschaften [Hrsg.]: Innovationspotenziale der Biotechnologie. München, 2017.
[10] Bauernhansl, T.; Brecher, C.; Drossel, W.-G.; Gumbsch, P.; ten Hompel, M.; Wolperdinger, M. (Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.) [Hrsg.]: Biointelligenz – Eine neue Perspektive für nachhaltige industrielle Wertschöpfung – Ergebnisse der Voruntersuchung zur Biologischen Transformation zur Biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung (BIOTRAIN). Aachen, Dortmund, Dresden, Freiburg, Stuttgart, 2019, Fraunhofer-Verlag. ISBN 978-3-8396-1433-4
[11] Ayers, A.: Personalized Medicine – Future Impact, Pharma Industry Perspective. Journal of Biomolecular Techniques, 21 (3) 2010.
[12] Gottschalk, U.; Brorson, K.; Shukla, A.A.: The need for innovation in biomanufacturing. In: Nature Biotechnology 30 2012.
[13] Cameron, D.E.; Bashor, C.J.; Collins, J.J.: A brief history of synthetic biology. In: Nature Reviews Microbiology 12 2014.
[14] Altman, R.B.; Dunker, A.K.; Hunter, L.; Ritchie, M.D.; Murray, T.A.; Klein, T.E. (Hrsg.): Biocomputing 2015: Proceedings of the Pacific Symposium. World Scientific Publishing Co., Singapur, 2015.
[15] Guo, W.; Sheng, J.; Feng, X.: Mini-review: In vitro Metabolic Engineering for Biomanufacturing of High-value Products. Computational and Structural Biotechnology Journal 2017.
[16] Zhang, Y.-H.P.; Sun, J.; Ma, Y.: Biomanufacturing: history and perspective. In: Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology 44 (4) 2017, S. 773–784.
[17] Miehe, R.; Fischer, E.; Berndt, D.; Herzog et al.: Enabling bidirectional real time interaction between biological and technical systems: Structural basics of a control oriented modeling of biology-technology-interfaces. Procedia CIRP, 81, 2019, S. 63-68.
[18] Miehe, R. et al.: The biological transformation of the manufacturing industry–Envisioning biointelligent value adding. Procedia CIRP 72 2018, S. 739-743.
[19] Bönsch, R.: Supercomputer für die Hosentasche. VDI Nachrichten, 2017. Verfügbar: https://www.vdi-nachrichten.com/fokus/supercomputer-fuer-die-hosentasche/
[20] Roser, M.; Ritchie, H.: Technological Progress – Empirical Review. https://ourworldindata.org/technological-progress
[21] Helbig, H.: Welträtsel aus Sicht der modernen Wissenschaften. Springer, Berlin, 2018. ISBN 978-3662562871
[22] Ertel, W.: Grundkurs Künstliche Intelligenz. 4. Aufl., Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2016.
[23] Bitkom e. V.; DFKI [Hrsg.]: Künstliche Intelligenz - Wirtschaftliche Bedeutung, gesellschaftliche Herausforderungen, menschliche Verantwortung, Berlin/Kaiserslautern, 2017.
[24] Görtz, H.D.; Brümmer, F.: Biologie für Ingenieure. Spektrum Akademischer Verlag, 2012. ISBN 978-3-662-59607-4
[25] Fritsche, O.: Biologie für Einsteiger: Prinzipien des Lebens verstehen. 2. Aufl., Springer Spektrum, 2015. ISBN 978-3-662-46277-5
[26] Pearce, D.: The Biointelligence Explosion - How recursively self-improving organic robots will modify their own source code and bootstrap our way to full-spectrum superintelligence. 2012. Verfügbar: www.biointelligence-explosion.com
[27] Miehe, R. et al.: The biological transformation of industrial manufacturing–Technologies, status and scenarios for a sustainable future of the German manufacturing industry. Journal of Manufacturing Systems, 54 (2020), S. 50-61.

Bild 1. Entwicklungsmodi der Biologischen Transformation nach Miehe et al. [17,18]

Bild 2. Beispiel eines Smart Biomanufacturing Device nach Miehe et al. [27]

Tabelle 1. Gegenüberstellung wesentlicher Eigenschaften menschlicher und künstlichen Intelligenz

Tabelle 2. Kategorisierungssystematik eines biointelligenten Systems