

Potenzialanalyse und Roadmapping Biointelligenz für Baden-Württemberg



Inhaltsverzeichnis

4 Vorwort

6 Zusammenfassung

10 Hintergrund und Zielsetzung

12 Konzept und Ziele der Biointelligenz

13 Konzept der Biointelligenz

18 Wertschöpfungssysteme in Baden-Württemberg mit Bezug zur Biointelligenz

19 Gesundheitsindustrie

22 Produktionstechnologien/-systeme

25 Materialien

28 Relevanz und Entwicklungspotenziale der Biointelligenz in ausgewählten Themenfeldern

30 Aktive und aktivierende Unterstützungssysteme

37 Biointelligente Produktionssysteme und -technologien für Ernährung und Gesundheit

44 Biointelligente Baumaterialien und Werkstoffe für Konsumgüter

51 Übergreifende Erkenntnisse zu den Themenfeldern

54 Empfehlungen und Aktions-Roadmap

59 Anhang

59 Indikatorikauswertung für die Biointelligenz

59 Publikationen

61 Patente

62 Literaturverzeichnis

67 Impressum



Vorwort

Der Konzeptansatz der Biointelligenz, eine komplexe Verknüpfung aller derzeit bekannten biologiebasierten Innovationsfelder zu einem holistischen Denk- und Handlungsstrang, ist auf den ersten Blick ein schwer zu durchdringendes Themenfeld. Bei näherer Betrachtung und längerer Beschäftigung mit diesem Denkmodell zeigt sich allerdings, dass sich diese zunächst schwer zu durchdringende Vielschichtigkeit schnell wieder auflösen lässt. Unser Planet, seine Ökosysteme und selbst einzelne Organismen stellen höchst komplexe Strukturen dar, die der Mensch schon erforscht, seit er begonnen hat, seinen Lebensraum, dessen Organisationsformen und ihre Wechselwirkungen zu verstehen. Dieses als Lebenswissenschaften zu bezeichnende Forschungsfeld hat viele einzelne, unterschiedliche und sehr heterogene Forschungsgebiete und Teildisziplinen herausgebildet, wie zum Beispiel die Mikrobiologie, die Enzymtechnologie, die Biosensorforschung, die medizinische Forschung, die Ökosystem- und Biodiversitätsforschung, die Biotechnologie und viele andere mehr. Aus jedem einzelnen Forschungsfeld ist eine Vielzahl von technischen, aber auch gesellschaftlichen Innovationen entstanden, und dieser kontinuierliche Innovationsprozess ist noch lange nicht zu Ende.

Nun stellt sich mit den Anforderungen eines zu intensivierenden Klimaschutzes aber eine neue Herausforderung an die Wirtschaft, die sich bis zum Jahr 2030 den 55 Prozent zu reduzierenden CO₂-Emissionen stellen muss. Auch wenn hierbei die Energiewende einen der hauptsächlichen Einsparungsbeiträge liefern soll, so ist auch die stoffliche Wende, verbunden mit einer viel stärkeren, kaskadierten Kreislaufführung von Stoff- und Materialströmen, zu berücksichtigen.



Diese Herausforderung an Wirtschaft und Gesellschaft, gern auch als die „Biologische Transformation der industriellen Wertschöpfung“ bezeichnet, beschreibt die zunehmende Verschmelzung von Biologie, Technik und Informationstechnik. So ergeben sich prinzipiell neuartige und vielfältige Lösungsansätze und Möglichkeiten für Innovationen und Entwicklungen, die alle zu einer nachhaltigen und zukunftsorientierten Wirtschaftsweise beitragen, die aber auch gesellschaftliche Akzeptanz erfordern.

Der Zeitpunkt für die Einführung biointelligenter Entwicklungen ist mehr als passend und gleichzeitig äußerst vielversprechend. Denn die hochgesteckten CO₂-Reduktionsziele fordern grundlegende und revolutionäre Veränderungen: Digitalisierung, Ressourceneffizienz, Kreislaufwirtschaft, um nur einige zu nennen. Kurzum – die Wirtschaft steht vor einem grundlegenden Wandel.

Nachhaltige Produktion und die Veränderung des Konsumverhaltens müssen zu neuartigen Prozessen und Produkten führen. In diesen Zeiten des anstehenden Umbruchs kann die Biointelligenz zu bahnbrechenden Lösungen führen. Am innovationsstarken Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg bestehen durch die Vorleistungen des Kompetenzzentrums Biointelligenz beste Voraussetzungen für die Anwendung der Biointelligenz als entscheidenden Faktor für den Umbau, die Transformation der Wirtschaft. Allerdings muss auch weiterhin gewährleistet sein, dass Wettbewerbs- und Zukunftsfähigkeit unseres starken Industriestandorts erhalten bleiben.

Die Biointelligenz kann in diesem Strukturwandel wichtige Impulse liefern, um Potenziale und Lösungsansätze aufzudecken, und – ebenso wie die Bioökonomie – einen wichtigen Beitrag zu den Nachhaltigkeitszielen des Landes Baden-Württemberg liefern.

Allerdings bedarf es dazu eines abgestimmten Vorgehens und einer konkreten Strategie, wie das Konzept der Biointelligenz umgesetzt werden und so zur Transformation und zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit des Bundeslandes beitragen kann. Vor diesem Hintergrund wurde erstmals eine Potenzialanalyse und der Roadmapping-Prozess Biointelligenz in Baden-Württemberg durchgeführt.

Zusammen mit dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung und auf Initiative der BIOPRO Baden-Württemberg GmbH wurde mit finanzieller Förderung des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg ein Prozess mit dem

Ziel gestartet, gemeinsam mit führenden Akteuren aus Wissenschaft und Wirtschaft auszuloten, welche Innovationspotenziale sich durch die Biointelligenz in drei beispielhaft stehenden Wertschöpfungssystemen Baden-Württembergs aufzeigen lassen, und welche Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung gegeben sein müssen. In einem partizipativen Ansatz wurden so in Workshops zunächst vielversprechende Themenfelder in den relevanten Wertschöpfungssystemen identifiziert und anschließend mit führenden Expertinnen und Experten Entwicklungspotenziale für drei Bereiche der baden-württembergischen Wirtschaft erarbeitet. Diese Ergebnisse und die so erarbeitete Roadmap fanden Eingang in die vorliegende Broschüre.

Ganz herzlichen Dank an dieser Stelle allen Beteiligten für ihre Teilnahme an den Workshops: Sie haben so an dem Prozess mitgewirkt und zur Roadmap Biointelligenz für Baden-Württemberg beigetragen.

Prof. Dr. Ralf Kindervater
BIOPRO Baden-Württemberg GmbH
Geschäftsführung

Zusammenfassung

Hintergrund und innovationspolitische Bedeutung der Biointelligenz

Wirtschaft und Gesellschaft sehen sich mit vielfältigen Herausforderungen konfrontiert, allen voran dem Klimawandel, der Notwendigkeit, fossile Rohstoffe zu ersetzen und sich rasch ändernden Bedarfen, Konsum- und Verhaltensweisen in der Gesellschaft. Selbst innovationsstarke Wirtschaftszweige in Deutschland und Baden-Württemberg befinden sich dadurch unter massivem Veränderungsdruck und haben einen dringenden Handlungsbedarf für eine zukunftsorientierte Transformation. Ein solcher Prozess kann durch die Biointelligenz vorangetrieben werden.

Die Biointelligenz beschreibt die zunehmende Verschmelzung von Biologie, Technik und Informationstechnik. Hieraus ergeben sich weitreichende technische Möglichkeiten für neue Produkte, Prozesse und Materialien für die Anforderungen der Zukunft. Die Biointelligenz beschränkt sich dabei nicht allein auf die Konvergenz von Wissenschafts- und Technikbereichen, sondern erfordert darüber hinaus auch große Veränderungen in Kooperationsstrukturen. Dies ermöglicht den Aufbau neuer, sektorübergreifender Wertschöpfungssysteme und die Annäherung und synergistische Verzahnung von bislang getrennt voneinander agierenden Bereichen der Wirtschaft und Wissenschaft.

Die Biointelligenz kann somit (Sprung-)Innovationen ermöglichen und einen weitreichenden Beitrag zu einer nachhaltigen Wertschöpfung und der Transformation der Industrie leisten. Gerade für den Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg, der sich durch eine mittelständisch geprägte Unternehmenslandschaft, ihre enge

Anbindung an den starken Wissenschaftsstandort und eine hohe Präsenz von innovations- und wertschöpfungsintensiven Wirtschaftssektoren (z. B. Gesundheitsindustrie, Maschinenbau, Automobilbau) auszeichnet, ergeben sich hier große Chancen. Bereits bei der Entwicklung und Umsetzung des Konzepts der Biointelligenz in den vergangenen Jahren nahmen Akteure aus Baden-Württemberg – wie das Kompetenzzentrum Biointelligenz – eine zentrale Stellung ein. Insgesamt bietet der Standort Baden-Württemberg hervorragende Voraussetzungen, um dieses Konzept für zukunftsorientierte Innovationsaktivitäten und die Transformation der Wirtschaft des Landes zu nutzen.

Allerdings fehlen bislang für den Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg die Konkretisierung der Biointelligenz-Potenziale und ein Abgleich mit den Bedarfen und Strategien der Wirtschaftsakteure vor Ort. Zudem ist offen, welche Umsetzungsstrategien in Baden-Württemberg implementiert werden sollten, um das transformative Potenzial der Biointelligenz durch Wissenschaft und Wirtschaft des Landes auszuschöpfen.

Zielsetzung und Ansatz der Studie

Vor diesem Hintergrund wurde die vorliegende Studie durch das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI auf Initiative und in Kooperation mit der BIOPRO Baden-Württemberg GmbH durchgeführt. Sie hatte zum Ziel, gemeinsam mit führenden Beteiligten aus Wissenschaft und Wirtschaft auszuloten, welche Innovationspotenziale sich durch die Biointelligenz in zentralen, beispielhaft stehenden Wertschöpfungssystemen Baden-Württembergs aufzeigen lassen, und welche Voraussetzungen für eine erfolgreiche Um-

setzung gegeben sein müssen. Hierfür wurden in einem partizipativen Ansatz in insgesamt vier Workshops zunächst vielversprechende Themenfelder in relevanten Wertschöpfungssystemen identifiziert. Diese Themenfelder waren:

- „Aktive und aktivierende Unterstützungssysteme“ für das Wertschöpfungssystem Gesundheitsindustrie,
- „Biointelligente Produktionssysteme/-technologien für Ernährung und Gesundheit“ für das Wertschöpfungssystem Produktionstechnologien/-systeme,
- „Biointelligente Baumaterialien und Werkstoffe für Konsumgüter“ für das Wertschöpfungssystem Materialien.

Die ausgewählten Themenfelder stehen exemplarisch für das breite Spektrum möglicher Anwendungsbereiche der Biointelligenz auch in anderen Branchen. Für jedes Themenfeld wurden mit Vertreterinnen und Vertretern aus Forschung und Industrie aus Baden-Württemberg vielversprechende Ansätze für die Biointelligenz identifiziert, ihr Potenzial analysiert und erforderliche Umsetzungsschritte abgeleitet. Auf Basis der erzielten Ergebnisse und Erfahrungen wurden ein Konzept und eine Aktions-Roadmap zur Umsetzung der Biointelligenz in Baden-Württemberg erarbeitet.

Ergebnisse und Empfehlungen

In den Workshops zeigten sich für die ausgewählten Themenfelder vielfältige Anwendungspotenziale der Biointelligenz, die von den baden-württembergischen Teilnehmerinnen und Teilnehmern als sehr relevant eingestuft wurden. Der gewählte partizipative Ansatz erwies sich als äußerst geeignet, um Akteure zu inspirieren und über Disziplin- und Branchengrenzen hinweg kreative Innovationsideen zu generieren. Unter den Beteiligten herrschte eine große Bereitschaft, sich mit der Biointelligenz auseinanderzusetzen: Selbst für Akteure, die bislang wenig Bezug zu einer oder zwei der kon-

vergierenden Technologien hatten, waren klare Marktpotenziale sowohl kurz- als auch mittel- und langfristig ersichtlich. Es zeigten sich aber größere Unterschiede darin, wie weit die drei untersuchten Wertschöpfungssysteme bereits in Richtung Biointelligenz fortgeschritten sind, und wie der Mehrwert durch Biointelligenz von den jeweiligen Beteiligten wahrgenommen wird. Zur Erschließung der Innovations- und Transformationspotenziale durch Biointelligenz liegen Herausforderungen in der produktiven Zusammenführung der erforderlichen Kompetenzen, im notwendigen Aufbau oder Umbau von Innovationsökosystemen sowie in der Weiterentwicklung der regulativen Rahmenbedingungen, um biointelligente Innovationen zu fördern.

Deshalb ist ein breit angelegter und koordinierter Ansatz erforderlich, um die Potenziale der Biointelligenz voll ausschöpfen zu können. Entsprechend wird ein Gesamtkonzept aus mehreren zeitlich gestaffelten, miteinander verbundenen und notwendigen Modulen empfohlen. Essenziell ist, das Förderinstrumentarium jeweils inhaltlich und zeitlich spezifisch auf das jeweilige Wertschöpfungssystem maßzuschneidern, um dem jeweils unterschiedlichen aktuellen Entwicklungsstand bzw. der -geschwindigkeit in Bezug auf die Biointelligenz Rechnung zu tragen. Die Aktions-Roadmap umfasst folgende Module (siehe auch Abbildung S. 8):

- Informationen/Mobilisierung: Die Biointelligenz bzw. deren thematischen Potenziale sind allen Stakeholdern innerhalb der relevanten Wertschöpfungssysteme bekannt zu machen, ihr Interesse an der Thematik der Konvergenz von Biologie, Technik und Informationstechnologie zu wecken und sie zur aktiven Mitgestaltung zu motivieren. Die Einbindung führender Akteure aus der Wirtschaft und die Darstellung von Erfolgsbeispielen kann dabei aufzeigen, welche Potenziale in sektorübergreifender Zusammenarbeit

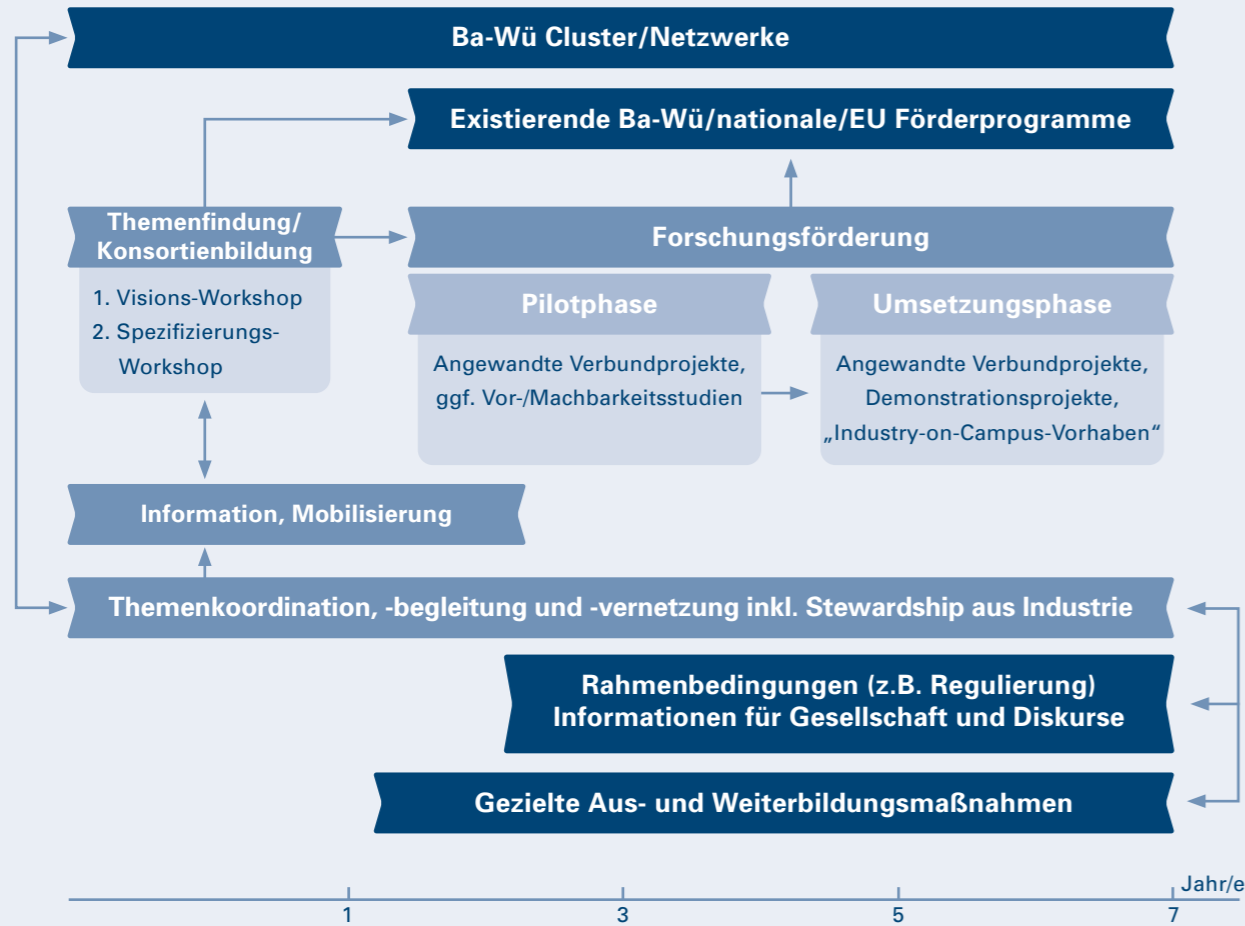


Abbildung: Modulare Aktions-Roadmap für Biointelligenz in Baden-Württemberg

liegen, und welche neuen Geschäftsmodelle/-ideen durch Biointelligenz entstehen können.

- Themenfindung und Konsortienbildung: Um die Themen sowie die Bildung konkreter Konsortien und Projekte anzustoßen, werden weitere zwei Schritte empfohlen: Zunächst sollen Beteiligte Visionen für bzw. Lösungsansätze durch biointelligente Produkte und Dienstleistungen entwickeln, für die kurz-, mittel- und langfristige Bedarfe, Märkte und Potenziale gesehen werden („Visions-Workshop“). Auf Basis dieser Ideen werden in einem zweiten Schritt anwendungsorientierte, industrierelevante FuE-Themen identifiziert und Anforderungen an die zu entwickelnden Anwendungen spezifiziert

(„Spezifizierungs-Workshop“). In Wertschöpfungssystemen, die bereits einen höheren Entwicklungsstand in Richtung Biointelligenz erreicht haben, kann ggf. gleich mit dem zweiten Schritt begonnen werden.

- Projektförderung in der Pilot- und Umsetzungsphase: Die Förderung ist für die jeweiligen Wertschöpfungssysteme spezifisch auszugestalten. So kann sich der technologische Reifegrad (Technological Readiness Level), den die Förderung adressieren soll, und die Art der Förderinstrumente (z. B. FuE-Verbundprojekte, Aufbau von Pilot- und Demonstrationsanlagen, Reallabor-Ansätze etc.) zwischen Themen und Wertschöpfungssystemen unterscheiden. Es ist zu prüfen, ob ein signifikanter Teil der Projektförderung

innerhalb der existierenden Förderprogramme möglich oder zusätzliche Fördermittel und -maßnahmen notwendig sind.

- Themenkoordination, -begleitung und -vernetzung, inkl. Stewardship aus der Industrie: Um die genannten Aktivitäten sowohl spezifisch als auch übergreifend zu koordinieren und potenzielle Synergien zwischen Themen, Wertschöpfungssystemen und Akteuren zu identifizieren und aktiv zu erschließen, ist eine Koordination erforderlich. Dabei sollten Industrieakteure frühzeitig und langfristig mit

eingebunden werden (Stewardship), um die industrierelevante Ausrichtung sicherzustellen und die Wirtschaftsunternehmen Baden-Württembergs zu motivieren und zu mobilisieren.

Ergänzend sind Maßnahmen wie die Vernetzung mit bestehenden Clustern und Netzwerken, die Schaffung passfähiger Regulierungen, die Initiierung von gesellschaftlichen Diskursen und gezielte Aus- und Weiterbildung hilfreich, um den durch die Biointelligenz unterstützten Transformationsprozess zu fördern.



Hintergrund und Zielsetzung

Das Konzept der Biointelligenz beschreibt die zunehmende Konvergenz zwischen Biologie, Technik und Informationstechnik. Durch die Anwendung und Nutzung von Materialien, Strukturen und Prinzipien der belebten Natur in der Technik soll eine nachhaltige Wertschöpfung ermöglicht werden. Das Konzept der Biointelligenz wurde in den vergangenen Jahren im Rahmen der BIOTRAIN-Studie entwickelt. Diese Voruntersuchung zur Biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung postulierte große Potenziale für Wirtschaft und Gesellschaft (Bauernhansl et al. 2019). Die BIOTRAIN-Studie sowie das darauf aufbauende White Paper „Die Biointelligente Wertschöpfung“ heben vielfältige Potenziale für verschiedene Bedarfsfelder und Sektoren hervor (Bauernhansl et al. 2019; Kompetenzzentrum Biointelligenz 2019a, 2019b). Auch in anderen strategischen Ausarbeitungen spielen biologische Prozesse, Strukturen und Vorbilder sowie Konvergenzen mit anderen Technologiefeldern eine zunehmende Rolle. Dazu gehören bspw. das BMBF-Impulspapier zur Materialforschung¹ (Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF 2020) sowie die im Koalitionsvertrag angekündigte ressortübergreifende Agenda „Von der Biologie zur Innovation“ (CDU, CSU, SPD 2018).² Auch die aktuelle Bioökonomiestrategie der Bundesregierung nimmt einige Technologieaspekte, vor allem unter dem Stichwort biologisches Wissen, mit auf und weist der Technologiekonvergenz zwischen biologischen und technischen Systemen, aber auch der Digitalisie-

rung eine hohe Bedeutung zu (Bundesregierung 2020). Der Standort Baden-Württemberg ist ein Vorreiter auf diesem Gebiet und bietet vielfältige Anknüpfungspunkte für Innovationsaktivitäten zur Biointelligenz: Bereits bei der Entwicklung und Umsetzung des Konzepts nahmen Akteure aus Baden-Württemberg eine zentrale Stellung ein. So wurde das Konzept der Biointelligenz federführend vom Fraunhofer IPA in Stuttgart entwickelt. Darauf folgend wurde im Jahr 2019 das Kompetenzzentrum Biointelligenz ins Leben gerufen. Im Kompetenzzentrum werden universitäre und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen im Raum Stuttgart und Tübingen mit verschiedenen Fachbereichen und relevanten Kompetenzen gebündelt. Gegenwärtig befindet sich das Kompetenzzentrum Biointelligenz in der Vereinsgründungsphase zur formalen Verfestigung, gleichzeitig treiben die darin organisierten Akteure das Thema aktiv voran. Darüber hinaus gibt es landesweit zahlreiche Forschungsstätten und Industrieakteure, die relevante Technologiekompetenzen bereitstellen und einen Beitrag zu deren Konvergenz leisten können.

Ebenso bietet die Biointelligenz große Chancen und vielfältige Anknüpfungspunkte für die baden-württembergische Industrie: Die Unternehmen im Land stehen – genauso wie die Industrie weltweit – vor der Notwendigkeit, einen Transformationsprozess zu durchlaufen, um ihre Position im nationalen und globalen Wettbewerb weiter behaupten zu können. Dies gilt in besonde-

rer Weise für die Industrie in Baden-Württemberg, die stark durch den Mittelstand und innovations- und umsatzstarke Sektoren wie Maschinen- und Automobilbau geprägt ist. Zur Verbesserung ihrer Wettbewerbs- und Zukunftsfähigkeit muss die Industrie den zentralen globalen Herausforderungen Rechnung tragen, insbesondere den Herausforderungen des Klimawandels. Wichtige Ansätze sind hierzu unter anderem die Steigerung der Ressourceneffizienz und die Schaffung nachhaltiger Prozesse, Produkte und Systeme. Daneben müssen Trends, wie Flexibilisierung und Individualisierung der Produktion, sich änderndes Konsumverhalten, Arbeits- und Lebensweisen sowie steigende Anforderungen an die Arbeitsbedingungen, adressiert werden. Gerade hierfür verspricht die Biointelligenz vielfältige Lösungsansätze und (Sprung-)Innovationen und birgt das Potenzial, standortsichernd im aktuellen industriellen Strukturwandel zu wirken.

Dabei ist allerdings noch zu klären, in welchen Themen und Wirtschaftsbereichen die Potenziale der Biointelligenz tatsächlich liegen, welche Möglichkeiten für ihren Transfer in die Wirtschaft vorhanden, und welche Schritte notwendig sind, um diese Potenziale zu realisieren. Damit die Biointelligenz zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit des Bundeslandes beitragen kann, bedarf es also konkreter Umsetzungsstrategien.

Vor diesem Hintergrund wurde vom Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI im Auftrag und in Zusammenarbeit mit der BIOPRO Baden-Württemberg GmbH eine partielle Potenzialanalyse und ein Roadmapping-Prozess Biointelligenz durchgeführt (mit finanzieller Förderung des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg). Aufgrund der großen Breite und vielfältigen Auslegungsmöglichkeiten des Konzepts Biointelligenz lässt sich keine vollständige Themenliste oder nach objektiven Kriterien priorisierte technologische Roadmap ableiten. Stattdessen wurden beispielhaft relevante Wirtschaftsbereiche

identifiziert und entsprechende Wertschöpfungssysteme spezifiziert, die am Standort Baden-Württemberg umgesetzt werden könnten. Für diese wurde das Konzept der Biointelligenz in einem partizipativen Ansatz mit Akteuren aus Industrie und Forschung beprobt und dabei die aus Sicht der Beteiligten relevanten Potenziale für den Innovations- und Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg ausgelotet. Aus den Erkenntnissen dieser exemplarisch untersuchten Wertschöpfungssysteme konnte die Relevanz bestätigt werden, die die Biointelligenz für die zukunftsorientierte Transformation der baden-württembergischen Wirtschaft hat, worin zentrale Herausforderungen liegen, und wie der Prozess gestaltet werden sollte, um diese Potenziale tatsächlich zu heben.

Im Folgenden wird zunächst das Konzept der Biointelligenz näher erläutert ([vgl. Konzept der Biointelligenz, S. 13 ff.](#)) und grundsätzliche Bedarfe, Entwicklungen und der Status quo in ausgewählten Wirtschaftsbereichen skizziert ([vgl. Wertschöpfungssysteme in Baden-Württemberg mit Bezug zur Biointelligenz, S. 18 ff.](#)). In [Relevanz und Entwicklungspotenziale der Biointelligenz in ausgewählten Themenfeldern \(S. 28 ff.\)](#) werden drei ausgewählte Themenfelder aus unterschiedlichen Wertschöpfungssystemen näher analysiert. Dies sind aktive/aktivierende Unterstützungssysteme in der Gesundheitswirtschaft, Produktionssysteme/-technologien für Ernährung sowie biointelligente Baumaterialien und Werkstoffe für Konsumgüter. Diese Themen wurden in drei Workshops mit jeweils rund 15 bis 20 Teilnehmerinnen und Teilnehmern aus der Industrie und Wissenschaft aus Baden-Württemberg vertieft diskutiert und dabei erörtert, welche Anwendungsmöglichkeiten, Potenziale und Herausforderungen sich für den baden-württembergischen Standort durch die Biointelligenz ergeben. Abschließend werden Handlungsbedarfe aufgezeigt und Handlungsempfehlungen für Baden-Württemberg abgeleitet ([vgl. Empfehlungen und Aktions-Roadmap, S. 54 ff.](#)). Im Anhang erfolgt ein Exkurs zur Indikatorik für die Biointelligenz.

¹ Dieses Impulspapier ist als Vorbereitung einer in der Hightech-Strategie angekündigten „Materialdachstrategie“ zu sehen, die Schwerpunkte unter anderem auf „die Nutzung biologischer Prinzipien zur Entwicklung neuer Materialien“ legen soll (BMBF 2020: Materialforschung. Wegbereiter von Innovationen in Industrie und Gesellschaft. Impulspapier des BMBF zur Materialforschung).

² Diese Strategieinitiative ist bislang allerdings nicht umgesetzt worden.

Konzept und Ziele der Biointelligenz

Konzept der Biointelligenz

Technologische Basis der Biointelligenz

Biologie (die belebte Natur), Technik (durch Menschen geschaffene Artefakte) und Informationstechnik (die Verarbeitung von Wissen und Daten) stellen drei konzeptionell abgrenzbare Sphären dar, zwischen denen aber vielfältige Berührungspunkte und Überschneidungen existieren. Das Konzept Biointelligenz beschreibt die gezielte Zusammenführung und schlussendlich die Verschmelzung dieser drei Sphären (Abbildung 1).

In den letzten Jahren hat die Wissenschaft weitreichende Fortschritte in den Lebenswissenschaften und der

Informationstechnik hervorgebracht. Die Biointelligenz beschreibt die systematische Übertragung des Wissens über biologische Prozesse in technische Anwendungen und gleichzeitig eine zunehmende Integration von Technik, Informationstechnik und Biologie. Daraus ergeben sich neue Synergien und Potenziale, künftige Produkte, Herstellprozesse und Organisationen tiefgreifend zu verändern und einen Transformationsprozess der Wirtschaft zu befördern (Bauernhansl et al. 2019).

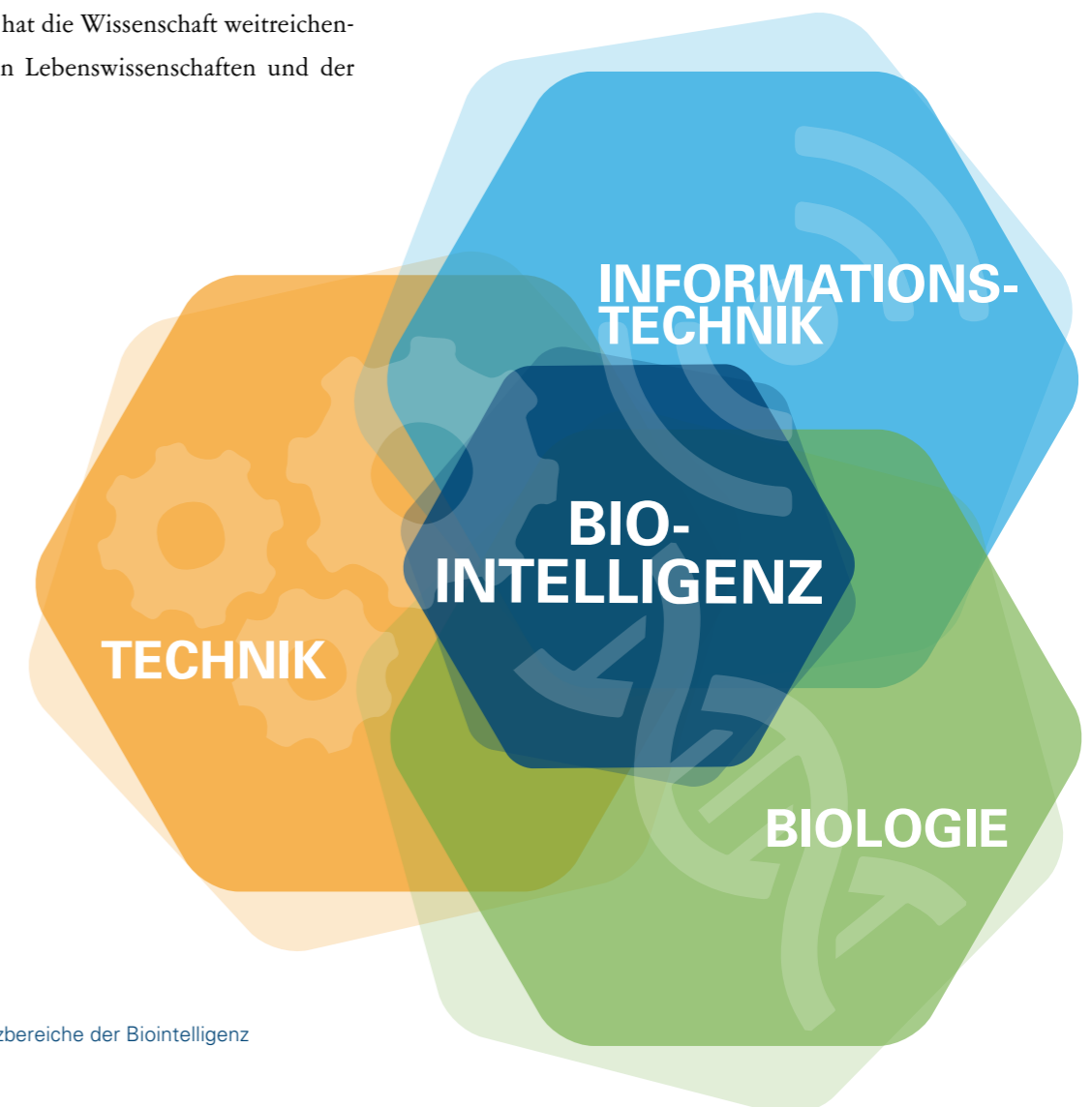


Abbildung 1: Konvergenzbereiche der Biointelligenz

Biointelligenz weist in ihrer Definition und Zielsetzung eine große Nähe zu und teilweise Überschneidungen mit anderen Konzepten auf, wie der Bioökonomie³, der Biotechnologie⁴ und der Biologischen Transformation (Bauernhansl et al. 2019). All diesen Konzepten ist eine technische und wirtschaftliche Nutzung biologischer Ressourcen (Systeme, Rohstoffe oder Prinzipien) gemein, sie unterscheiden sich jedoch in ihrer Ziel- und Schwerpunktsetzung: Die Biologische Transformation stellt die zunehmende Anwendung und Nutzung von Materialien, Strukturen und Prinzipien der belebten Natur in der Technik in den Vordergrund, mit dem Ziel einer nachhaltigen Wertschöpfung und einer Systemtransformation in Richtung nachhaltigen Wirtschaftens (Bauernhansl et al. 2019; Neugebauer 2019; Fraunhofer-Gesellschaft 2018; Byrne et al. 2018). Biointelligenz wird vor diesem Hintergrund mitunter auch als die vollständige Integration der drei Sphären verstanden (Bauernhansl et al. 2019). Die Biotechnologie stellt bereits die Verschmelzung von Biologie und Technik dar. Dieser Ansatz wird in der Biointelligenz noch um die Informationstechnik erweitert. Die Bioökonomie nimmt besonders die Substitution fossiler durch biogene Rohstoffe sowie das Konzept der Kreislaufwirtschaft in den Blick, wobei die Biotechnologie eine wichtige technologische Basis für die Bioökonomie darstellt. Im Gegensatz zur Bioökonomie, die vor allem die Ressourcen, also Nutzung biologischer Rohstoffe, Prozesse und Systeme in den Vordergrund stellt, definiert sich die Biointelligenz primär über ihren technologischen Ansatz und ist auf die Generierung von technischen Innovationen ausge-

richtet. Dabei ist die Biointelligenz (ebenso wie die Biologische Transformation) nicht auf Ansätze beschränkt, die biologische Systeme nutzen, sondern umfasst auch technische Anwendungen, die durch biologische Systeme inspiriert sind (z. B. Bionik), und solche, bei denen biologische Funktionsprinzipien technisch nachgeahmt werden (z. B. Biomimetik). Abbildung 2 zeigt, dass sich in der Biointelligenz so ein fließender Übergang zwischen rein technischen, hybriden biologisch-technischen und rein biologischen Systemen ergibt. Der Integration der Informationstechnik kommt im Konzept der Biointelligenz eine zentrale Bedeutung zu, da durch sie in Kombination mit entsprechender Sensortechnologie Interaktion und Kommunikation zwischen einem System und seiner Umwelt oder verschiedenen technischen Systemen untereinander möglich werden. So können auch rein technischen oder bioinspirierten Systemen, aber auch hybriden biologisch-technischen Systemen Eigenschaften verliehen werden, die typischerweise biologische Systeme auszeichnen, bspw. Lernfähigkeit, Adaptivität und Autonomie. Somit können perspektivisch Systeme erschaffen werden, die in ihrer Leistungsfähigkeit die natürlichen Vorbilder übertreffen. Außerdem bietet die Informationstechnik weitreichende Möglichkeiten, biointelligente Ansätze in bestehende industrielle Kontexte zu integrieren, indem kompatible Kommunikationsschnittstellen zwischen biologischen oder bioinspirierten Komponenten und weiteren technischen Infrastrukturen geschaffen werden.

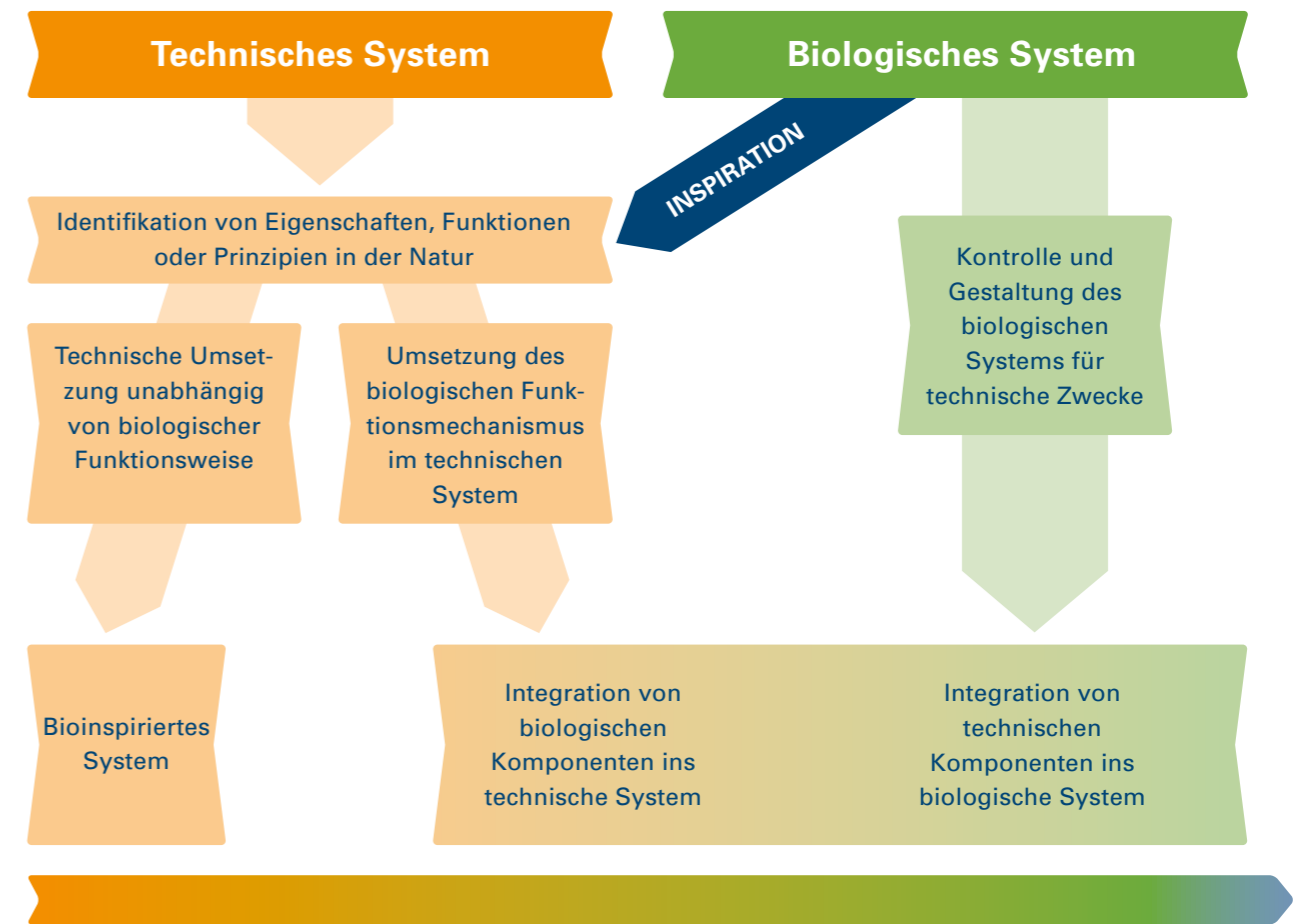


Abbildung 2: Technische Strukturierung der Biointelligenz

Darüber hinaus ergeben sich auch Überschneidungen zwischen Biointelligenz und Konzepten, die gänzlich unabhängig von den Lebenswissenschaften entwickelt wurden. Beispielhaft ist das Konzept Industrie 4.0 zu nennen. Dies war nicht ursprünglich durch die Natur inspiriert, aber mithilfe digitaler Vernetzung, integrierter Sensorik, Steuerung, Datenauswertung und selbstlernenden Algorithmen wird eine zunehmende Autonomie und Selbstorganisation von industriellen Prozessen erreicht. Im Ergebnis können dadurch ebenfalls Eigenschaften und Funktionen, wie z. B. Kognition und Adaptivität, erzielt werden, die auch biointelligente Systeme auszeichnen. Durch die Integration der drei Bereiche Biologie, Technik und Informationstechnik geht die Biointelligenz konzeptionell allerdings noch

über die digitale Transformation und Industrie 4.0 hinaus.

Biointelligenz als Treiber und Teil eines Transformationsprozesses der Wirtschaft

Ergänzend zur technologischen Perspektive auf die Biointelligenz ist insbesondere der systemische Charakter dieses Konzepts hervorzuheben. Dieser beschreibt das Zusammenspiel von Technologien mit gesellschaftlichen, industriellen und sozioökonomischen Faktoren.

So verändern sich mit der Notwendigkeit, die gesellschaftlichen Herausforderungen im Wandel zu einer nachhaltigen und kreislauforientierten Wirtschaftsweise zu adressieren, auch die Produktions- und

³ Vergleiche Landesstrategie „Nachhaltige Bioökonomie für Baden-Württemberg“ (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg und Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg): „[Unter Bioökonomie wird]... eine Wirtschaftsweise verstanden, die durch die wissenschaftsbasierte Erzeugung und Nutzung biologischer Ressourcen, Prozesse und Prinzipien Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren im Rahmen eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems bereitstellt.“

⁴ Definition der Biotechnologie: Interdisziplinäre und anwendungsorientierte Wissenschaft an der Schnittstelle von Biologie, Medizin, Chemie und Ingenieurwissenschaften. Die Biotechnologie nutzt Organismen, Zellen oder Biomoleküle in technischen Anwendungen, um Produkte für unterschiedliche Branchen herzustellen oder neue Technologien zu entwickeln (BMBF, BMEL 2020).



Konsummuster. Insbesondere sind nachhaltige, flexible, dezentrale oder kundenspezifische Lösungen gefragt, während die Skalierung der Produktion zunehmend in den Hintergrund tritt. Die Adressierung dieser Herausforderungen ist nur durch Veränderung von globalen Handels- und Wertschöpfungsketten, Wirtschaftssektoren, Industriestandorten, Arbeitsplätzen, aber auch der Konsumweisen möglich. Biointelligenz kann dabei sowohl Treiber als auch Teil des notwendigen Transformationsprozesses der Wirtschaft sein.

Biointelligenz stellt kreative Ansätze bereit, welche unter Zuhilfenahme der oben genannten Wissens- und Technologiebasis neue Ideen, Verfahren und Produkte liefern und damit die bestehenden Sektoren und Wertschöpfungsketten deutlich verändern können. Ein biointelligenter Transformationsprozess beinhaltet daher mehr als nur den Rohstoffwechsel oder eine Optimierung der Ressourceneffizienz. Biointelligente Ansätze können in verschiedensten innovations- und wertschöpfungsstarken Sektoren zur Anwendung kommen, insbesondere auch solchen, die – in Abgrenzung zur Bioökonomie – nur in (bisher sehr) geringem Maße biobasierte Rohstoffe oder biotechnische Verfahren einsetzen: Beispielsweise können sie in der Medizintechnik, im Maschinen-/Anlagenbau, in der Automobilindustrie sowie im Bauwesen neue Funktionen und Prozesse, Technologie- und Produktoptimierungen oder einen geringeren Ressourcenverbrauch ermöglichen.

Aus wirtschaftlicher und innovationspolitischer Sicht ist dabei von besonderer Bedeutung, dass sich in einem solchen biointelligenten Transformationsprozess Kooperationsstrukturen und Wertschöpfungs-systeme deutlich verändern. Dies sei an einem Beispiel aus der Lebensmittelproduktion illustriert. Dieser Sektor ist zwar eher traditionell und rohstoffintensiv, aber

auch hier gibt es Teilbereiche mit großer Bedeutung der Biointelligenz für eine Transformation. Vor allem aus Klimaschutz- und ökologischen, gesundheitlichen und Tierwohl-Gründen wird ein Rückbau der Massentierhaltung und eine Verringerung des Fleischkonsums angestrebt. Daher gewinnen alternative Proteinquellen aus Pflanzen, Insekten und In-vitro-Fleisch an Bedeutung, während die konventionelle landwirtschaftliche Tierproduktion sowie Schlachtung und Fleischverarbeitung unter Veränderungsdruck geraten. Bei den Kooperationsstrukturen und Wertschöpfungs-systemen, die auf eine alternative, biointelligente Proteinversorgung der Bevölkerung ausgerichtet sind,

- gewinnen potenziell neue Akteure und Geschäftsmodelle an Bedeutung (z. B. Entwickler und Produzenten von In-vitro-Fleisch, Entwickler, Produzenten und Nutzer von Indoor Farming und Insektenzucht),
- werden neue Kooperationen zwischen Akteuren der Produktionstechnik, Prozessteuerung und Lebenswissenschaften erforderlich,
- wird die Produktion unabhängiger von bisherigen Faktoren wie Land, Boden und Klima.

Entsprechend ermöglicht die Transformation zu einem biointelligenten Innovations- und Wirtschaftssystem weitreichende und tiefgehende wirtschaftliche, soziale und ökologische Veränderungen.

Biointelligenz im zeitlichen Verlauf des Transformationsprozesses der Wirtschaft

Biointelligenz entfaltet seine Potenziale insbesondere dann, wenn die drei Technologiebereiche Technik, Biologie und Informationstechnik synergistisch zusammenwirken. Häufig handelt es sich dabei aber um Produkt- und Anwendungsvisionen, die erst in längerfristiger Perspektive erreichbar erscheinen. Für den Transformationsprozess der Wirtschaft ist es aber essenziell, bereits



jetzt den Anstoß zu neuen Kooperationen und dem Umbau der Wertschöpfungs-systeme zu geben. Daher wurden in dieser Studie auch Produkte und Anwendungen berücksichtigt, die bspw. nur auf der Konvergenz von zwei – bisher in getrennten Wertschöpfungs-systemen genutzten – Technologiebereichen beruhen, aber „niedrig hängende Früchte“ (vgl. S. 21, S. 24 und S. 27) auf dem Weg zu biointelligenter Wertschöpfung darstellen. Solche Produkte und Anwendungen, obwohl noch nicht im engen Sinne „biointelligent“, sind dennoch extrem wichtig, um bei den Akteuren das Konzept der Biointelligenz bekannt zu machen und ihr Kreativität freisetzendes Potenzial für die Anbahnung neuer Kooperationen, für strategische Weichenstellungen und die Neu- oder Weiterentwicklung von Wertschöpfungs-systemen zu nutzen. Dies gilt insbesondere für Sektoren, die bislang kaum mit biologischen oder informationstechnischen Systemen zu tun hatten, und für die das Konzept Biointelligenz intuitiv nicht naheliegend erscheint, wie bspw. die Automobilindustrie, der Maschinen- und Anlagenbau oder die Bauwirtschaft (vgl. [Biointelligente Baumaterialien und Werkstoffe für Konsumgüter](#), S. 44 ff.)

Umgekehrt ist zu beachten, dass das Konzept der Biointelligenz nicht in allen Wirtschaftsbereichen als „neu“ und damit als „Perspektiven eröffnend“ und „Wandel



einleitend“ wahrgenommen wird. Denn es gibt auch Bereiche, die interdisziplinäre Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an den Schnittstellen zwischen Biologie, Technik und Informationstechnik bereits seit langem betreiben, bspw. im Bereich der Gesundheitswirtschaft (vgl. [Relevanz und Entwicklungspotenziale der Biointelligenz in ausgewählten Themenfeldern](#), S. 28 ff.), und in Bezug auf die Biointelligenz und den damit verbundenen Transformationsprozess bereits weiter fortgeschritten sind. Folglich haben die Wirtschafts- und Forschungsbereiche einen unterschiedlichen Stand in der Biointelligenz und der entsprechenden Biologischen Transformation. Teilweise werden biointelligente Entwicklungen hier im Rahmen anders benannter Konzepte verfolgt, und/oder die zusätzlichen Potenziale der Biointelligenz werden von den Akteuren nur als konsequente, inkrementell innovative Weiterentwicklungen bisheriger Aktivitäten betrachtet. Dies kann dazu führen, dass der Neuheitsgrad des Konzepts und auch die Anerkennung des Transformationspotenzials der Biointelligenz dort eher auf Skepsis stößt. Wie in [Aktive und aktivierende Unterstützungssysteme](#) (S. 30 ff.) gezeigt wird, lassen sich mit Biointelligenz aber auch hier neue Perspektiven für das Wertschöpfungs-system identifizieren.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Konzept der Biointelligenz aus wirtschaftlicher und innovationspolitischer Perspektive dezidierte Impulse für eine Vielzahl von Sektoren und Wertschöpfungs-systemen geben kann. Aufgrund der großen Breite und vielfältigen Auslegungsmöglichkeiten des Konzepts ist eine eindeutige Grenzziehung allerdings häufig schwierig. Unschärfen bei der definitorischen Abgrenzung müssen in Kauf genommen werden, zumal es noch in einem erheblichen Maße um potenzielle Zukunftsentwicklungen geht, die nur begrenzt konkret umrissen werden können.

Wertschöpfungssysteme in Baden-Württemberg mit Bezug zur Biointelligenz

Baden-Württemberg verfügt über eine starke Industrie, die hohe Produktivitätszuwächse und eine starke Exportfähigkeit aufweist und ein maßgeblicher Treiber für Innovation, Technologie und Beschäftigung ist. In den Wertschöpfungssektoren sind auch (digitale) Dienstleistungen in Form von Vor- und Nachleistungen häufig an die klassische Industrieproduktion gekoppelt (Bauer et al. 2018).

Abbildung 3 zeigt die wirtschaftliche Bedeutung einzelner Industrien anhand ihrer Beschäftigungs- und Umsatzanteile in Baden-Württemberg. Der Maschinen- und Fahrzeugbau sind die führenden Industriezweige mit einem jeweils sehr hohen Anteil an Beschäftigten und Umsatz.

Insgesamt steht die baden-württembergische Industrie vor vielfältigen Herausforderungen und Trends, die es

in den kommenden Jahren zu adressieren gilt, um im nationalen und globalen Wettbewerb weiter erfolgreich bestehen zu können. Zu nennen wären nicht nur die Herausforderung, Produktionsprozesse klimaneutral, ressourcenschonend und kreislauffähig zu gestalten, sondern vielmehr auch innovative Lösungen für die Effekte des demografischen Wandels, ein sich änderndes Konsumverhalten, Arbeits- und Lebensweisen sowie steigende Anforderungen an die Arbeitsbedingungen zu entwickeln. Dies trifft in besonderem Maße auf „traditionelle Sektoren“ zu, wie den Fahrzeug- und Maschinenbau. Um den Industrialisierungsgrad, die Wirtschaftskraft und den Wohlstand in Baden-Württemberg zu erhalten, und die hier ansässige Industrie für die Bewältigung zukünftiger Herausforderungen bestmöglich aufzustellen, werden diese einen Transformationsprozess durchlaufen müssen.

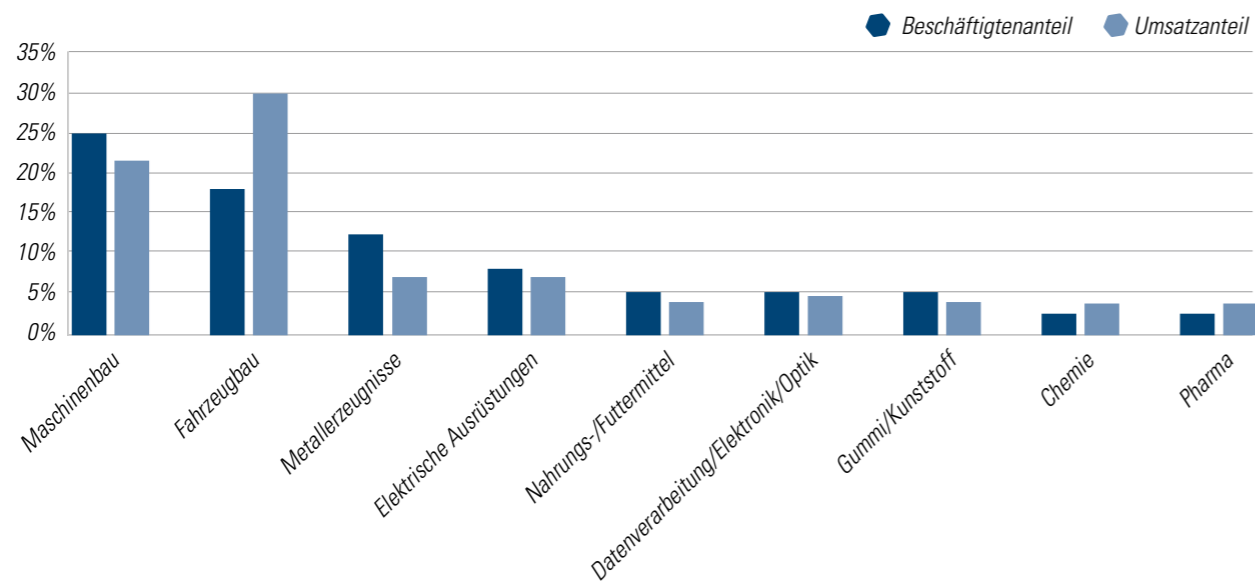


Abbildung 3: Beschäftigten- und Umsatzanteile von Sektoren innerhalb der Industrie in Baden-Württemberg (2019) in Prozent
Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg

Im Folgenden wird für ausgewählte Wertschöpfungssysteme bezogen auf die potenzielle Anwendung biointelligenter Ansätze kurz diskutiert,

- inwieweit sie von Bedeutung für den Standort Baden-Württemberg sind,
- aufgrund welcher spezifischen Herausforderungen in den nächsten Jahren ein Transformationsprozess erforderlich sein wird,
- welche Technologien und Anwendungen im Kontext der Biointelligenz für diese Wirtschaftsbereiche eine hohe Relevanz haben,
- zu welchem Grad biointelligente Lösungsansätze bereits eingesetzt, entwickelt oder diskutiert werden.

Gesundheitsindustrie

Die Gesundheitsindustrie stellt mit einem Gesamtumsatz von über 25 Mrd. € und über 95.000 Beschäftigten einen weiteren wichtigen Sektor für Baden-Württemberg dar. Sie umfasst die Segmente Medizintechnik, Pharmazeutische Industrie und Biotechnologie, wobei der Medizintechnik sowohl im Hinblick auf die Anzahl der Unternehmen und der Beschäftigten als auch den erwirtschafteten Umsatz mit Abstand die größte Bedeutung beizumessen ist (BIOPRO Baden-Württemberg GmbH 2020). Baden-Württemberg ist der größte Pharma- und Medizintechnikstandort sowie der zweitgrößte Biotechnologiestandort in Deutschland⁵ und ist auch im europäischen Vergleich zu den führenden Regionen zu zählen (BIOPRO Baden-Württemberg GmbH 2020, Dispan 2020, SPECTARIS 2020). Die Unternehmenslandschaft ist insbesondere in der Medizintechnik und in der Biotechnologie stark durch kleine und mittelständische Unternehmen geprägt. Gleichzeitig sind aber auch internationale Unternehmen in Baden-Württemberg ansässig, sodass sich insgesamt ein komplexes

Diese Darstellungen haben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und beschreiben vor allem die Wertschöpfungssysteme, in denen wichtige Beiträge durch die Biointelligenz zu erwarten sind. Diese wurden in einem ersten Projektworkshop mit ausgewählten Expertinnen und Experten aus der Forschung in Baden-Württemberg diskutiert und für eine eingehendere Analyse mit jeweils entsprechenden Akteuren aus der Wirtschaft in drei sich anschließenden Themenworkshops ausgewählt.

Innovationsökosystem aus Forschungseinrichtungen, Start-ups und KMUs sowie Großkonzernen ergibt. Die Gesundheitsindustrie zeichnet sich zudem durch einen hohen Exportanteil von über 50 Prozent aus (BIOPRO Baden-Württemberg GmbH 2020, Dispan 2020). Die wichtigsten Tätigkeitsfelder in der Medizintechnik sind chirurgische Instrumente, therapeutische Systeme und Geräte, Implantate und Exoprothesen sowie die Endoskopie (BIOPRO Baden-Württemberg GmbH 2020).

Die Gesundheitsindustrie ist dabei nicht allein aufgrund ihres Umsatzes und der Beschäftigungszahlen von Relevanz für die Wirtschaft in Baden-Württemberg. Die Corona-Pandemie hat auf drastische Weise verdeutlicht, dass eine robuste und agil agierende Gesundheitsindustrie von essenzieller Bedeutung für ein funktionierendes nationales Wirtschaftssystem ist, indem sie Kapazitäten vorhält, schnell auf Krisensituationen reagieren kann und im Bedarfsfall die Versorgung im Land sichert – sei es durch die Bereitstellung von

⁵ www.bw-invest.de/standort/branchen-cluster/gesundheitsindustrie/



Masken, intensivmedizinischer Ausstattung oder die Entwicklung von Therapeutika und Impfstoffen.

Traditionell handelt es sich bei der Gesundheitsindustrie um forschungsaktive Sektoren mit kurzen Innovationszyklen (BVMed 2020), wobei naturgemäß ein enger Bezug zu den Lebenswissenschaften besteht. Zudem sind die Digitalisierung, die Vernetzung von Gesundheitsanwendungen und eHealth treibende Trends (BVMed 2020). Biointelligente Lösungen sind in der Gesundheitsindustrie bereits etabliert, auch wenn der Begriff Biointelligenz selbst hier bislang kaum Verwendung findet.

Biointelligente Lösungen erstrecken sich über das gesamte technische Spektrum der Biointelligenz – von rein technischen Ansätzen zur Verbesserung von Mensch-Technik-Interaktionen (bspw. im Fall von aktiven Prothesen und Orthesen oder Exoskeletten) bis hin zur Unterstützung durch Künstliche Intelligenz (KI) im Produktdesign oder in der Wirkstoffformulierung, in denen biologische und technische Systeme integriert sind (Abbildung 4).

Große Potenziale für die Biointelligenz sind insbesondere in der Erschließung neuer Anwendungskontexte über den eigentlichen Gesundheitssektor hinaus zu

Mensch-Technik-Interaktion	Personalisierung und Prävention	Produktionsoptimierung	Digitale vernetzte Behandlung
<ul style="list-style-type: none"> » Orthesen/Prothesen/Implantate » Innovative technische Materialien (z. B. X-freisetzend) » Innovative biohybride Materialien (z. B. Scaffolds für Tissue Engineering) » OP der Zukunft (z. B. Echtzeit-Sensorik) » Fortschrittliche Neurostimulation (z. B. Blutdruckkontrolle via Miniatur-Elektroden) » KI-assistiertes Mental-State-Monitoring 	<ul style="list-style-type: none"> » Kombinierte molekulare Diagnose/Therapie-Ansätze » KI-assistierte Diagnostik (z. B. Bildauswertung) » Minimalinvasive Diagnose-/Testverfahren (z. B. Organ-on-a-chip) » Fortschrittliche Impfstoffe (z. B. DNA-/mRNA-basiert) » Therapien basierend auf autologem Material (z. B. Tissue Engineering) » Krebsimmuntherapie » Genterapie » Wirkstoffformulierung und -targeting 	<ul style="list-style-type: none"> » KI-assistiertes Wirkstoff-/Materialdesign (z. B. In-silico-Experimente) » Laborautomatisierung (z. B. Vorselektion von biologischen Proben) » Echtzeitsteuerung von Prozessen (z. B. Biopharmaka) » 3D-(Bio-)Printing (z. B. Implantate, Gewebe) 	<ul style="list-style-type: none"> » Telemedizin (z. B. Teleüberwachung von Schrittmachern) » Digitale Vernetzung der Leistungserbringer (Erleichterung des Datenaustauschs)

Enabling Technologies

- » Bioinspirierte Aktuatoren/Aktuatorssysteme
- » Bioinspirierte Mikro- und Nanostrukturen
- » Bioinspirierte Sensorsysteme
- » Neuroelektronik/Neuroelektronische Systeme
- » Künstliche Intelligenz
- » Additive Fertigung von Biohybriden

Abbildung 4: Biointelligenz in der Gesundheitsindustrie, relevante Bereiche



Box 1: Gesundheitsindustrie: Ausgewählte kurz- bis mittelfristige Potenziale für die Biointelligenz

In Baden-Württemberg sind mehrere Unternehmen auf dem Gebiet des regenerativen Tissue Engineering und der Entwicklung von Zelltherapien aktiv, bspw. die RHEACELL GmbH in Heidelberg oder die TETEC Tissue Engineering Technologies AG in Reutlingen. Weltweit wird ein starkes Marktwachstum auf diesem Gebiet erwartet: von 9,1 Mrd. US\$ im Jahr 2021 auf 23 Mrd. US\$ 2028 (Grand View Research 2021a).

Weitere relevante Marktpotenziale für Biointelligenz sind in intelligenten Prothesen und Orthesen mit aktiver Unterstützungsfunktion zu sehen. In Baden-Württemberg ist eine Vielzahl an Unternehmen ansässig, die personalisierte Prothesen und Orthesen entwickeln und vertreiben; bei der Herstellung kommen bereits KI und 3D-Druck zum Einsatz. Erste Produkte, bei denen KI auch direkt für die eigentlichen Systemfunktionen eingesetzt wird,

bspw. um aktive Bewegungsunterstützung zu ermöglichen, erreichen gerade den Markt, z. B. die aktive Hand-Orthese der Firma HKK Bionics aus Ulm. Dem globalen Markt für Prothesen und Orthesen wird ein Wachstum von 6,1 Mrd. US\$ im Jahr 2020 auf 8,6 Mrd. US\$ im Jahr 2028 vorausgesagt (Grand View Research 2021b). Auch im Bereich der Neuroprothetik wird ein starkes Wachstum von 6,1 Mrd. US\$ in 2018 auf 15,8 Mrd. US\$ in 2026 erwartet (Reports and Data 2019).

Dass der durch die gesetzlichen Krankenkassen finanzierte Gesundheitsmarkt ein stark regulierter Markt ist, kann eine hohe Eintrittshürde für Unternehmen mit Wurzeln in anderen Wirtschaftsbereichen darstellen. Vor diesem Hintergrund eröffnen sich aber gerade durch eine Diversifizierung und die Erschließung neuer Märkte wichtige neue Geschäftsfelder, bspw. im

Freizeit- und Präventionsbereich. Ein weiteres wichtiges Segment an der Schnittstelle zwischen Medizintechnik und Maschinenbau stellen Exoskelette dar (vgl. Produktionstechnologien/-systeme, S. 22 ff.). Erhalt oder Förderung der Gesundheit sind dabei nicht allein aufgrund ihres hohen Wertschöpfungspotenzials und aus volkswirtschaftlicher Sicht relevant. Vielmehr kann gerade insbesondere die baden-württembergische Industrie vom Einsatz solcher Systeme profitieren, indem die körperliche Belastung für die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sinkt und es zu weniger berufsbedingten Erkrankungen kommt. So werden bei der Daimler AG bereits Exoskelette in der Montage eingesetzt.⁶ Die Entwicklung und Erprobung von Exoskeletten kann somit auch dazu beitragen, die Attraktivität des Standorts Baden-Württemberg für Fachkräfte in der Produktion zu steigern.

⁶ www.wiwo.de/my/technologie/forschung/ein-bisschen-cyborg-exoskelette-ein-trend-der-bald-die-gesamte-industrie-erfasst/25828026.html?ticket=ST-1699015-0a3IYMMO37vyyvD0La1O6-ap5

sehen: Gerade im präventiven Einsatz in der Freizeit oder im Arbeitsschutz existieren vielfältige Anwendungsoptionen (Chui et al. 2020) und große Marktpotenziale (siehe Box 1, S. 21). Nicht zuletzt, da die regulatorischen Hürden geringer sind als bei medizinischen Anwendungen, können Produkte hier häufig schneller auf den Markt gebracht werden.

Für die Industrie in Baden-Württemberg sind also wichtige Potenziale der Biointelligenz auch darin zu sehen, dass die Akteure der Gesundheitsindustrie mit

ihren technischen Kompetenzen in den Austausch mit anderen Sektoren treten, um so neue Anwendungsfelder für ihre Entwicklungen zu erschließen, wovon die Sektoren wechselseitig profitieren können. So können bspw. Neuroprothesen oder intelligente Orthesen zur Kompensation oder Behebung körperlicher Einschränkungen eingesetzt werden. Gleichzeitig werden aktive Exoskelette auch bereits zur Entlastung bei körperlich schweren Tätigkeiten in der Industrie eingesetzt (vgl. [Produktionstechnologien/-systeme, S. 22 ff.](#))

Produktionstechnologien/-systeme

Der Maschinenbau ist der umsatzstärkste Industriesektor in Baden-Württemberg und beschäftigt 330.000 Erwerbstätige.⁷ Rund ein Viertel der gesamten deutschen Maschinen- und Anlagenbauer haben ihren Sitz in Baden-Württemberg, und das Land zeichnet sich im Bundesländervergleich durch eine hohe Forschungsintensität (FuE-Ausgaben/Umsatz) aus (Berger et al. 2017). Der Maschinenbau in Baden-Württemberg ist sehr stark mittelständisch geprägt. Rund 50 Prozent der Beschäftigten arbeiten in Unternehmen mit weniger als 500 Mitarbeitenden. 80 Prozent der Unternehmen beschäftigen weniger als 250 Mitarbeitende.⁸ Schwerpunkte liegen in den Bereichen Werkzeugmaschinen und Präzisionswerkzeug, Lufttechnik, Fördertechnik, Antriebstechnik, Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen sowie Landtechnik und Armaturen.

Biointelligenz wird aktuell insbesondere im Kontext der Produktion diskutiert, und es werden Bemühungen vorangetrieben, dort das Konzept stärker zu verankern (Manufature High-Level Group 2018, 2019). Dabei

werden Potenziale für die Entwicklung neuartiger Technologien, Produkte und Wertschöpfungskonzepte erwartet, die wichtigen Trends wie Dezentralisierung, Flexibilisierung und Individualisierung Rechnung tragen sowie zur Lösung zentraler Herausforderungen in der Produktion beitragen. Zu diesen zählen vor allem die Notwendigkeit, Ressourcenverbrauch zu reduzieren, technologische Leistungsfähigkeit und Effizienz zu erhöhen sowie diese mit den ökologischen Nachhaltigkeitszielen in Einklang zu bringen.

Grundsätzlich gibt es einige Teilbereiche, in denen die Biologie eine stärkere Rolle als bislang einnehmen kann (Abbildung 5). Es gibt auch diverse Beispiele für Anwendungsoptionen in der Produktion (Byrne et al. 2018; Byrne et al. 2021). Allerdings sind die meisten dieser Ansätze derzeit noch Gegenstand der Forschung und teilweise sogar noch reine Visionen, wohingegen nur wenige etablierte und marktreife Anwendungen im kommerziellen Einsatz identifiziert werden konnten (siehe Box 2, S. 24). Zudem sind die meisten

Entwicklungen dem Bereich der Bioinspiration zuzuschreiben, worin die Lebenswissenschaften im Innovationsprozess nur eine untergeordnete Rolle spielen, da oft nur Anlehnungen aus der Biologie genutzt werden. Beispielsweise spielen bioinspirierte Algorithmen für Planung, Organisation und Kontrolle/Steuerung oder dezentrale, an die Kreisläufe in der Natur angelehnte Kreislaufführung, eine wichtige Rolle. Bionische Prinzipien sind in der Maschinen-, Bauteil- und Produktoptimierung von hoher Relevanz. Auf der anderen Seite gewinnen biotechnologische Produktionsweisen

eine immer größere Bedeutung, zeigen aber dort in nur begrenztem Maße Schnittstellen zu traditionellen (d. h. stückgutorientierten) Produktionsaktivitäten.

Exemplarische kurz-/mittelfristige Potenziale der Biointelligenz für die baden-württembergische Wirtschaft sind in folgender Box 2 zusammengefasst. Diese Darstellung umfasst nicht alle Themen mit Bezug zur Biointelligenz, die in Abbildung 5 skizziert sind, sondern stellt einen illustrativen Ausschnitt an Themen dar.

Dezentralisierung und Flexibilisierung der Produktion	Mensch-Maschine-Kollaboration	Maschinen-, Bauteil-, Produktoptimierung	Systeminnovation mit vernetzter Bioproduktion
<ul style="list-style-type: none"> » Additive Technologien » Autonome, selbstoptimierende Maschinen und Produktionsanlagen (z. B. mit Self-X-Funktionen) » Bioinspiriertes, resilientes Produktionsmanagement und -organisation (Algorithmen, Digital Twins) » Autonome, biointelligente Anlagen und Produktionsorganisation » Dezentrale Energieversorgung 	<ul style="list-style-type: none"> » Soft Robotics: Pneumatische Muskelroboter, intelligente Handlings-Assistants » Cobots » Kognitive Robotik » Industrielle Exoskelette 	<ul style="list-style-type: none"> » Form-Optimierung (bionisches Design) » Struktur-Optimierung (z. B. bionischer Leichtbau) » Bioinspirierte Funktions-Optimierung 	<ul style="list-style-type: none"> » Industrielle Biotechnologie, neue Zellkulturverfahren » Neue biotechnologische Produktionsverfahren, Synthetische Biologie » Elektrobiotechnologie » Bioprinting » Zellfreie Verfahren
Enabling Technologies			
<ul style="list-style-type: none"> » Bioinspirierte Aktuatoren/Aktuatorssysteme » Bioinspirierte Mikro- und Nanostrukturen (z. B. neuronale Chips) » Bioinspirierte Sensorsysteme/Sensorik (z. B. E-Nase, E-Haut, akustische Datenübertragung usw.) » Neuroelektronik/neuroelektronische/neuromorphe elektronische Systeme » Künstliche Intelligenz (insbesondere Algorithmen) » Additive Fertigung 			

Abbildung 5: Produktionstechnologien/-systeme mit Relevanz zur Biointelligenz

^{7, 8} <https://wm.baden-wuerttemberg.de/de/innovation/ausgewaehlte-branchen/maschinenbau/>



Box 2: Produktionstechnologien/-systeme: Ausgewählte kurz- bis mittelfristige Potenziale für die Biointelligenz

Vernetzte Bioproduktion ist bereits heute ein wichtiger Markt für baden-württembergische Akteure. Insbesondere für die Forschung spielt die immer schnellere Datenverarbeitung mit Einsatz von Algorithmen eine wichtige Rolle, während die Produktion selbst von Fortschritten in Produktionstechnologien und -systemen profitiert (z. B. stärkere Automatisierung). In der Produktion biotechnologischer Produkte ist Baden-Württemberg vor allem bei Biopharmazeutika aktiv, die mittlerweile einen Umsatz von 12,7 Mrd. € (VFA 2020) in Deutschland bei zweistelligen Wachstumsraten haben (vgl. Gesundheitsindustrie, S. 19 ff.) Dabei gehört Baden-Württemberg zu einem der führenden Produktionsstandorte für Biopharmazeutika in Europa: nahezu die Hälfte der EU-weit zugelassenen biopharmazeutischen Wirkstoffe wird hier produziert⁹. In der Corona-Pandemie sind baden-württembergische Unternehmen nicht nur in der Impfstoffentwicklung (CureVac) unter den weltweit führenden Unternehmen, sondern auch bei der Herstellung der Impfstoffe gegen das Corona-Virus: Produzenten sind das Laupheimer Unternehmen Rentschler sowie in Kürze auch CureVac in Tübingen.

Ein vielversprechendes Anwendungssegment sind Entwicklungen

rund um **alternative Proteinquellen** oder **andere Lebensmittel**. Dieses Segment kann deutlich davon profitieren, wenn Know-how über den Aufbau von Produktionssystemen übertragen wird. So wird bspw. bei vertikaler Landwirtschaft (**Vertical Farming**) ausgehend von einer Marktgröße von rund 3 Mrd. US\$ ein jährliches Wachstum von 20 Prozent für die kommenden fünf Jahre erwartet (PR Newswire; MarketsAndMarkets 2020). Hohe Varianzen gibt es bei Markteinschätzungen zu essbaren Insekten. Der aktuelle Markt von gut 100 Mio. US\$ wird aber voraussichtlich in den nächsten fünf Jahren auf einen einstelligen Milliardenbereich wachsen (Global Market Insights 2020; Research and Markets 2021). In beiden Segmenten sind Akteure aus Baden-Württemberg aktiv, und eine Übertragung des hiesigen Produktions-Know-hows wäre ein wesentlicher Schritt zur Kommerzialisierung. Etwas längere Zeit wird die Verbreitung von In-vitro-Fleisch, also kultiviertem Fleisch (**Cultured Meat**) benötigen – hier sind Fortschritte in biotechnologischen Methoden gemeinsam mit intelligenter Produktionsfertigung wichtig (vgl. Biointelligente Baumaterialien und Werkstoffe für Konsumgüter, S. 44 ff.). Beispielsweise erwartet Kearney (Kearney 2019) ein sehr schnelles Wachstum

ab 2025 und bereits eine Marktgröße von rund 140 Mrd. US\$ in 2030. Darüber hinaus wird für pflanzliche Fleischalternativen eine Marktgröße von rund 250 Mrd. US\$ erwartet.

Noch nachhaltiger als die Fleischalternativen sind aber **biointelligente Strategien zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen**. So kann z. B. **Künstliche Intelligenz unterstützen, Abfälle durch weniger störungsfällige Produktionssysteme zu vermeiden**.¹⁰

Weitere Potenziale liegen in der zunehmenden Mensch-Technik-Interaktion, wie z. B. „**bioinspirierter Robotik**“. Dort werden Vorbilder der Natur genutzt, um funktional ähnliche Mechanismen zu schaffen (z. B. Robotergreifer). Dies erfolgt insbesondere bei der Entwicklung von kollaborativen Robotern (Cobots). Für die nächsten Jahre wird ein Wachstum des weltweiten Marktes von rund 600 bis 700 Mio. US-Dollar in 2019/2020 auf rund 2 bis 3 Mrd. US\$ im Jahr 2025 erwartet (Grand View Research 2019a; Research and Markets 2019; Global Market Insights 2018; Grand View Research 2020). Akteure in Baden-Württemberg bei kollaborierenden Robotern sind bspw. Bosch Connected Industry, Festo AG oder Fanuc Deutschland.

⁹ <https://biopharmacluster.com/wer-wir-sind>

¹⁰ Ein Beispiel ist ein Softsensor, der die KI-gestützte Vorhersage der Pumpfähigkeit von Schmelzkäsemasse ermöglicht. Wenn die Käsemassepumpe seltener verstopft ist, können Lebensmittelabfälle vermieden werden. Siehe <https://ki-reif.de/>



Materialien

Fortschritte bei der Entwicklung und dem Einsatz neuer Materialien sind von erheblicher Bedeutung für eine ressourceneffizientere und kreislaforientierte Wirtschaft und für die Transformation zahlreicher Wirtschaftssektoren.

Biologische Strukturen, Prozesse oder Ressourcen können auf verschiedene Weise für zahlreiche materielle Anwendungen relevant sein. Diese sind in Abbildung 6 exemplarisch genannt. Vereinfachend wird außerdem dargestellt, welche Wirtschaftssektoren vor- oder nachgelagert eingebunden sind.

Dabei hat nur bei manchen dieser Entwicklungen eine deutliche Technologiekonvergenz stattgefunden. Ein

Beispiel für konvergente Entwicklungen sind biohybride Materialien. Biohybride Materialien sind Kompositmaterialien, die aus biologischen und nicht-biologischen Komponenten bestehen und neuartige Funktionalitäten aufweisen. Die meisten dieser Materialien werden für einen Einsatz im Kontext der Lebenswissenschaften und der Medizin entwickelt, wobei es auch vereinzelte Beispiele in anderen Sektoren gibt (z. B. selbstheilender Beton aus dem Bereich der Konstruktion).

Eine detaillierte Darstellung der Biointelligenz bei Materialien erfolgt in Biointelligente Baumaterialien und Werkstoffe für Konsumgüter (S. 44 ff.).

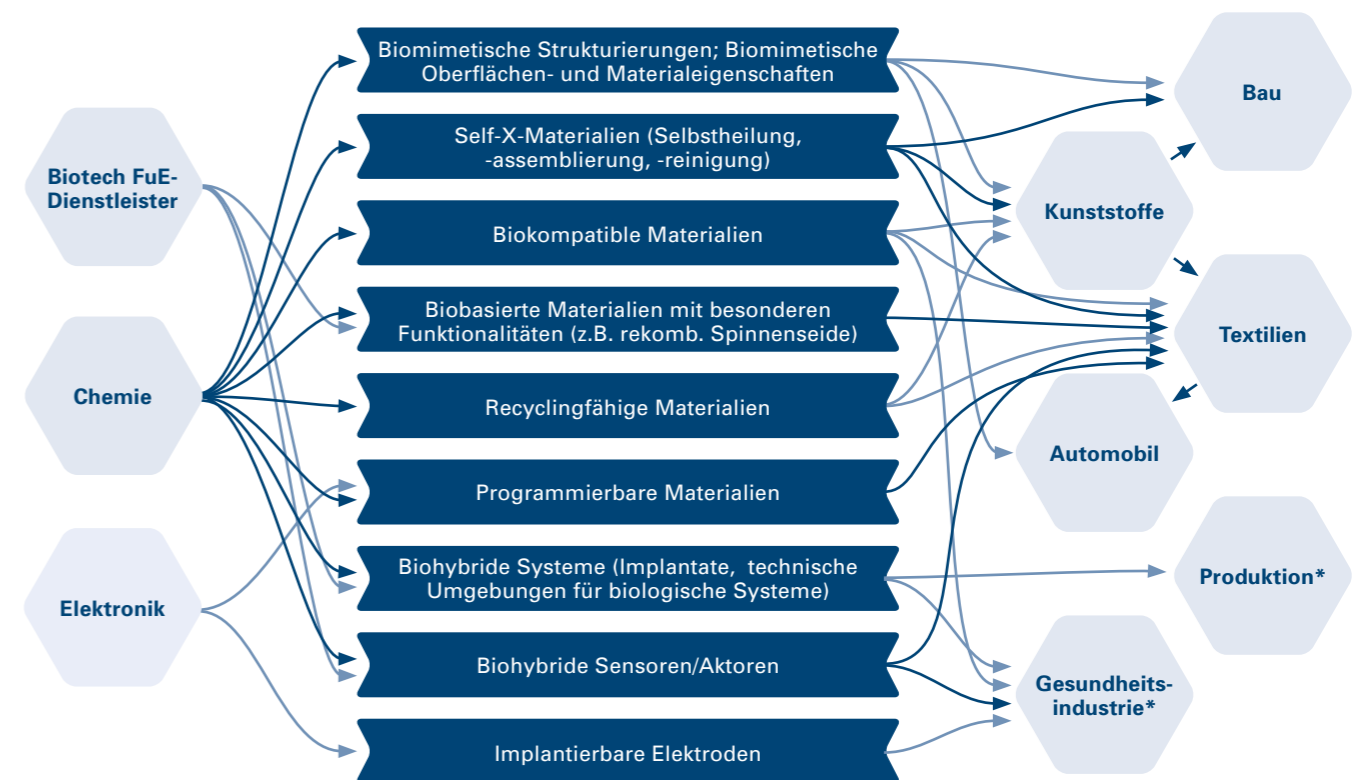


Abbildung 6: Einsatz von Materialien mit Bezug zur Biointelligenz sowie vor- und nachgelagerte Wirtschaftssektoren

* vgl. Produktionstechnologien/-systeme, S. 22 ff. und Gesundheitsindustrie, S. 19 ff.



Wie Abbildung 6 auch zeigt, können biointelligente Materialien in einer Reihe von Wirtschaftssektoren eingesetzt werden. Wenngleich es erhebliche Synergien zwischen den Wirtschaftsbereichen gibt, unterscheiden sich die Arten von Materialien, Volumina, Preise und relevante Technologien erheblich voneinander.

Im Folgenden sind drei relevante Anwendersektoren mit ihrer wirtschaftlichen Bedeutung und exemplarischen Ansätzen für biointelligente Lösungen kurz skizziert.

Automobilindustrie: Die Automobilindustrie ist die beschäftigungsstärkste Industrie in Baden-Württemberg mit über 235.000 Beschäftigten und einem Jahresumsatz von rund 90 Mrd. €. ¹¹ Die Automobilindustrie erlebt aber aktuell einen großen Umbruch. So stellen die Elektrifizierung, Digitalisierung und autonomes Fahren wichtige technologische Entwicklungen dar. Gleichzeitig wachsen die Anforderungen an die Reduzierung der CO₂-Emissionen und Ressourceneinsparung. Biointelligenz kann bspw. durch biologische Strukturen und bionische Konstruktionsprinzipien bei Leichtbaumaterialien zu erheblichen Gewichtseinsparungen und niedrigeren Emissionen führen. Auch der Einsatz von selbstheilenden Materialien befindet sich in der Prototyp-Entwicklung. ¹²

Bauwesen und -industrie: Die Bauwirtschaft zählt zu einem der wichtigsten Wirtschaftssektoren mit einem Anteil an der Gesamtbruttowertschöpfung von rund 4,9 Prozent und rund 85.000 Beschäftigten. ¹³ Die Bauindustrie ist ein wichtiger Materialverbraucher und verursacht fast 40 Prozent aller CO₂-Emissionen. ¹⁴ 60 Prozent

des gesamten Energieverbrauchs in Gebäuden entfallen auf das Heizen und Kühlen von Räumen. Daher besteht ein hoher Bedarf an emissionsärmeren oder adaptiven Baumaterialien, um dem Klimawandel zu begegnen. Dabei gibt es eine Reihe denkbarer Lösungen mit Bezug zu biologischen Strukturen und Prozessen, die in Bezug zur Biointelligenz stehen. Diese umfassen bspw. (Kombinationen von) biobasierte Materialien, selbstheilende Materialien oder die Funktionalisierung von Gebäude-/Fassadenoberflächen durch biointelligente Beschichtungen.

Textilindustrie: Rund 200 Textil- und Bekleidungsunternehmen mit 24.000 Beschäftigten sind in Baden-Württemberg, insbesondere in den Bereichen Technische Textilien, Bekleidung sowie Haus- und Heimtextilien ansässig. ¹⁵ In diesem eher traditionellen Sektor haben Hochleistungsmaterialien an erheblicher Bedeutung gewonnen. So ist die Entwicklung neuer Materialien und Oberflächen für innovative Produkte im Bereich der Technischen Textilien von zentraler Bedeutung. Diese werden in unterschiedlichen Sektoren wie Bau, Energie, Gesundheitswesen, Umweltschutz und Verkehrswesen eingesetzt. Biointelligente Lösungen können bspw. funktionale Textilien umfassen (z. B. integrierte elektrische Komponenten in Textilien und Textilfasern selbst als Sensoren/Aktuatoren, selbstreinigende Textilien).

Folglich sind biointelligente Materialien – neben den bereits oben skizzierten Produktionstechnologien/-systemen – für eine ganze Reihe von Anwendersektoren („Downstream“) in späteren Stufen der Wertschöpfungskette von hoher Relevanz.

¹¹ <https://wm.baden-wuerttemberg.de/de/innovation/ausgewahlte-branchen/fahrzeugbau/>

¹² www.matfoundrygroup.com/News%20and%20Blog/Lamborghini_and_MIT_Create_the_Self-Healing_Car

¹³ <https://wm.baden-wuerttemberg.de/de/innovation/ausgewahlte-branchen/bauwirtschaft/>

¹⁴ www.iea.org/topics/buildings

¹⁵ www.clusterportal-bw.de/clusterdaten/technologiefelder/technologiefelder-detailseite/textil-und-bekleidung/clusterdb/Innovationsfeld/show/



Box 3: Materialien: Ausgewählte kurz- bis mittelfristige Potenziale für die Biointelligenz

Einen potenziell großen Markt stellen **Leichtbaumaterialien** dar. Hier ist die Automobilindustrie der größte Abnehmer. Für Leichtbaumaterialien wird ein globales Marktwachstum von rund 150 Mrd. US\$ im Jahr 2019 auf ca. 220 bis 280 Mrd. US\$ in den Jahren 2025/2026 erwartet (Market Watch News 2021; Antony et al. 2014; Reports and Data 2020). Für deren Entwicklung können biologische Strukturen und bionische Konstruktionsprinzipien sowie biobasierte Werkstoffe von erheblicher Bedeutung sein. ¹⁶

Kurz- bis mittelfristig wird vor allem Wachstum bei **biobasierten Materialien** erwartet, ¹⁷ insbesondere in einer zirkulären Kreislaufwirtschaft. Beispielsweise wird hohes Potenzial für Lignin als Baustoff gesehen. Daneben wird für den globalen Markt

für biobasierte Polymere im Bausektor ein Wachstum von 10 Mrd. US\$ im Jahr 2020 auf rund 15 Mrd. US\$ im Jahr 2025 erwartet (Market Research 2020). Hierzu werden bspw. einige biobasierte Kunststoffe oder Celluloseacetate gezählt. Mittelfristig ist daneben bspw. eine stärkere Verbreitung biobasierter Additive in der Kunststofftechnik zu erwarten (z. B. biobasierte Weichmacher, Biocide, Flammschutzmittel).

Die Entwicklung **funktionaler Textilien** (z. B. sensorunterstützt, atmungsaktiv, wasserabweisend, antiallergen) ist bereits weit fortgeschritten. Es wird erwartet, dass der globale Markt von aktuell ca. 1,5 bis 2,5 Mrd. US\$ auf ca. 5 bis 8 Mrd. US\$ im Jahr 2025 steigt (Grand View Research 2019b; Research and Markets 2020). Ein

anderes Beispiel sind Fasern aus synthetischer Spinnenseide. Diese werden schon heute zumindest in Prototypen bei Schuhen, Uhrenarmbändern, Staubsaugerbeuteln und Leichtbaukompositen eingesetzt, und es wird weiterhin ein Marktdurchbruch erwartet.

Ein Beispiel für bioinspirierte Materialien sind selbstreinigende Oberflächen, die bereits heute auf Basis von photokatalytischen Oberflächen (TiO₂), oder (super-)hydrophoben Oberflächen auf dem Markt sind. Hier sind Weiterentwicklungen hinsichtlich selbstregenerierender Luftreinigungsflächen und Vergrößerung der aktiven Gebäudeoberflächen zur Luftreinigung denkbar.

¹⁶ Beispielsweise Faser- und Polymerkomposite aus biobasiertem Polylactid als Leichtbaukomposit-Werkstoff, welches leicht recycelfähig ist aufgrund der Monomaterialzusammensetzung.

¹⁷ Zu Themen, die stärker die Technologiekonvergenz adressieren, wie unter anderem programmierbare Eigenschaften (z. B. Bioabbaubarkeit on demand) vgl. [Biointelligente Baumaterialien und Werkstoffe für Konsumgüter](#), S. 44 ff.

Relevanz und Entwicklungspotenziale der Biointelligenz in ausgewählten Themenfeldern

Um zu untersuchen, welche konkreten Potenziale sich in Wertschöpfungssystemen ergeben, erfolgte eine spezifische Analyse anhand dreier ausgewählter Themenfelder. Deren Auswahl erfolgte auf Basis der in [Konzept und Ziele der Biointelligenz \(S. 12 ff.\)](#) skizzierten Wertschöpfungssysteme. Wichtige Kriterien für die Auswahl stellte dabei das jeweilige erwartete Potenzial von biointelligenten Lösungen für die Zukunftsfähigkeit der baden-württembergischen Industrie dar. Darauf aufbauend wurde innerhalb der ausgewählten Wertschöpfungssysteme Gesundheitsindustrie, Produktionstechnologien/-systeme und Materialien jeweils ein geeignetes Themenfeld ausgewählt und präzisiert. Diese Themenfelder sind:

- „Aktive und aktivierende Unterstützungssysteme“ für das Wertschöpfungssystem Gesundheitsindustrie, ([vgl. Aktive und aktivierende Unterstützungssysteme, S. 30 ff.](#))
- „Biointelligente Produktionssysteme/-technologien für Ernährung und Gesundheit“ für das Wertschöpfungssystem Produktionstechnologien/-systeme ([vgl. Biointelligente Produktionssysteme und -technologien für Ernährung und Gesundheit, S. 37 ff.](#)) sowie
- „Biointelligente Baumaterialien und Werkstoffe für Konsumgüter“ für das Wertschöpfungssystem Materialien ([vgl. Biointelligente Baumaterialien und Werkstoffe für Konsumgüter, S. 44 ff.](#))

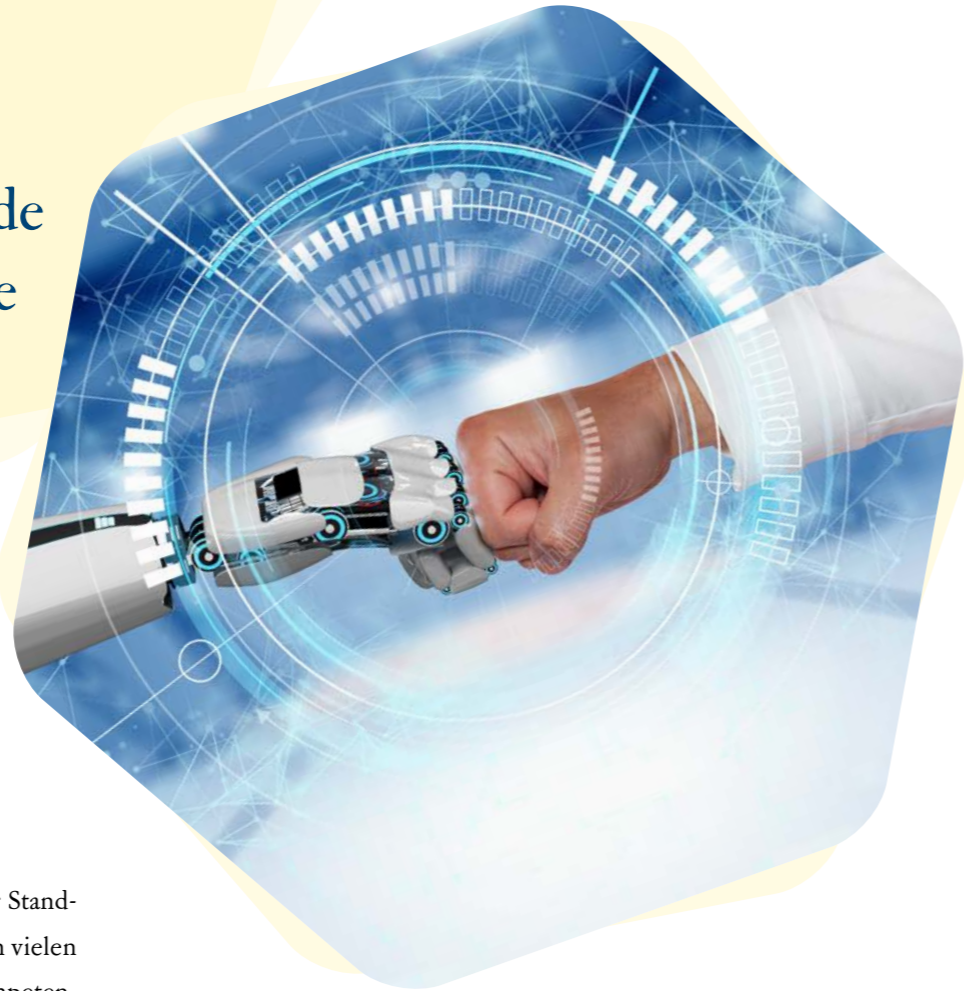
Für jedes Themenfeld wurde ein Online-Workshop mit Vertreterinnen und Vertretern aus Forschung und Industrie Baden-Württembergs durchgeführt. In den folgenden Abschnitten werden die in den Workshops erarbeiteten Potenziale der Biointelligenz und Entwicklungstrends in diesen drei Themenfeldern dargestellt sowie Möglichkeiten und Herausforderungen für deren Realisierung am Standort Baden-Württemberg aufgezeigt. Es ist zu beachten, dass die in den Themenfeldern genannten Beispiele nicht als vollständig oder streng prioritär zu betrachten sind, sondern sie exemplarisch für verschiedene Anwendungsfelder der Biointelligenz in den ausgewählten Wertschöpfungssystemen stehen.

Im Anschluss an die Darstellung der drei Themenfelder wird ein Fazit gezogen, welches sowohl prozedurale Erkenntnisse aus den Workshops zusammenfasst als auch übergreifend notwendige sozio-ökonomische Bedingungen für den wirtschaftlichen Erfolg der Biointelligenz im entsprechenden Themenfeld nennt.



**BIO-
INTELLIGENZ**

Aktive und aktivierende Unterstützungssysteme



Einführung

Baden-Württemberg ist ein führender deutscher Standort im Bereich der Medizintechnik und verfügt in vielen relevanten Teilbereichen über erhebliche Kompetenzen, bspw. FuE-Aktivitäten in den Lebenswissenschaften sowie eine durch KMU und Produktionsbetriebe geprägte Industrielandschaft. Mit diesen Kapazitäten und Kompetenzen hat Baden-Württemberg insbesondere bei aktiven/aktivierenden Unterstützungstechnologien eine gute Ausgangsposition.

Aktive/aktivierende Unterstützungstechnologien sind technische Systeme, die menschliche Körperfunktionen unterstützen können. Mit Hilfe solcher Systeme können Behinderungen, Beeinträchtigungen oder hohe Belastungen ausgeglichen oder vermieden werden. Unterstützungssysteme kommen in der Therapie chronischer oder akuter Erkrankungen, in der Prävention oder im Arbeitsschutz zum Einsatz. Sie können dazu beitragen, Menschen mit Beeinträchtigungen ein selbstbestimmtes Leben und gesellschaftliche Teilhabe zu ermöglichen. Solche Technologien werden wichtiger, da durch die demografische Entwicklung die Zahl der betroffenen Menschen steigt.

Aufgrund der Breite der möglichen Anwendungen wurden drei Teilbereiche der aktiven/aktivierenden Unterstützungstechnologien in einem Workshop mit gestaltenden Teilnehmerinnen und Teilnehmern im Hinblick auf die Biointelligenz konkretisiert. Diese sind:

- [Biointelligente Implantate und Transplantate, S. 33 ff.](#),
- [Biointelligente Prothesen und biomechanische Unterstützungssysteme, S. 34 ff.](#) sowie
- [Biointelligente Unterstützungstechnologien für Neuroanwendungen und Sinneswahrnehmungen, S. 35 ff.](#)

Diese Teilbereiche wurden ausgewählt, weil sich ihre jeweiligen Schwerpunkte in Bezug auf die zu adressierenden Beeinträchtigungen bzw. Erkrankungen sowie die verstärkt zu integrierenden Wissenschaftsdisziplinen und Technikfelder unterscheiden. Sie werden im Folgenden im Anschluss an eine einleitende Erläuterung zur Biointelligenz bei aktiven/aktivierenden Unterstützungssystemen skizziert.

Biointelligenz bei aktiven/aktivierenden Unterstützungssystemen

Technologische Basis der Biointelligenz ist die zunehmende Integration von Technik, Biologie und Informationstechnik (vgl. [Hintergrund und Zielsetzung, S.10 ff.](#)). Diese technologische Konvergenz kann auf verschiedenen Komplexitätsebenen erfolgen. Im Hinblick auf aktive/aktivierende Unterstützungssysteme wären dies folgende Ebenen: 1) die molekulare, 2) der Materialien, 3) der Bauteile einschließlich Software und 4) der kompletten Systeme (siehe auch [Abbildung 7](#) und [Abbildung 8](#)).

Vision: Biointelligente, künstliche Bauchspeicheldrüse

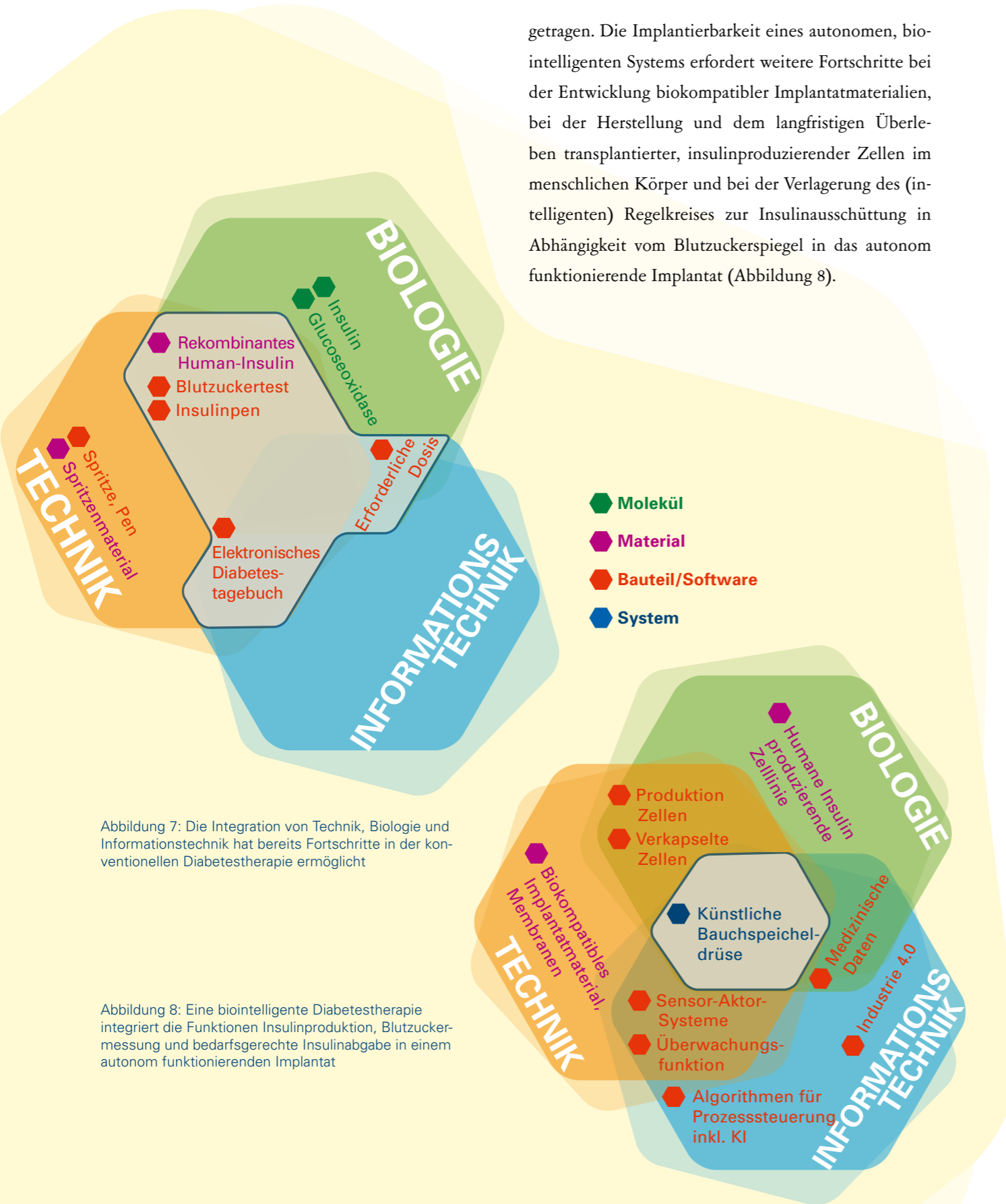
Im Folgenden wird das Prinzip für biointelligente aktive/aktivierende Unterstützungssysteme am Beispiel der chronischen Stoffwechselerkrankung Diabetes mellitus erläutert. Bei gesunden Menschen wird der Blutzucker Spiegel unabhängig von den verzehrten Mahlzeiten weitgehend konstant gehalten, indem die Bauchspeicheldrüse das Hormon Insulin bedarfsgerecht produziert und ausschüttet. Insulin regt die Körperzellen zur Aufnahme von Glucose aus dem Blut an, wodurch der Blutzuckerspiegel sinkt. Diabetes mellitus Typ 1 ist eine chronische Autoimmunerkrankung, bei der die Insulinproduktion gestört ist und die Betroffenen lebenslang auf eine Zuführung von Insulin angewiesen sind.

Eine biointelligente Diabetestherapie könnte sich eines Unterstützungssystems bedienen, das wie die menschliche Bauchspeicheldrüse körpereigenes Insulin produzieren und in gewissen Mengen speichern, auf steigende Blutzuckerwerte reagieren und Insulin genau in den Mengen freisetzen kann, die erforderlich sind, um den Blutzuckerspiegel wieder auf sein normales Niveau zu senken. Dies würde ein implantierbares System erfordern, dessen Biointelligenz vor allem in der

autonomen, bedarfsangepassten Insulinproduktion und Regulierung des Blutzuckerspiegels ohne Eingriffe von außen und ohne Steuerung durch den Menschen bestünde.

Auf dem Weg zu einer solchen künstlichen Bauchspeicheldrüse waren Fortschritte auch bislang schon durch die Integration von Technik, Biologie und Informationstechnik möglich: Mit Hilfe der Biotechnologie wurde die industrielle Produktion von menschlichem Insulin in den erforderlichen Mengen ermöglicht. Die Integration von Technik und Biologie ermöglicht die (in der Regel enzymatischen) Testsysteme zur Messung des Blutzuckerspiegels sowie die Verabreichung des Insulins – manuell durch spezielle Spritzen (z. B. Insulinpen) oder auch automatisch durch spezielle Pumpen. Bei der konventionellen Therapie ist es erforderlich, dass die diabetische Person eine diskontinuierliche Messung des aktuellen Blutzuckerspiegels durchführt, auf Basis des Testergebnisses die erforderliche Insulindosis (z. B. aus Tabellen) selbst bestimmt und sich anschließend das Insulin injiziert.

Um diese Therapie biointelligent zu gestalten, sollten die diskontinuierlich und manuell durch den Menschen durchzuführenden Schritte kontinuierlich, automatisch und autonom durch das Gerät selbst durchgeführt werden. Hierfür sind vor allem die Miniaturisierung und Integration dieser einzelnen Teilschritte in ein Gesamtsystem („Künstliche Bauchspeicheldrüse“) erforderlich. Mittlerweile sind intelligente Insulinpumpen verfügbar, die autonom den Blutzuckerspiegel messen und das Insulin entsprechend dosieren können. Allerdings sind die Betroffenen nach wie vor auf die Zuführung von körperfremdem Insulin angewiesen, und die Systeme werden in der Regel außerhalb des Körpers



getragen. Die Implantierbarkeit eines autonomen, biointelligenten Systems erfordert weitere Fortschritte bei der Entwicklung biokompatibler Implantatmaterialien, bei der Herstellung und dem langfristigen Überleben transplanterter, insulinproduzierender Zellen im menschlichen Körper und bei der Verlagerung des (intelligenten) Regelkreises zur Insulinausschüttung in Abhängigkeit vom Blutzuckerspiegel in das autonom funktionierende Implantat (Abbildung 8).

Abbildung 7: Die Integration von Technik, Biologie und Informationstechnik hat bereits Fortschritte in der konventionellen Diabetestherapie ermöglicht

Abbildung 8: Eine biointelligente Diabetestherapie integriert die Funktionen Insulinproduktion, Blutzuckermessung und bedarfsgerechte Insulinabgabe in einem autonom funktionierenden Implantat

Ausgewählte thematische Entwicklungspotenziale

Im Folgenden werden die Entwicklungspotenziale und Herausforderungen für die Biointelligenz an drei Teilbereichen im Themenfeld „Biointelligenz bei aktiven/

aktivierenden Unterstützungssystemen“ erläutert. Diese wurden im Themenfeld-Workshop mit den Teilnehmenden erarbeitet.

Biointelligente Implantate und Transplantate

Biointelligente Implantate und Transplantate zeichnen sich durch ihre funktionelle Integration in den menschlichen Körper aus. Ihre Funktion ist die Unterstützung oder Wiederherstellung physiologischer Organ- und StoffwechsellLeistungen (Vision: Biointelligente, künstliche Bauchspeicheldrüse, S. 31 ff.). Indikationsgebiete liegen in der Regel in der Inneren Medizin und betreffen bspw. Stoffwechselkrankheiten wie Diabetes oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Die oben skizzierte künstliche Bauchspeicheldrüse ist ein Beispiel für ein biointelligentes Implantat.

Man unterscheidet Implantate mit überwiegend strukturellen Funktionen (z. B. Stents, Zahnimplantate) und Implantate, die physiologische Funktionen erfüllen oder Körperfunktionen steuern (z. B. künstliche Bauchspeicheldrüse, Leber-, Nierenersatz, Stammzelltransplantate). Status quo sind vornehmlich Implantate mit struktureller Funktion; durch Anwendung des Konzepts der Biointelligenz könnte die Forschung und Entwicklung auch von Implantaten mit physiologischen Funktionen weitere Impulse erhalten.

Wichtige Trends im Teilbereich sind

- Implantat-Körper-Schnittstelle: Eine zentrale Herausforderung bei Implantaten besteht darin, Geräte zu entwerfen, die physikalisch in lebende Materie integriert werden können und multimodale und bidirektionale Schnittstellen zum Gewebe herstellen. Bisher stand die langfristige Integration des Implan-

tats in den Körper im Vordergrund, ohne Abstoßungsreaktionen hervorzurufen. Deshalb bestehen die meisten Implantate mit strukturellen Funktionen aus biologisch inerten Materialien (z. B. Titan, Keramik, Polymere). Gewisse (unidirektionale) Funktionalisierungen lassen sich durch Oberflächenbeschichtungen mit bioaktiven Molekülen erzielen (z. B. Entzündungshemmung, Besiedlung mit körpereigenen Zellen fördernd). Für biointelligente Implantate muss eine solche Schnittstelle aber bidirektional sein, d. h. sie muss Signale aus dem Körper aufnehmen, zur Informationsverarbeitung im Implantat weiterleiten und in eine wieder in den Körper gerichtete Aktion umsetzen können. Deshalb kommt der Integration von Sensorik, gekoppelt an Signalverarbeitung und Aktorik, in die Implantat-Körper-Schnittstelle eine zentrale Bedeutung für biointelligente Implantate zu. Anwendungen könnten bspw. Implantate sein, die bedarfsgerecht Medikamente freisetzen (siehe Beispiel künstliche Bauchspeicheldrüse).

- Implantate mit integrierter Messfunktion: Implantate mit struktureller Funktion könnten in Richtung Biointelligenz weiterentwickelt werden, wenn sie mit einer integrierten Mess- und Signalgebefunktion ausgestattet werden könnten. Ein Beispiel sind Stents, die über ein geeignetes Signal nach außen melden, wenn sie zu verstopfen drohen. Dadurch würde der Stent das postoperative Monitoring selbst übernehmen, wodurch auf häufige bildgebende Diagnostik verzichtet werden könnte.



- Sich verändernde Implantate: Biointelligente Implantate könnten sich in Größe, Geometrie, funktioneller Eigenschaft im Zeitverlauf angepasst an physiologische Veränderungen in der erkrankten Person verändern: z. B. mitwachsende künstliche Herzklappen bei Kindern, sich mit zunehmender Knochenheilung selbst wieder auflösende Knochenstützimplantate.
- Zellbasierte Implantate: Implantate mit physiologischer Funktionalität könnten durch Integration von physiologisch aktiven Zellen in das Implantat erzeugt werden, da auf diese Weise die in den Zellen bereits realisierten Sensorik-, Signalverarbeitungs- und Antwortprozesse auf die Reize genutzt werden können. Dies erfordert unter anderem Methoden zur Gewinnung, Veränderung, Reprogrammierung und Vermehrung der (ggf. patientenindividuellen) Zellen, Methoden zur dauerhaften Integration der physio-

logisch aktiven Zellen in den Körper (z. B. durch Verkapselung, dreidimensionale Strukturmaterialien, die von den Zellen besiedelt werden, 3D-Druck von Geweben aus mehreren Zelltypen) und die Etablierung von Regelkreisen für die physiologische Funktion sowie Produktionssysteme für zellbasierte (ggf. patientenindividuelle) Implantate.

- Etablierung digitaler Prozessketten: Vor allem Implantate mit stützender Funktion könnten noch besser an die Physiognomie der Erkrankten angepasst werden, wenn durchgängig digitale Prozessketten in der Versorgung etabliert wären. Dann könnten Daten aus bildgebenden Verfahren so aufbereitet werden, dass die Implantate mit CAD/CAM-Verfahren entworfen und produziert werden können. Auch die Optimierung mit Hilfe von Simulationen (z. B. von Belastungsprofilen von Knochen- oder Zahnimplantaten) könnte integriert werden.

Biointelligente Prothesen und biomechanische Unterstützungssysteme

Biointelligente Orthesen und Prothesen werden am (im Gegensatz zu Implantaten aber nicht im) menschlichen Körper getragen. Ihre Funktion ist vor allem die Unterstützung oder Wiederherstellung von Stützfunktionen sowie Bewegungen. Indikationsgebiete liegen in der Regel in der Orthopädie. Ein Beispiel für biointelligente Orthesen wäre eine Schiene, die nach einem Beinbruch steuern könnte, welcher Belastung der heilende Knochen ausgesetzt werden darf. Beispiele für biointelligente Prothesen sind gedankengesteuerte oder fühlende Extremitätenprothesen. Gedankengesteuerte Prothesen werden operativ mit denjenigen Nerven verbunden, die vor einer Amputation die Armmuskeln des Patienten gesteuert haben. Wichtige Trends im Teilbereich sind:

- Sensorik/KI: Stand der Technik ist die (extrakorporale) Messung der elektrischen Signale der Muskelaktivität, um dadurch die auf eine Orthese oder Prothese wirkenden Kräfte, Schwingungen etc. zu ermitteln. Durch die Aufnahme großer Datenmengen und deren Verarbeitung mit Künstlicher Intelligenz erweitern sich die Möglichkeiten, Daten in Echtzeit zu gewinnen und für Modellierungen, Simulationen und Unterstützung von Steuerung der Bewegungsabläufe zu nutzen. Anwendungen könnten bspw. in der Nutzung dieser Informationen für die Optimierung der Prothese und ihre individuelle Anpassung liegen oder in der Unterstützung von Patientinnen und Patienten dabei, das Gleichgewicht zu halten und so Stürzen vorbeugen.



- Individuelle Anpassung und Fertigung im 3D-Druckverfahren: Durch Kombination der Informationen aus diagnostischen bildgebenden Verfahren sowie der Vermessung individueller Bewegungsabläufe in Modellen und Simulationen können Prothesen individuell angepasst und mit CAD/CAM-Systemen und additiven Fertigungsverfahren hergestellt werden.
- Körper-Prothesen-Schnittstellen für gedankengesteuerte und fühlende Prothesen: Besondere Herausforderungen für gedankengesteuerte und fühlende Prothesen sind die funktionelle Ankopplung der Prothese an Nerven und Muskeln der Patientinnen und Patienten (vgl. Biointelligente Unterstützungstechnologien für Neuroanwendungen und Sinneswahrnehmungen, S. 35 ff.). Bislang sind im FuE-Bereich einige wenige Prototypen realisiert worden.
- Intelligente Exoskelette: Passive Exoskelette werden zurzeit in der Pflege zum Patiententransfer erprobt, aktive Exoskelette in der Industrie beim Heben schwerer Lasten. Eine Weiterentwicklung in Richtung Biointelligenz würde es ermöglichen, dass ein Exoskelett verschiedenste Bewegungen unterstützen kann und so eine nahezu normale Bewegungsfreiheit erlaubt, dass die Energieversorgung mit Batterien und die Energieeffizienz deutlich verbessert werden, z. B. durch Miniaturisierung sowie Nutzung

von Energiespeichereffekten, und dass die Unterstützungsleistung in Abhängigkeit von Biomarkern individuell und situativ gesteuert wird.

- Im Bereich urbaner Mobilitätskonzepte ist Smart E-Mobility mittlerweile etabliert. Diese Ansätze könnten darüber hinaus auch für präventive, therapeutische oder Public-Health-Ansätze angewendet werden. Ein gesamtheitliches Konzept könnte dazu beitragen, mobilitätseingeschränkte Personen möglichst lange mobil zu halten bzw. ihre Bewegungsfähigkeit (z. B. nach Unfällen oder Schlaganfällen) baldmöglichst wiederherzustellen. Hierzu werden elektrisch angetriebene biomechanische Leichtbau-Unterstützungssysteme mit Sensor-Aktor-Systemen ausgestattet, die die jeweilige Motorleistung an entsprechende Biomarker anpassen, die in Echtzeit gemessen werden. Darüber hinaus könnten diese Systeme in regionale oder urbane Mobilitätskonzepte eingebunden werden.
- Erschließung neuer Anwendungsbereiche: Bisher werden Prothesen vor allem zur Versorgung akuter Erkrankungen und Mobilitätseinschränkungen eingesetzt. Wie die oben genannten Beispiele zeigen, rückt neben der Rehabilitation zunehmend auch die Prävention in der Arbeitsmedizin und im privaten Bereich in den Fokus.

Biointelligente Unterstützungstechnologien für Neuroanwendungen und Sinneswahrnehmungen

Biointelligente Unterstützungstechnologien für Neuroanwendungen und Sinneswahrnehmungen umfassen die Reiz-/Signalaufnahme, Signalverarbeitung und ggf. Kopplung an eine Reaktion (z. B. Aktorik). Sie unterstützen damit kognitive Leistungen und können beeinträchtigte Sinneswahrnehmungen (z. B. Sehen, Hören, Fühlen) kompensieren. Sie sind daher nicht nur für die Neurologie und häufige neurologische Erkrankungen wie Alzheimer und Parkinson, sondern auch für Indi-

kationsgebiete wie Augen- und Hals-Nasen-Ohren-Erkrankungen relevant. Bei Kopplung an Muskeln ergeben sich Anwendungen im Bereich der biointelligenten Prothesen (vgl. Biointelligente Prothesen und biomechanische Unterstützungssysteme, S. 34 ff.).

Neuroimplantate umfassen dabei sehr unterschiedliche Kategorien und Anwendungen, je nachdem, ob sie das zentrale oder periphere Nervensystem betreffen, und



ob es sich um „lesende“ (Signale aufnehmende) oder „schreibende“ (Signale abgebende) oder Impulse aufnehmende und abgebende Neuroimplantate handelt. Sie befinden sich jeweils in unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Integraler Bestandteil ist in der Regel Künstliche Intelligenz, um die erforderlichen großen Datenmengen verarbeiten zu können und bspw. das immanente Rauschen in Sensordaten zu kompensieren.

Einer der zahlreichen Trends ist die Entwicklung von „sowohl lesenden als auch schreibenden“ und damit biointelligenten Neuroimplantaten des zentralen Nervensystems: Es werden bestimmte Hirnregionen nur in Abhängigkeit vom zuvor gemessenen Zustand stimuliert. Zudem müssen sie eine hohe Funktionsfähigkeit (z. B. hohe Auflösung, Langzeitstabilität) und Alltags-tauglichkeit aufweisen, um tatsächlich die Lebensqualität der Betroffenen verbessern zu können. Zentrale Bedeutung kommt dabei der Gestaltung der Schnittstelle zwischen dem Implantat und den relevanten Nervenzellen zu und der funktionellen Einbindung des Implantats in die relevanten kognitiven oder sinnesphysiologischen Prozesse. Hirnstimulierende Neuroimplantate haben bislang noch zu wenig Elektroden. Eine Erhöhung der Elektrodenzahl erfordert jedoch neben einer weitergehenden Miniaturisierung auch neuarti-

ge (Nano-)Materialien sowie neuartige Konzepte, die Signale aus den Elektroden an die Nervenzellen zu übermitteln – sei es durch Veränderung der Nervenzellmembranen im elektrischen Feld oder durch Beeinflussung der Nervenzellen mit optischen Signalen (Optogenetik). Zudem werden entsprechende Fertigungsverfahren zur Herstellung solcher Implantate und Präzisionsoperationstechniken zur funktionellen Platzierung im Gehirn benötigt.

Während es im Teilbereich der Neuroimplantate schon seit langem Entwicklungen und Fortschritte gibt, ist es bislang nur begrenzt gelungen, Produkte erfolgreich zu kommerzialisieren. So fehlen größere Akteure in Baden-Württemberg, die entsprechende Implantate auf den Markt bringen können, bei mittelständischen Unternehmen reichen die Ressourcen in der Regel nicht aus, um die erforderlichen Klinischen Studien zu finanzieren. Stärken von Baden-Württemberg liegen dagegen in der Zulieferung einzelner Komponenten oder Dienstleistungen für das Implantat-Gesamtsystem. Da auch für diese hoch spezialisierten Zulieferleistungen ein attraktiver Markt besteht, wäre es ein wichtiges Ziel, große Medizintechnik-Unternehmen für die Kompetenzen und Aktivitäten mittelständischer Unternehmen in Baden-Württemberg zu interessieren, um regional übergreifend fortschrittliche Produkte zu lancieren. Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist eine stärkere Vernetzung der vorhandenen regionalen Akteure und Kompetenzen (universitäre klinische Forschung in den Bereichen Neurodiagnostik und Neurochirurgie, KI, Materialentwicklung, Sensorik) und damit der Aufbau eines Innovationsökosystems für biointelligente Neuroimplantate.



Biointelligente Produktionssysteme und -technologien für Ernährung und Gesundheit

Einführung

Die Lebensmittelindustrie hat eine hohe Bedeutung, da der Sektor eine große wirtschaftliche Relevanz hat und die sichere Versorgung der Bevölkerung mit gesunden, hochwertigen Nahrungsmitteln gewährleistet werden muss. Gesellschaftliche Trends, wie Flexibilisierung und Individualisierung, wachsender Stellenwert einer gesunden, nachhaltig hergestellten Ernährung sowie ethische Aspekte (z. B. Tierwohl, Arbeitsbedingungen) spielen eine immer größere Rolle im Konsum- und Ernährungsverhalten der Menschen. Die große Herausforderung besteht in Klimagasemissionen und Umweltverschmutzungen, die die konventionelle Landwirtschaft verursacht. Insgesamt gehen ungefähr 26 Prozent aller Klimagasemissionen auf die moderne Agrar- und Lebensmittelproduktion zurück, über die Hälfte davon auf die Fleisch- und Milchproduktion. Für die Zukunft sind daher Innovationen gefragt, die angemessen die an Bedeutung gewinnenden gesellschaftlichen Trends adressieren und zur Lösung der Nachhaltigkeitsprobleme sowie zum Erhalt und Ausbau der Wettbewerbsfähigkeit der Ernährungsindustrie des Landes Baden-Württemberg beitragen können. Mit der Verabschiedung der Ernährungsstrategie Baden-Württemberg im November 2017 wurde die Verbesserung der Ernährungssituation der Menschen in Baden-Württemberg als Querschnittsthema in allen Politikfeldern des Landes verankert.

Biointelligente Lösungen bieten eine große Chance für das Land Baden-Württemberg und Deutschland, einen Beitrag zur resilienten Versorgung mit gesunden Lebensmitteln zu gewährleisten, die nachhaltig, dezentral und bedarfsorientiert hergestellt werden. Zudem wird damit ein weiteres wichtiges Ziel adressiert: den Sektor zukunftsfähig und innovativ zu machen und somit wirtschaftliches Potenzial und neue Perspektiven für Baden-Württemberg zu schaffen. Dazu könnte die Nutzung neuer, biointelligenter Produktionstechnologien und -systeme einen wichtigen Beitrag leisten.





Biointelligenz bei Produktionssystemen und -technologien für Ernährung

In Anlehnung an Konzept und Ziele der Biointelligenz (S. 12 ff.) wird im Folgenden unter Biointelligenz im Kontext der Ernährung eine gezielte Nutzung des Wissens verstanden, das durch eine zunehmende Konvergenz zwischen biologischen/lebenswissenschaftlichen Disziplinen, Technik und Informationstechnologien hervorgebracht wird. Daraus resultierende Produktionstechnologien und -systeme sollen eine resiliente und bedarfsgerechte Versorgung der Bevölkerung mit gesunden und ernährungsphysiologisch hochwertigen, nachhaltig unter Beachtung ethischer Aspekte produzierten Nahrungsmitteln gewährleisten. Als Beispiel für solche Konvergenz zwischen verschiedenen Technologiebereichen und Disziplinen wäre exemplarisch das In-vitro-Fleisch zu nennen. Dies ist tierisches Muskelfleisch, das nicht durch Tierhaltung und -schlachtung gewonnen, sondern in Bioreaktoren aus Stammzellen produziert wird. Hier-

für muss das Wissen aus Biologie, Biotechnologie und Tissue Engineering mit Produktions- und Informationstechnologien (z. B. Computertechnologien in Verbindung mit KI) kombiniert werden. Die Letzteren werden benötigt, um z. B. optimierte Moleküle zu designen oder Produktionsprozesse zu steuern und zu optimieren.

Vision: Biointelligentes Nahrungsmittelproduktionssystem

Im Folgendem soll ein kurzer Exkurs veranschaulichen, wie ein biointelligentes Nahrungsmittelproduktionssystem in einer mittelfristigen Perspektive aussehen könnte (Abb. 9). Ausgangspunkt eines solchen biointelligenten Produktionssystems von Nahrungsmitteln ist die Entwicklung landwirtschaftlicher Produkte aus Zellkulturen und die Optimierung von Lebensmitteln auf molekularer Ebene nach gewünschten Eigenschaften in Bezug auf

Nährwertzusammensetzung, Sensorik (Textur, Geruch, Geschmack) und funktionelle Eigenschaften. Die Information über die auf molekularer Ebene entwickelten und optimierten Lebensmittel liegen in Form von Daten vor, auf die Food-Designer und Lebensmittelproduzenten zugreifen können (Food-as-Software-Modell). Mit Hilfe solcher Moleküldatenbanken können Lebensmittel in weiteren Iterationen optimiert werden. Unter Einsatz von Künstlicher Intelligenz und Robotik wird eine optimale Kombination von Geschmack, Aroma, Struktur und Nährstoffen festgestellt.

Neben einer optimierten konventionellen Ernährung werden biointelligente Lebensmitteltechnologien die Entwicklung und Bereitstellung von personalisierten Lebensmitteln ermöglichen, die auf individuelle gesundheitliche Bedürfnisse zugeschnitten sind. Auf Basis der Erkenntnisse von Epigenetik, verschiedener „Omic“-Disziplinen, Mikrobiom- und Stoffwechselforschung in

Verbindung mit KI-gestützter Modellierung und Entscheidungsfindung sollen personalisierte Ansätze und Ernährungsstrategien zu Vorbeugung und Management von Erkrankungen entwickelt werden.

Im Produktionsprozess werden innovative Produktionstechnologien benötigt, die eine bedarfsorientierte Produktion von optimierten Nahrungsmitteln ermöglichen. Gefordert sind flexible Maschinen, die für die unterschiedlichen Ausbringungsmengen und variierende Zusammensetzungen konzipiert sind. Bioreaktoren und Tissue-Engineering-Technologien für die Herstellung hochwertiger Proteine wie In-vitro-Fleisch kommen sowohl im großindustriellen Maßstab als auch in kleineren Betrieben zum Einsatz, da so auch der Einzelhandel Produzent wird und bedarfsorientiert Nahrungsmittel anbieten kann. Teilweise werden auch Konsumentinnen und Konsumenten selbst zu Produzenten, da sie bspw. mit Hilfe eines 3D-Lebensmitteldruckers und

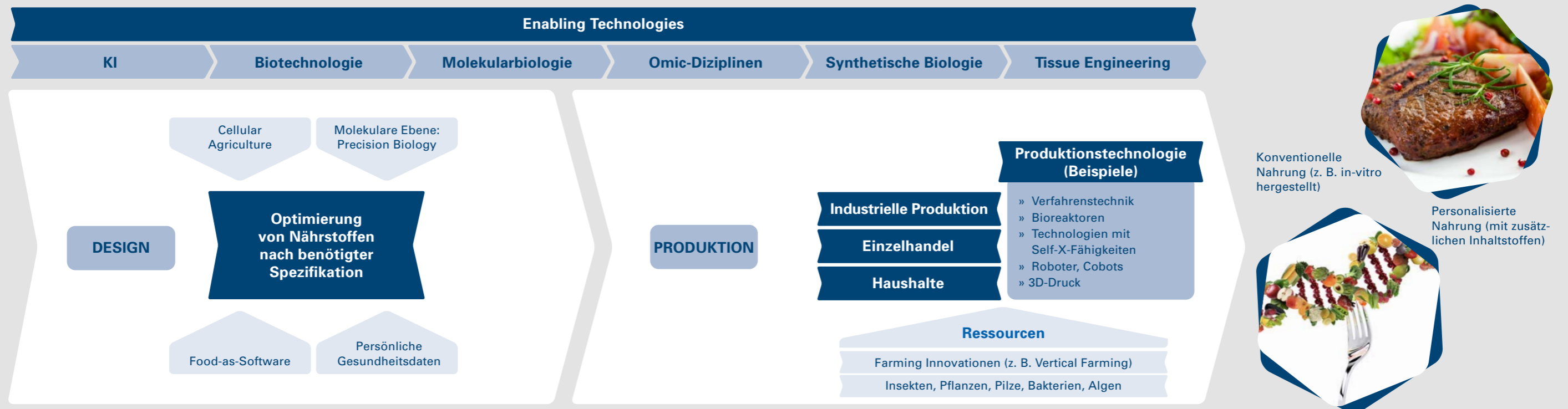


Abbildung 9: Vision für Biointelligenz in Nahrungsmittelproduktionssystemen



Daten zu Nährstoffen und Zutaten in der Lage sein werden, Lebensmittel nach eigenem Geschmack und Nährstoffprofil herzustellen und somit bedarfsorientiert und frisch produzieren können.

In der groß- und kleinindustriellen Produktion werden biointelligente Produktionsanlagen eingesetzt, die neue Zustände oder Abweichungen selbst detektieren und eigenständig auf den geänderten Bedarf adaptiv reagieren. Dieses biointelligente Produktionssystem beinhaltet auch Technologien mit Selbst-X-Fähigkeiten (Selbst-Reinigung, Selbst-Heilung), mit denen Prozesse und Ressourcen optimiert werden können. Aufgrund von hohen Qualitäts- und Hygienestandards im Nahrungsmittelbereich sowie der Vielzahl an komplexen und variierenden

Zusammensetzungen von Lebensmitteln werden einige Bereiche stärker automatisiert. Man wird in verschiedenen Produktionsschritten flexible bioinspirierte Roboter und Cobots benötigen, die sich flexibel an sich ändernde Aufgaben anpassen und den Menschen bei der Arbeit entlasten.

Bei der Versorgung mit Rohstoffen wird auf innovative, dezentrale Lösungsansätze zurückgegriffen, die die Erschließung von teilweise neuen Nährstoffquellen ermöglichen. Dazu zählen Vertical und Urban Farming-Konzepte, Insektenfarmen, aber auch innovative Methoden, die es möglich machen, eigenes Obst und Gemüse auf dem Balkon oder in der Wohnung anzubauen.

Ausgewählte thematische Entwicklungspotenziale

Im Folgenden sollen Entwicklungspotenziale und Herausforderungen für die Biointelligenz an zwei Teilbereichen im Themenfeld „Biointelligente Produktionssysteme und -technologien für Ernährung und Gesundheit“ erläutert werden. Diese wurden im Themenfeld-Workshop mit den Teilnehmerinnen und Teilnehmern erarbeitet.

Zunächst wird im Teilbereich „Neuartige gesundheitsfördernde Lebensmittel und -zutaten“ ein Schwerpunkt auf die personalisierte Nahrung (Abb. 9, rechts unten)

gelegt und die zukünftige Produktvielfalt und deren mögliche Implikationen für biointelligente Lösungen diskutiert.

Danach wird im Teilbereich „Geschlossene Produktionssysteme für die Bereitstellung von Lebensmittelrohstoffen und Lebensmitteln als Alternative zur landwirtschaftlichen Produktion“ – im Kontext der konventionellen Ernährung – ein Beispiel skizziert, bei dem die Anforderungen an und Entwicklungspotenziale von Produktionssystemen/-technologien dargestellt werden.

Neuartige gesundheitsfördernde Lebensmittel und -zutaten

Für die zukünftige Entwicklung und Auswirkungen des Nahrungsmittelsektors ist die Entwicklung neuer Lebensmittel(-zusätze) sowie die Produktvielfalt von großer Bedeutung. Hier sind visionär gedacht unter-

schiedliche Konzepte denkbar. Im Folgenden werden zwei Visionen und Implikationen im Kontext der Biointelligenz skizziert.



Individualisierte Lebensmittel

Ein eher inkrementell fortschrittlicher Ansatz wäre ein Maßschneidern von Lebensmitteln, die auf Bedürfnisse und Präferenzen einzelner Verbrauchergruppen bzw. individueller Verbraucherinnen und Verbraucher zugeschnitten sind. Der Neuheitswert liegt vor allem darin, dass die Individualisierung vor allem auf Verbraucherseite stattfindet: Während sich industrielle Produzenten stärker auf die Lieferung von Zwischenprodukten/Rohlingen fokussieren, erfolgt die individuelle Weiterverarbeitung und Fertigstellung beim bzw. durch Verbraucherinnen und Verbraucher. Die Komplexität und Vielfalt der Endprodukte bleibt demnach erhalten, die Herstellung verlagert sich jedoch stärker in den dezentralen, privaten Bereich. Zur Realisierung dieses Konzepts bedarf es neuer Prozesse, Rezepturen, Maschinen, Verpackungsmaterialien und Logistik- und Distributionskonzepte auf Seiten der Industrie und des Handels, die die Zwischenprodukte bzw. Rohlinge herstellen und vertreiben. Auf Seiten der Endkonsumentinnen und Endkonsumenten erfordert es geeignete Küchenausstattungen, um die bisherige Produktvielfalt auch weiterhin zu erhalten, aber auf die individuellen Präferenzen und Bedürfnisse maßgeschneidert. Um insbesondere eine gesundheitsfördernde, personalisierte Ernährungsweise zu unterstützen, können Biomarker durch geeignete Heimtest- und Monitoringsysteme (z. B. Point-of-Care-Diagnostik, Lab-on-a-Chip, Smart Watches, Wearables) individuell erfasst und in entsprechende personalisierte Ernährungsempfehlungen, Rezepturen und Mahlzeiten umgesetzt werden. Diese Rezepturen enthalten ggf. optimierte Zutatenzusammensetzungen.

Standardnahrung/ „Cyber Food plus Genuss extra“

Ein visionärer Ansatz beruht darauf, dass die Ernährung zum einen die bedarfsangepasste Zufuhr von Nährstoffen gewährleisten soll, zum anderen aber auch hohen Genusswert hat, ein Kulturgut ist und in soziale Prakti-

ken eingebettet ist. Während die Versorgung mit Nährstoffen physikalisch an das verzehrte Lebensmittel gebunden ist, entstehen Geschmack, Genuss, soziale und kulturelle Zuschreibungen aber im Gehirn. Die Vision ist, die bedarfsangepasste Zufuhr von Nährstoffen durch einige wenige ernährungsphysiologisch optimale Standardtemplates/Matrizen zu gewährleisten, die spezifisch an den Nährstoffbedarf bestimmter Bevölkerungsgruppen und Lebensstile angepasst sind (z. B. für Kleinkinder, für hochbetagte Menschen, für Sportlerinnen und Sportler, für chronisch Erkrankte). Die kognitiven und emotionalen Aspekte der Ernährung werden durch geeignete Stimulation der relevanten Hirnregionen realisiert. In Bezug auf die technische Realisierung dieser Stimulation ergeben sich Querbezüge zu Entwicklungslinien, wie sie im Themenfeld „Aktive/aktivierende Unterstützungssysteme“ bei den Neuroimplantaten oder bei aktiven Implantaten, die gesteuert und gezielt Wirkstoffe freisetzen können, diskutiert werden. Mit „Virtual und Augmented Reality“ könnte man das optische Erscheinungsbild der Nahrungsmittel ergänzen sowie das Umfeld, in dem der Verzehr erfolgt. Über virtuelle Vernetzungen von Konsumentinnen und Konsumenten und Geschmackserzeugungen könnten auch gemeinschaftliche Mahlzeiten als wesentlicher Bestandteil von kulturellen und sozialen Praktiken realisierbar werden. Indem die Konsumentinnen und Konsumenten das jeweilige Geschmacks- und Genusserlebnis für den Verzehr des Standardlebensmittels auswählen, bleibt eine große Produkt- und Erlebnisvielfalt gewährleistet, die, da virtuell/simuliert, auch über die Erlebnisse hinausgehen können, die im realen Leben möglich wären.

Nach Einschätzungen der Expertinnen und Experten besteht bereits heute eine hinreichende Wissensbasis für die Zusammensetzung und Herstellungsverfahren für Standardtemplates/Matrizen sowie für die Simulation von Aroma und Optik der Lebensmittel. FuE-Bedarf wird hingegen darin gesehen, die Bedarfe der Konsu-



mentinnen und Konsumenten in Bezug auf Konsistenz, Geruch und Haptik erfüllen zu können. Dies erfordert zwingend die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Ernährungswissenschaften, Neurobiologie und Kognitionswissenschaften. Weiterer FuE-Bedarf besteht in der weitergehenden Differenzierung und Optimierung der Standardtemplates/Matrizen, bspw. in Bezug auf wirtschaftliche und ressourceneffiziente Herstellungsverfahren für einzelne Komponenten und Zutaten sowie ihre funktionelle Integration in die Lebensmittelmatrix (z. B. zur Optimierung von Bioverfügbarkeit, von kontrollierter Freisetzung). Erhebliche Veränderungen sind auch bei der Distribution und Vermarktung zu erwarten, da die Produktvielfalt und Wertschöpfung ja durch Stimulation von kognitiven Leistungen erfolgt, z. B. über Konsum von physiologisch aktiven Wirkstoffen, über Apps, Virtual Reality-Anwendungen o. Ä. Daraus ergeben sich Bedarfe für den Aufbau von neuen Geschäfts-/Organisationsmodellen und Distributionsstrukturen.

Geschlossene Produktionssysteme für die Bereitstellung von Lebensmittelrohstoffen und Lebensmitteln als Alternative zur landwirtschaftlichen Produktion

Biointelligenten Ansätzen werden hohe Potenziale zugemessen, die eine dezentrale Versorgung mit Rohstoffen, die Erschließung neuartiger Nährstoffquellen unter Gewährleistung hoher Qualitätsstandards und eine optimale Verwertung von Reststoffen ermöglichen. Hierzu zählen integrierte landwirtschaftliche Konzepte, die bspw. Vertical Farming, Aquaponik oder Algen- und Insektenzucht miteinander integrieren. Sie tragen zu einer Sektorkopplung und der Implementierung von nachhaltigen Prozessen bzw. (möglichst) geschlossenen Stoffkreisläufen bei, in denen Roh- und Reststoffe optimal verwertet werden. Gerade die Verwertung von Reststoffen aus der Lebensmittelproduktion kann dabei auch Rohstoffe für andere Branchen liefern. Beispiels-

Soziabilität und Akzeptanz als Gestaltungsaspekte

Die beiden hier skizzierten Konzepte haben gemeinsam, dass die Akzeptanz der Verbraucherinnen und Verbraucher zu untersuchen bzw. zu adressieren wäre. Zudem können erhebliche Veränderungen bei der Ernährungskultur eintreten. Beispielsweise haben die skizzierten Konzepte Auswirkungen auf die Bedeutung von bzw. den Bedarf nach einer eigenen Küche, mit Implikationen für den Wohnungsbau. Ausrüstungen für virtuelle Erlebnisse (Neuroprothesen, Helm, Brillen o. Ä.) oder individuelle dezentrale Bedarfe bezüglich der Lebensmittelfertigung (z. B. 3D-Drucker) werden nötig. Daneben stellen sich Fragen der „Soziabilität“, d. h. Fragen nach den Auswirkungen auf die kulturelle und gemeinschaftsfördernde Funktion des Essens. Daher wäre eine Technologiegestaltung anzustreben, die zwar die Individualität und Produktvielfalt in einer gesundheitszuträglichen Ernährung fördert, ohne zugleich einer Vereinsamung Vorschub zu leisten.

weise kann Chitin, das als Co-Produkt der Proteinproduktion mit Insekten anfällt, als biobasierter Rohstoff für biobasierte Materialien und Werkstoffe gewonnen werden. Um diese Vision umzusetzen, bedarf es aus Sicht der Expertinnen und Experten technologischer Lösungen, die dezentral und in Interaktion mit biologischen Systemen (wie z. B. Pflanzen, Insekten) adaptiv und selbstorganisierend agieren. Deren Realisierung wird möglich durch einen verstärkten Einsatz von (Bio-)Sensoren zur Überwachung relevanter Parameter und Monitoring-Systemlösungen, KI-gestützter Echtzeit-Evaluation großer Datenmengen, Modellierung und Vorhersagen zur Optimierung der Prozesse sowie der Nutzung von aus der Natur abgeleiteten Prinzipien



zur Lösung der Optimierungsprobleme wie Schwarmintelligenz (z. B. übersetzt in Computeralgorithmen). Insgesamt gibt es in Baden-Württemberg – insbesondere bei Kooperationen mit den Nachbarbundesländern – ausreichend Kompetenzen und Akteure, z. B. in den Bereichen Vertical Farming und Insektenzucht. Integrierte Systeme gibt es aber bislang noch nicht. Eine der großen Herausforderungen stellt dabei die technische Umsetzung der hoch komplexen integrierten Systeme dar. Daher sollte nach Lösungen gesucht werden, die helfen, diese Komplexität zu bewältigen. Insgesamt wurde der KI eine wichtige Rolle für integrierte Lösungen und das Erzielen der Wirtschaftlichkeitsziele zugewiesen. Für Entwicklung und Umsetzung solcher integrierten Lösungen ist das Zusammenbringen relevanter Akteure und das Bündeln von Kompetenzen entlang des Wertschöpfungsnetzwerkes eine essenzielle Voraussetzung. Dabei wurde die Einschätzung vertreten, dass im Land Kompetenzen auf höchstem Niveau vorhanden sind und damit exzellente Voraussetzungen für biointelligente Lösungen gegeben sind, sofern eine Vernetzung dieser Kompetenzen gelingt: Dies betrifft Kompetenzen im KI-, Sensorik-, Maschinenbau- und Automatisierungsbereich sowie Erfahrungen im Complex Systems Engineering zur Realisierung komplexer integrierter Technologien, eine starke Forschungslandschaft in der Lebensmitteltechnik, Biotechnologie, Landwirtschaft etc. sowie vor allem Start-up-Unternehmen, die in der Entwicklung von Produktionssystemen für Fleischalternativen tätig sind.

Daneben ist die Hygienisierung der Anlagen ein weiterer wichtiger Aspekt. Hier könnte man aus der Krankenhauspraxis lernen. Auch die Kompetenzen in bioinspirierten Oberflächenstrukturierungstechnologien (z. B. funktionale Oberflächen, die Keimwachstum verhindern), die im Lande vorhanden sind, sowie probiotische Hygienestrategien unter Vermeidung oder Reduzierung von Antibiotika- und Pestizideinsatz, bieten



ein Transferpotenzial bei der Adressierung dieses Problems. Darüber hinaus besteht ein dringender Bedarf der Anlagenbetreiber beim Zugang zur wissenschaftlichen Information bezüglich pflanzenspezifischer Versorgung (Breeding, Seeding, Harvesting etc.). Entsprechender Input kann z. B. über Universitäten (Hohenheim, Stuttgart, Freiburg) erfolgen.

Eine große Herausforderung aus Sicht der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit ist der Energieverbrauch, da intelligente, integrierte Lösungen und das dabei eingesetzte Technologiearsenal (vor allem Beleuchtung, Klimatisierung, Computertechnologien) einen enormen Energiebedarf haben. Aber auch die politischen Rahmenbedingungen haben einen großen Einfluss darauf, dass Technologien und Produkte erfolgreich implementiert werden und Marktbarrieren überwunden werden. Hierbei wird die Rolle der Politik als zentral gesehen, die Kostenwettbewerbsnachteile nachhaltiger Technologien und Lebensmittel auszugleichen. Hierzu gehören regulatorische Aspekte, wie z. B. die Überprüfung der Klassifizierung von Insektenzucht oder Indoor Farming, die, wenn sie weiter als landwirtschaftliche Betriebe zählen wollen, sich in der Regel nicht in Gewerbegebieten ansiedeln dürfen.

Biointelligente Baumaterialien und Werkstoffe für Konsumgüter



Einführung

Expertinnen und Experten aus verschiedenen Bereichen sind sich einig, dass die Biologie bei der Erforschung, Entwicklung und Anwendung von Materialien an Bedeutung zunimmt und für die Industrie in verschiedenen Branchen geeignete Lösungen bieten kann. Sie liefert eine große Toolbox an Technologien und Einsatzstoffen, welche die Möglichkeiten erweitern, schnellere, günstigere und flexiblere Entwicklungen voranzutreiben und nachhaltigere Lösungen zu finden.

Dabei kann Baden-Württemberg als Schlüsselregion definiert werden, da es zum einen über eine gut ausgebaute anwendungsorientierte Forschungslandschaft verfügt. So haben die Forschungszentren, wie z. B. die der Fraunhofer-Gesellschaft, die Universitäten Freiburg, Tübingen und Stuttgart, das Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf, die Hohensteiner Institute, das Karlsruher Institut für Technologie, das Staatliche Museum für Naturkunde Stuttgart sowie die Hochschu-

len Reutlingen und Mannheim das Potenzial und die Relevanz von biointelligenten Materialien erkannt und arbeiten an entsprechenden Forschungsprojekten. Zum anderen weist Baden-Württemberg aber auch starke Anwendungsindustrien für Materialien auf, insbesondere das größte Cluster für den Automobilsektor. Durch inter- und transdisziplinäre Zusammenarbeit sowohl zwischen Bio- und Materialwissenschaften als auch zwischen Materialentwicklung und Anwendungsbranchen kann die gemeinsame Entwicklung von neuen Lösungen und neuen biointelligenten Materialien vorangetrieben werden. Somit hat die Region sowohl ein großes Potenzial, aber auch einen hohen Bedarf an innovativen, industriell relevanten Lösungen.

Biointelligenz in der Materialentwicklung

Die Materialforschung hat in den letzten Jahren vielfältige Innovationen hervorgebracht, die durch die Konvergenz von zwei der drei Schlüsselbereiche der Biointelligenz (Technik, Informationstechnik und Biologie) ermöglicht wurden. Beispielhaft zu nennen sind:

- Konvergenz von Informationstechnik und (Fertigungs-)Technologie: Weiterentwicklung und Verbesserung von Prozesstechnologien wie dem 3D-Druck, unter anderem zur Herstellung reaktionsfähiger und programmierbarer Materialien.
- Konvergenz von Informationstechnik und Lebenswissenschaften: Der zunehmende Einsatz von Informationstechnologien (Bioinformatik, KI) vor allem auch in Bereichen der Systembiologie hat einen großen Einfluss auf die Entwicklungen in den Verständnisprozessen der Biologie und ihrer Systeme. Sie ermöglicht einerseits ein besseres Verständnis von biologischen Prozessen, die bspw. der Selbstheilung und Biosensorik zugrunde liegen. Andererseits können Ansätze zur gezielten Veränderung dieser biologischen Prozesse und Moleküle hierdurch beschleunigt und in ihrer Effizienz gesteigert werden.
- Konvergenz von Lebenswissenschaften und Technik: Durch innovative biotechnische Prozesse können zum einen neue Klassen von biobasierten Materialien erschlossen werden (z. B. Biokunststoffe, rekombinante Spinnenseide). Zum anderen können durch Fortschritte in der Synthetischen Biologie auch Materialien biotechnisch hergestellt werden, die in der Natur nicht vorkommen und technisch interessante Funktionalitäten aufweisen.

Über die Konvergenz von nur zwei Bereichen hinaus ergeben sich perspektivisch noch weitreichendere Möglichkeiten für die Materialentwicklung, wenn alle drei

Schlüsselbereiche Technik, IT und Biologie kombiniert werden, z. B. auf dem Gebiet programmierbarer und reaktionsfähiger biointelligenter Materialien.

Biointelligente Ansätze in der Materialentwicklung lassen sich auf verschiedene Weise einordnen (vgl. [Materialien, S. 25 ff.](#)). Eine mögliche Einordnung wäre dabei wie folgt (siehe Abb. 10):

Ausgehend von einem biologischen Konzept, Prozess, Material oder einer Struktur: Lebens- und Materialwissenschaften erforschen seit Jahren Strukturen und Materialien aus der Natur, deren Eigenschaften für technische Anwendungen relevant erscheinen, aber mit konventionellen Konstruktionen oder Verfahren bislang nicht erreicht werden können. Nach Aufklärung der zugrunde liegenden Mechanismen wird versucht, diese in technische Anwendungskontexte zu übertragen.

Beispiele hierfür sind Wabenstrukturen, Gehäuse von Mollusken, Geckofüße, Flugmechanismen von Vögeln, die Struktur von Haihaut, Knochenstruktur als Leichtkonstruktion oder auch die Paradiesvogelblume als Sonnenschutz. Diese biologischen Phänomene liefern Fähigkeiten und Eigenschaften, die über das konventionelle Konstruieren und Entwickeln hinausgehen.

Diese charakteristischen Eigenschaften werden von verschiedenen Disziplinen verwendet, wie der IT, den Ingenieurs- und Materialwissenschaften sowie der Chemie und Physik.

Vision: Biointelligente Materialentwicklung

Beispiele für die Entwicklung biointelligenter Materialien sind funktionelle Oberflächen und Textilien,

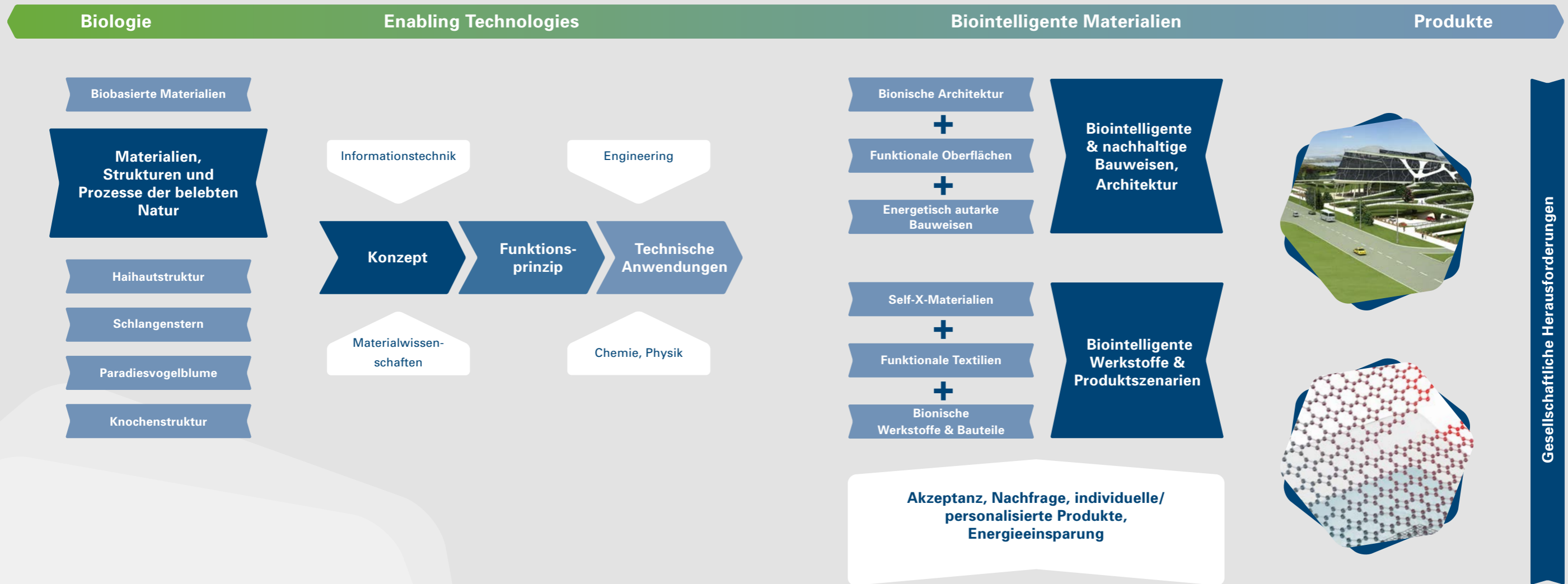


Abbildung 10: Elemente und deren Zusammenspiel bei der Entwicklung biointelligenter Materialien am Beispiel von Bau, Architektur, Werkstoffe und deren Produkte

selbstheilende Materialien (z. B. selbstheilender Beton etc.) und weitere bionische Materialien. Sie bieten bspw. selbstreinigende/schmutzabweisende Oberflächen, Leichtkonstruktionen oder antimikrobielle Oberflächen. Für derartige Materialien ergibt sich ein breites Spektrum an potenziellen Anwendungsbereichen: Sie können unter anderem in der Automobilindustrie, der

Aeronautik und in der Konstruktions- oder medizinischen Industrie eingesetzt werden. In Abbildung 10 sind entsprechend des Workshop-Fokus lediglich die Anwendungen für nachhaltige Bauweisen (im Sinne von Baumaterialien) und Architektur sowie für Werkstoffe und (End-)Produkte genannt, die in den folgenden Teilabschnitten vertieft werden.

Ausgewählte thematische Entwicklungspotenziale

Im Folgenden sollen wie schon erwähnt die Entwicklungspotenziale und Herausforderungen für die Biointelligenz bei den Anwendungsfeldern bzw. Teilberei-

chen Baumaterialien sowie für Werkstoffe und (End-)Produktszenarien erläutert werden. Diese wurden im Themenfeld-Workshop mit den Beteiligten erarbeitet.

Biointelligente Baumaterialien

Biointelligente Lösungen und allgemein die verstärkte Nutzung biologischer Prinzipien sowie die direkte Inte-

gration der Biologie in Produkte und Verfahren weisen ein hohes Potenzial auf, zur Transformation des Bausek-



tors beizutragen. Neben der Schaffung von Produkten und Prozessen mit neuen Eigenschaften (z. B. selbstregulierende Luftreinigung von Gebäuden, Flammenschutz) sollten biointelligente Lösungen zur Reduzierung des Material- und Energiebedarfs und der Reduktion der Treibhausgasemissionen beitragen. Aufgrund des sehr hohen Materialeinsatzes im Baugewerbe sind hiervon besonders signifikante Effekte zu erwarten. Zusätzlich dient die Biologie als Vorbild, um die bisher wenig nachhaltigen Wertschöpfungsketten im Bauwesen mithilfe biointelligenter Materialien in nachhaltigere, stoffkreislauffähige Wertschöpfungsnetzwerke umzubauen.

Möglichst geschlossene Materialkreisläufe werden als ein wichtiges Ziel der Forschung, Politik und Industrie gesehen. Materialien müssen in Zukunft prinzipiell ganzheitlich geplant und betrachtet werden (Bauernhansl et al. 2019). Dies umfasst die gesamte Lebensspanne, von der Herstellung, über die Nutzung und spätere Verwertung bis zur Rückführung in den Materialkreislauf (Cradle to Cradle). Wichtige Ziele sind die Abbaubarkeit von Produkten, ihre stoffliche Trennbarkeit, die Entwicklung von kreislauffähigen Materialien und neuer biobasierter Werkstoffe, die so designt sind, dass sie eine hohe Recyclingfähigkeit im Anschluss an ihre Erstverwendung aufweisen. Dementsprechend kommt auch innovativen Recyclingmethoden des werkstofflichen und chemischen Recyclings eine hohe Priorität zu. Auch der KI kommt eine besondere Bedeutung zu, insbesondere bei der Entwicklung neuer biointelligenter Werkstoffe sowie der Sortierung von Abfallströmen.

Ein weiteres relevantes Thema sind aktive Funktionalisierungen von Gebäude-/Fassadenoberflächen, sodass sie z. B. zur Energiewandlung oder zur Luftreinigung beitragen oder selbstreinigend sind. Besonders zukunfts-trächtige Anwendungen sind dabei bspw.: Nutzung der Fassade für Kühlung/Heizung des Gebäudes,

selbst-regenerierende Luftreinigungs-Oberflächen, Energiegewinnung und -nutzung (z. B. über künstliche Photosynthese) und allgemein die Begrünung von Fassaden. Lern- und Kooperationspotenzial für das Bauwesen gibt es hier bspw. mit der Automobilindustrie, die bereits erfolgreiche Konzepte der Luftreinigung bzw. Selbstreinigung entwickelt und implementiert hat.

Während es folglich erhebliche Fortschritte in verschiedenen Disziplinen zum stärkeren Einsatz von organischen Materialien oder bioinspirierten Lösungen gibt – die nur im erweiterten Sinne der Biointelligenz zugerechnet werden können – findet eine Integration von biobasierten Materialien und biologischen Systemen in klassischen Baumaterialien (z. B. Mikroorganismen in Beton, Einsatz von Mikroalgen in Gebäudefassaden zur Luftreinigung), Materialverbänden oder -produkten allerdings eher langsam statt. In diesem Bereich wird sehr viel geforscht, und gerade in Baden-Württemberg gibt es eine Reihe von FuE-Akteuren, die in den letzten Jahren große Fortschritte erzielen konnten. Dennoch stellt die Umsetzung im industriellen Maßstab eine bisher wenig adressierte, große Herausforderung dar. Die Immobilisierung oder Integration sowie die Aufrechterhaltung der Funktionen von Organismen in Materialien stehen hierbei im Vordergrund. Dies gilt bspw. für selbstheilenden Beton. Bisher werden lediglich in der Biomedizin die Integration von lebenden biologischen Organismen bzw. Zellen in Materialverbänden anwendungsnah beforscht, umgesetzt und auch nennenswerte Erfolge erzielt. Hier bietet sich ein großes Transfer- und Lernpotenzial bei der Entwicklung und Produktion biointelligenter Materialien für andere Bereiche.

Themenübergreifend lassen sich die Bedeutung und Kooperationspotenziale bei einer Nutzung biointelligenter Prinzipien im Teilbereich „Biointelligente Baumaterialien für Baden-Württemberg“ als hoch ein-



schätzen. Hier sind Wissenschaft und Forschung gefragt, aber auch die Zusammenarbeit mit Architektinnen und Architekten, Ingenieurinnen und Ingenieuren sowie Anwenderinnen und Anwendern wird unabdingbar sein. Bislang sind für manche Themen Netzwerke in Baden-Württemberg etabliert (z. B. AFBW - Allianz Faserbasierte Werkstoffe Baden-Württemberg, proHolzBW), aber zusätzlicher Bedarf ist mannigfaltig zu erkennen. Bei der Kommerzialisierung neuartiger, biointelligenter

Produkte stellen Produktstandards, Auflagen und Zulassungsbestimmungen ein Hemmnis für die Markteinführung dar. Gesetzliche Anforderungen können aber auch ein Treiber für diese neuartigen Produkte sein: So gibt es bspw. kommerzielle Entwicklungen mit biobasierten Materialien, die Flammchutzanforderungen besser als konventionelle Produkte erfüllen. Im Rahmen der Kreislaufwirtschaft spielt vor allem die Festlegung von Recyclingquoten eine wichtige Rolle.

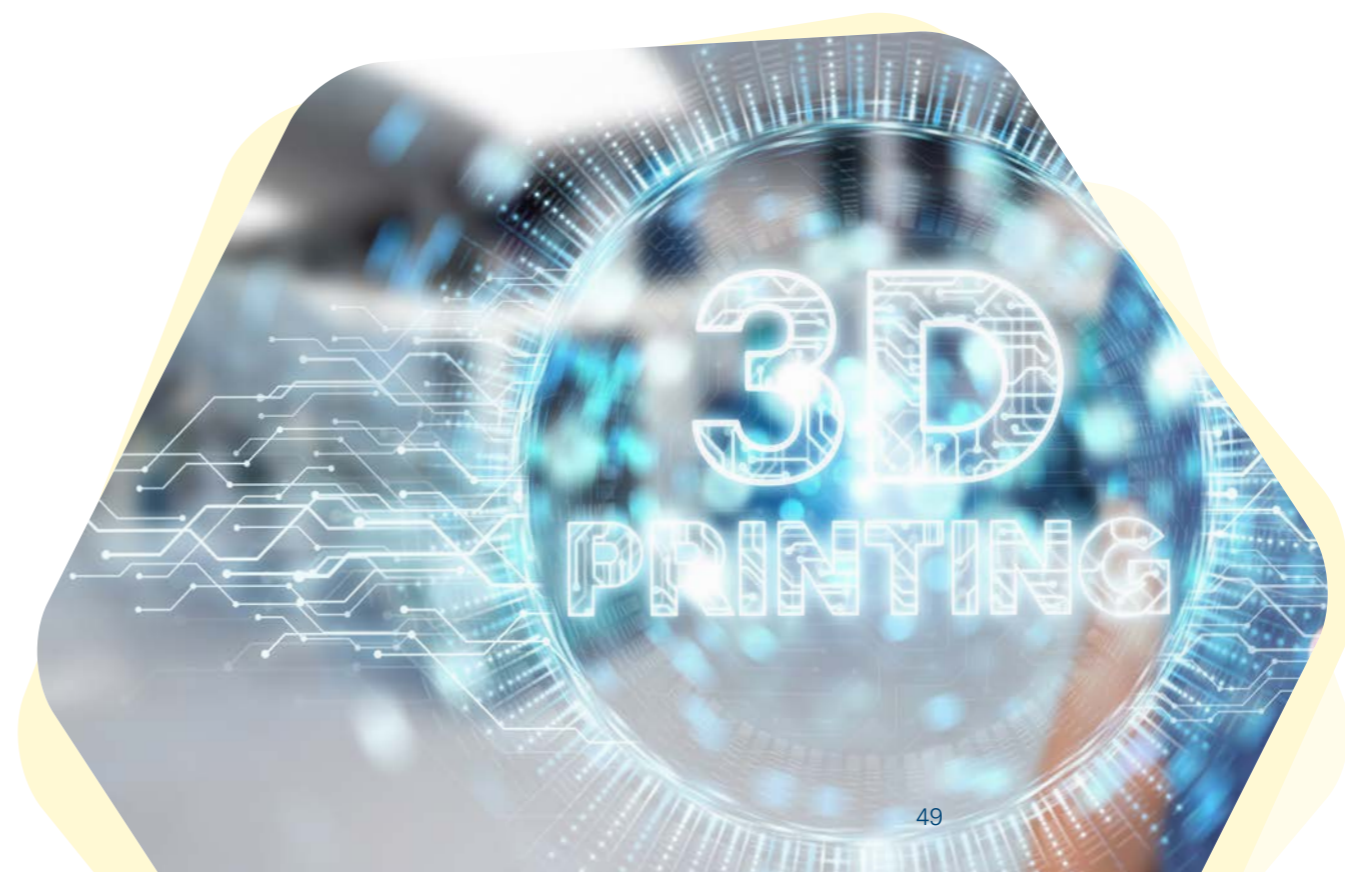
Biointelligente Werkstoffe und Produktszenarien

Mehrere interessante Themen wurden von Workshop-Teilnehmenden im Bereich biointelligente Werkstoffe und Produktszenarien identifiziert. Diese lassen sich in vier Kategorien zusammenfassen:

1. Materialeigenschaften:

- Bioabbaubarkeit on demand.
- „Lebende“, sich selbst erhaltende Materialien mit adaptiven und regelbaren Eigenschaften/Funktionen.

- Schaltbare Materialien und Oberflächen, bei denen Reize über materialintegrierte Sensorik Materialänderungen in Bezug auf Struktur und/oder Eigenschaften bewirken, auch gezielte Stimulationen sind möglich.
- Steuerbare (on demand) Multifunktionalität von Materialien.
- Materialvielfalt durch Strukturierung weniger einfacher Materialien on demand erfordert auch zusätzliche Materialentwicklung für neue Strukturen.





2. Prinzipien:

- Funktionsprinzipien der Natur als Vorbild für Industrie 4.0 nutzen (Modularität, Redundanz, Regulation, Adaption, Selbststeuerung usw.).
- Selbstreinigung.
- Materialeffizienz durch hohe Integration von verschiedenen Elementen.

3. Produkte:

- Programmierbare Bioabbaubarkeit in Produkte integriert (bspw. enzyminduziert).
- Biointelligente Sensoren (z. B. CO₂-Sensoren für Masken), auch in Kombination mit Abbaubarkeit on demand denkbar.

4. Prozesse:

- Werkzeuge der Natur (z. B. Enzyme) werden eingesetzt, um Materialien zu erzeugen. Hierfür sind auch neue Reaktoren erforderlich.
- Biointelligente Produktion von Werkzeugen/Produkten on demand.
- Integration von speziellen Mechanismen aus der Natur in die Steuerungstechnik (einfache und wenige Regeln statt komplexer Algorithmen).
- Faseraufbauprozesse.
- Ein Beispiel, das im Workshop vertieft wurde, sind Verfahren mit Analogie zum 3D-Druck, bei denen mit Hilfe von Enzymen aus biogenen Rohstoffen Gegenstände hergestellt werden. Dabei können sowohl enzymatische Synthese- als auch Abbaureaktionen genutzt werden, was neue Möglichkeiten für die Strukturierung komplexer Konstrukte eröffnet.

Bereits heute wird dies anhand verschiedener biogener Ausgangsmaterialien und Prozesse vor allem in der Forschung durchgeführt, bspw. werden mit Chitosanpulver als Rohstoff bereits hohe Festigkeiten erreicht. Zukünftige Potenziale ergeben sich hierbei auch durch eine höhere Energieeffizienz im Vergleich zu etablierten 3D-Druckverfahren, da mit wesentlich niedrigeren Temperaturen gearbeitet werden kann. Weitere Rohstoffe (z. B. Lignin) oder die Koppelung mit anderen Wertschöpfungsketten (bspw. von Chitin als Reststoff der Insektenproduktion für Futter- und ggf. Nahrungsmittel) eröffnen weitere Perspektiven.

Bei vielen dieser Themen besteht noch zusätzlicher Forschungsbedarf, bevor Industrieakteure involviert werden können, wobei die frühzeitige Ausrichtung auf die Industrie gegeben sein muss. Über die Schließung von Wissenslücken hinaus ist es für die erfolgreiche Entwicklung der Biointelligenz in Baden-Württemberg wichtig, geeignete Kooperationen zwischen den Akteuren und damit ein funktionierendes Ökosystem für biointelligente Materialien zu etablieren, sowohl zwischen verschiedenen Industriesektoren als auch zwischen Wissenschaft und Industrie (kleine und große Unternehmen). Diese umfassen unter anderem die Branchen/Gebiete Chemische Industrie, Verfahrenstechnik (Entwickler neue Maschinen, Prozesse und Technologien, wie z. B. 3D-Drucker), Sensorik, Medizintechnik (relevanter, wenig preissensibler Anwendungsbereich), Automobil (relevanter Anwendungsbereich aufgrund Multifunktionalität, Kreislaufführung, Gewichtseinsparung durch biointelligente Materialien).



Übergreifende Erkenntnisse zu den Themenfeldern

Die in diesem Projekt durchgeführten sondierenden Workshops haben klar gezeigt, dass in den ausgewählten Wertschöpfungssystemen (Gesundheitsindustrie, Produktion/Ernährung, Material) und darin diskutierten Themenfeldern hohe Potenziale der Biointelligenz existieren. Zwar konnten in den Workshops jeweils nur Ausschnitte in den Teilbereichen der insgesamt potenziell relevanten Themen diskutiert und vertieft werden. Dennoch lassen die Workshops insgesamt darauf schließen, dass das Konzept der Biointelligenz ein katalytisch wirksames Vehikel ist, welches auch für weitere Wertschöpfungssysteme in Baden-Württemberg ähnlich hohe Potenziale zutage fördern könnte. Daher sollte die Biointelligenz weiterverfolgt und in weiteren Wertschöpfungssystemen initiiert werden. Zudem konnten in den drei durchgeführten Workshops wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, wie ein Prozess ausgestaltet werden sollte, in dem mit dem Konzept der Biointelligenz Impulse für eine zukunftsorientierte Transformation der Wirtschaft in Baden-Württemberg gesetzt werden. Im Folgenden werden die gewonnenen Erkenntnisse dargestellt, um sie dann in [Empfehlungen und Aktions-Roadmap \(S. 54 ff.\)](#) zu Handlungsempfehlungen zu verdichten und eine konkrete Aktions-Roadmap zu entwerfen.

Erkenntnisse für die Prozessausgestaltung zur Implementierung biointelligenter Lösungen

Workshops: In dieser Studie haben sich moderierte Workshops, die die Möglichkeit zum intensiven kommunikativen Austausch bieten, als geeignetes Format bewährt, mithilfe des Konzepts der Biointelligenz Potenziale für die Transformation der Wirtschaft zu



identifizieren. Die Ergebnisse der Diskussionen waren abhängig von der Zusammensetzung der Kreise der Teilnehmenden und der Diskussionsdynamik in den jeweiligen Veranstaltungen und beeinflussten damit auch die Entwicklungslinien, Visionen und Potenziale, die im Einzelnen herausgestellt wurden.

Teilnehmende der Workshops: Als kritischer Erfolgsfaktor für die Workshops ließ sich die Notwendigkeit identifizieren, dass alle relevanten Fachrichtungen der konvergierenden Technologien (Technik, Informationstechnik, Biologie) und ein breites Spektrum der inter- und transdisziplinären Expertisen präsent sein mussten, um Potenziale identifizieren zu können. Dabei sollten nicht nur naturwissenschaftlich-technische Expertinnen und Experten einbezogen werden, sondern auch solche sozialwissenschaftlicher Disziplinen. Besonders wichtig erwies es sich, die Technologieperspektiven durch



Anwender- und Anwendungsexpertisen zu ergänzen. Dabei ist darauf zu achten, dass auch Anwenderinnen und Anwender aus anderen Branchen einbezogen werden, da sich häufig bereits kurzfristig zu erschließende Potenziale der Biointelligenz daraus ergeben, dass Lösungen aus einem Sektor in einen anderen übertragen werden.

Sektor- und Wertschöpfungssystem-spezifische Vorgehensweise: Die Workshops haben gezeigt, dass bei ihrer konkreten Ausgestaltung zwingend beachtet werden muss, wie gut die Biointelligenzperspektive im jeweiligen Wertschöpfungssystem und Themenfeld bereits verankert ist:

- In Wertschöpfungssystemen, denen biologische Verfahren eher fern liegen, ist kurz- und mittelfristig das höchste Potenzial für solche Anwendungen, Produkte und Dienstleistungen zu sehen, die der Biointelligenz nur im weiteren Sinne zurechenbar sind, da in der Regel nur zwei der drei Technologiebereiche konvergieren: Hierzu zählen bspw. bioinspirierte Ansätze, in denen Anleihen für das Design bei biologischen Vorbildern genommen werden, oder sie betreffen bspw. biobasierte Materialien. Dennoch sind auch diese Potenziale hoch relevant, da sie wesentliche Schritte im Transformationsprozess in Richtung der Biointelligenz darstellen und beschränkt werden sollten, auch weil sie insbesondere Unternehmen motivieren können, sich der Biointelligenz zu öffnen. Gleichwohl besteht hier noch Bedarf, über kurzfristig zu realisierende Anwendungen auch die Anwendungen zu identifizieren, die nur durch die Konvergenz aller drei Bereiche (Biologie, Technik, Informationstechnik) realisierbar erscheinen.
- In Wertschöpfungssystemen, in denen die Biointelligenzperspektive schon seit längerem verankert ist, können durch einen rein technologischen Zugang

zur Biointelligenz nur sehr begrenzt Impulse gesetzt werden, die über den Status quo hinausgehen. Ein wesentlicher Grund hierfür dürfte sein, dass die Konvergenz verschiedener Disziplinen aus Lebenswissenschaften, Technik und Informationstechnologie in diesem Wertschöpfungssystem bereits vollzogen ist, interdisziplinäre Ansätze und Zusammenarbeit im FuE-Kontext üblich sind und z. T. bereits in der Entwicklung von kommerziellen Produkten und Prozessen Anwendung finden. Die relevanten Akteure sind disziplinenübergreifend und entlang der Wertschöpfungskette bereits organisiert. Hier kann das Biointelligenzkonzept dennoch Impulse geben, wenn die technologieorientierte Diskussion durch eine anwendungsbezogene, an Bedarfen ausgerichtete Eruiierung der Potenziale ergänzt wird und zudem neue Anwendungsgebiete außerhalb des etablierten Wertschöpfungssystems in den Blick genommen werden. Bspw. sind bei aktiven/aktivierenden Unterstützungssystemen neue Anwendungsgebiete außerhalb der medizinischen Diagnostik und Therapie denkbar; dies sind insbesondere Prävention, Pflege, Selbstoptimierung im privaten und im Freizeitbereich sowie industrielle Produktion und Mobilität. Zu deren Erschließung sind zusätzliche Initiativen und der Einbezug zusätzlicher Akteure aus angrenzenden Branchen nötig.

Erkenntnisse zu den Bedarfen der Akteure bezüglich innovationspolitischer Maßnahmen

Die oben genannten Erkenntnisse implizieren, dass je nach Sektor oder Thema spezifische Herausforderungen bei der Weiterentwicklung der Biointelligenz bestehen. Es lassen sich aber auch branchen- und themenübergreifende Stärken und Ansatzpunkte für die weitere Vorgehensweise ableiten:

1. Baden-Württemberg weist ein großes Potenzial in Bezug auf FuE-Kapazitäten und eine breite Wissensbasis in vielen relevanten Bereichen auf. Auch in der

Industrie gibt es viele wichtige Akteure. Bislang fehlt aber noch die Vernetzung und ein enger Austausch zwischen diesen, der zur Identifizierung von neuen Optionen für die Wirtschaft führt. Forschende aus unterschiedlichen Disziplinen, z. B. aus der Biotechnologie, Materialwissenschaft, Chemie, Informatik und dem Maschinenbau sollten mit Unternehmen, potenziellen Anwenderinnen und Anwendern sowie Praktikern in einem inter- und transdisziplinären Austausch zusammengebracht werden, um relevante Zukunftsthemen zu identifizieren und anschließend gemeinsam umzusetzen.

2. Um einen erfolgreichen Transfer aus der angewandten Forschung in die kommerzielle Nutzung zu ermöglichen, sind gut funktionierende Ökosysteme erforderlich. In Bezug auf die Biointelligenz ist ein Um- und Ausbau bestehender Ökosysteme und eine neue Vernetzung dieser untereinander erforderlich. Hier sollten sich die Akteure entlang von Wertschöpfungssystemen und über Disziplingrenzen hinweg miteinander vernetzen, um den gemeinsamen Interessenaustausch zu pflegen, gegenseitiges Vertrauen aufzubauen und Bedarfe zu identifizieren und abzustimmen. Damit einhergehend ist es von unabdingbarer Bedeutung, eine gemeinsame Sprache über Fachdisziplinen und Wirtschaftsbereiche hinweg zu entwickeln.
3. Bereits heute zeichnet sich Baden-Württemberg durch eine ausdifferenzierte Clusterlandschaft, durch Netzwerke, Arbeitsgruppen und Gremien für verschiedene Entwicklungs- und Anwendungsbereiche aus. Dies stellt eine hervorragende Ausgangssituation dar, um die vielfältigen Anknüpfungspunkte für die Biointelligenz herauszuarbeiten. Hierfür sind jedoch teilweise noch zusätzliche Vernetzungsaktivitäten und Informationsvermittlung nötig.

¹⁸ Ein Beispiel für Zulassungsfragen im Mobilitätsbereich ergeben sich z. B. bei elektrisch angetriebenen, biomechanischen Leichtbau-Unterstützungssystemen (vgl. Biointelligente Prothesen und biomechanische Unterstützungssysteme, S. 34 ff.)



4. Biointelligente Innovationen entstehen häufig an den Schnittstellen zwischen etablierten Themenfeldern, für die in der Regel spezifische Regulierungen und Standards zu befolgen sind. Hier besteht Bedarf, die regulatorischen Aspekte frühzeitig im Innovationsprozess zu adressieren. Dies kann aus Sicht der Akteure bedeuten, dass ggf. Expertise zu regulatorischen Anforderungen durch Kooperationen zu erschließen sind. Teilweise ist aber auch von politischer Seite zu prüfen, ob Anpassungen nötig und möglich sind. Diese Aspekte und Herausforderungen sind recht anwendungsspezifisch und auf unterschiedlichen Handlungsebenen (EU, national, regional) verankert. Dazu gehören bspw. die
 - Zulassung von Produkten (z. B. Gesundheitswirtschaft, Mobilität¹⁸),
 - Produktkennzeichnung,
 - Produktionsauflagen (z. B. Good Manufacturing Practice (GMP) in der pharmazeutischen Produktion),
 - Haftungsfragen (z. B. Mensch-Technik-Interaktion),
 - Ge-/Verbote (z. B. Anforderungen an Flammschutz, Abbaubarkeit von Materialien usw.),
 - Nachhaltigkeitspolitik hin zur Förderung einer zirkulären Wirtschaft durch Recyclingquote oder Einsparziele von CO₂-Emissionen etc..



Empfehlungen und Aktions-Roadmap

Wie die vorangegangenen Abschnitte deutlich gemacht haben, sind die wirtschaftlichen Potenziale der Bio-intelligenz vielfältig, und Baden-Württemberg verfügt über ausgezeichnete Voraussetzungen. Um diese Potenziale für die Wirtschaft zu heben und im Weiteren zu realisieren, ist ein koordinierter, strategisch angelegter Prozess erforderlich.

Das jeweilige Förderinstrumentarium sollte dem aktuell unterschiedlichen Entwicklungsstand und der wahrscheinlich unterschiedlichen Entwicklungsgeschwindigkeit der verschiedenen Ansätze und Themen in den jeweiligen Wertschöpfungssystemen Rechnung tragen. Zudem ist zu beachten, dass sich die Akteure nicht in allen Forschungs- und Wirtschaftsbereichen über das Konzept der Biointelligenz mobilisieren lassen. Daher kann es in bestimmten Fällen zielführender sein, weniger explizit das Konzept der Biointelligenz in den Vordergrund zu stellen, sondern vor allem auf inhaltlicher, konkreter Themenebene anzusetzen.

Aufgrund dieser Anforderungen schlagen wir ein Gesamtkonzept aus mehreren, zeitlich gestaffelten und miteinander verbundenen Modulen vor, das einen Zeitraum von etwa 7 bis 8 Jahren abdeckt. Die Module sind jeweils Themen- bzw. Wertschöpfungssystem-spezifisch auszugestalten und auch Beginn und Dauer jeweils anzupassen. Die Module sind mit einer beispielhaften Dauer in Abbildung 11 skizziert, diese würde eben je nach Wertschöpfungssystem unterschiedlich aussehen. Es wird empfohlen, mit der Förderung solcher Themen und Sektoren anzufangen, die eine hohe Bedeutung für Baden-Württemberg haben, und für die sich das Konzept zeitnah umsetzen lässt. Essenziell ist, keine Parallelstrukturen zu bisherigen Fördersystemen und Netzwerken zu bilden, sondern es sollte so weit wie möglich an existierende Strukturen angeschlossen, diese eingebunden und auf diesen aufgebaut werden.

Im Folgenden werden die einzelnen Module dieses Konzepts erläutert (Abb. 11).

Informationen/Mobilisierung

Wenngleich das Konzept der Biointelligenz – oder zumindest die dahinterliegenden Ideen – in der jüngeren Vergangenheit an Bekanntheit und Bedeutung gewonnen haben, sind neben der Fortsetzung der bisherigen Aktivitäten (z. B. vom Kompetenzzentrum Biointelligenz) unbedingt auch zusätzliche Informations- und Mobilisierungsaktivitäten nötig, um weitere potenzielle Akteure in einem breiteren Umfeld anzusprechen und zur Teilnahme an Workshops im Rahmen des Themenfindungs- und Konsortienbildungsmoduls zu motivieren. Ziel ist es daher, das Konzept und/oder die thematischen Potenziale allen Stakeholdern entlang der relevanten Wertschöpfungssysteme (vor allem Forschung, Wirtschaft, ggf. auch Nicht-Regierungsorganisationen, interessierte Öffentlichkeit, Politik) bekannt zu machen und Interesse an der Thematik zu wecken. Dabei sollte das Potenzial und der Nutzen für die verschiedenen Stakeholdergruppen deutlich gemacht werden. Aufgrund der zentral mit der Biointelligenz verknüpften Technikkonvergenz besteht eine besondere Herausforderung darin, möglichst alle Akteursgruppen und die unterschiedlichen Fachexpertisen zusammenzubringen und nachhaltig zu mobilisieren. Dabei wäre es wichtig, auch für einzelne Fachdisziplinen herauszuarbeiten, welche Chancen (ggf. Erweiterung um Forschungsfragen) und welche Perspektiven diese Themen bieten. Eine Community-Bildung dieser interdisziplinär arbeitenden Fachvertreterinnen und Fachvertreter könnte über ausgewiesene Sessions bei Konferenzen o. Ä. realisiert werden.

Generell sind Vorträge auf bereits renommierten Veranstaltungen und bestehenden Veranstaltungsformaten von Forschungseinrichtungen, Verbänden, Netzwerken

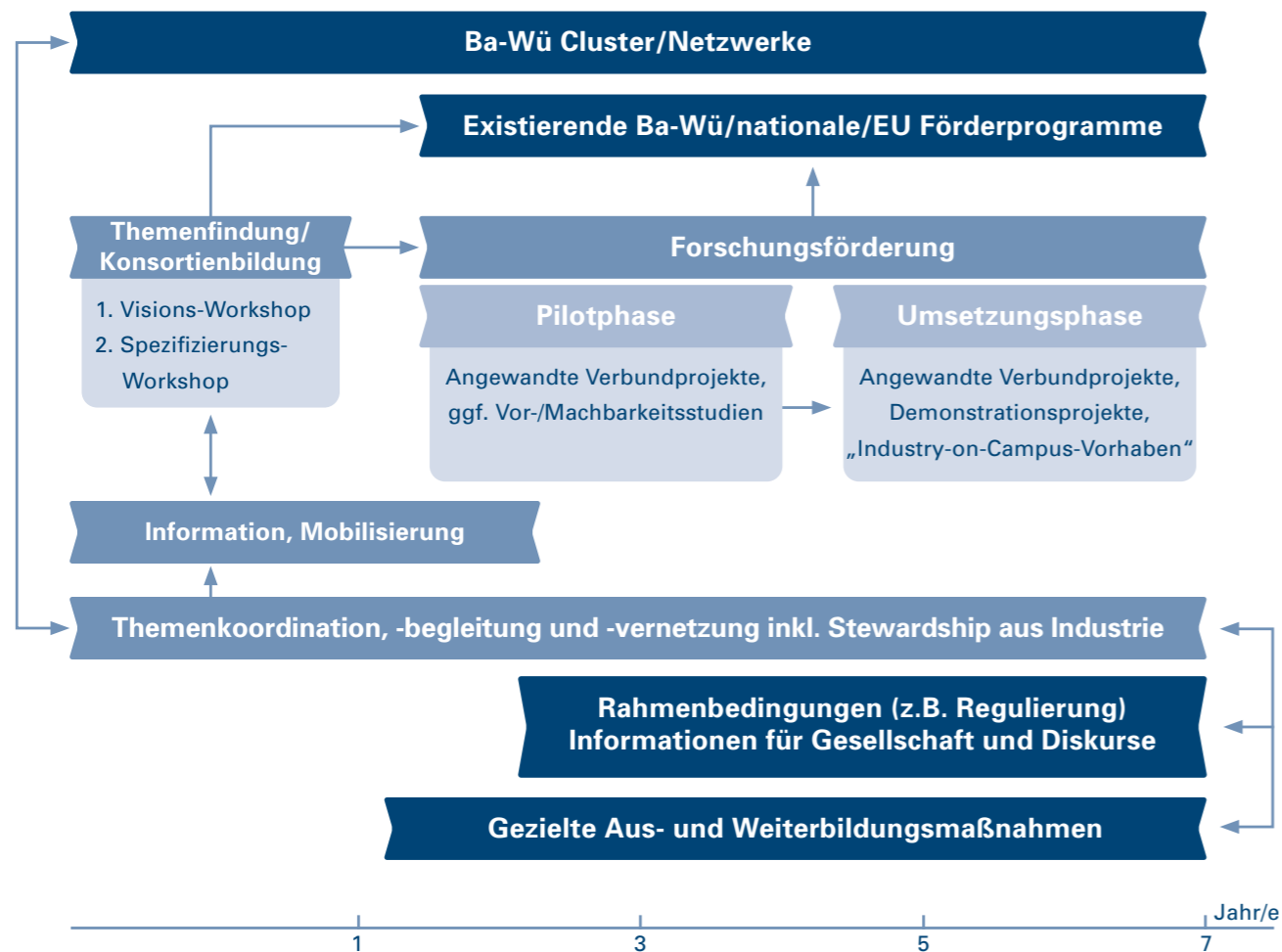


Abbildung 11: Modulare Aktions-Roadmap für Biointelligenz in Baden-Württemberg (s. auch S. 8)

und Initiativen geeignet. Ergänzt werden kann dies durch Informationsbereitstellung im Internet oder in Printform, z. B. durch Broschüren. Hilfreich kann auch die Identifizierung und Einbindung möglicher führender Akteure (Champions) und die Darstellung von Erfolgsbeispielen sein, die aufzeigen, welche Potenziale aus sektorübergreifender Zusammenarbeit entstehen können, und worin neue Geschäftsmodelle/-ideen liegen.

Themenfindung und Konsortienbildung

Die vorliegende Analyse zeigt, dass bereits eine Reihe von Ideen und Potenzialen mit Bezug zur Biointelligenz in verschiedenen Themenfeldern existieren, aber noch

Präzisierungen für die Bildung konkreter Konsortien und Projekte notwendig sind. Dabei ist es insbesondere wichtig, dass diese nicht rein aus Forschungs-/Technologie-Push-Perspektive stattfindet, sondern von einer Markt- und Problemorientierung ausgehend innovative und wettbewerbsfähige Lösungen gesucht werden. Um gleichzeitig sowohl das technologisch Machbare als auch die (potenzielle) Nachfrage im Blick zu haben, sind bei der Themenfindung zwei Schritte notwendig: Zuerst wäre – mit Ausnahme von einigen Wirtschaftsbereichen, in denen dies schon weit genug fortgeschritten erscheint – ein Workshop oder ähnliches Format („Visions-Workshop“) geeignet, um Visionen für Produkte und Dienst-

leistungen zu entwickeln, für die Bedarfe, Märkte und Potenziale gesehen werden. Dies kann in enger Analogie zu den im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Workshops erfolgen. Auf Basis dieser Ideen wären in einem zweiten Schritt angeleitete Workshops sinnvoll („Spezifizierungs-Workshop“), um anwendungsorientierte, industrierelevante FuE-Themen zu identifizieren, alle relevanten Teildisziplinen zu beteiligen und Anforderungen an die zu entwickelnden Anwendungen zu spezifizieren. Die Workshops dienen zugleich dem Ausloten von Kooperationspotenzialen und möglicher Konsortien für die ersten Verbundprojekte.

In diesem Prozess wäre auch ein Selektionsmechanismus einzubauen, der vor allem im Anschluss an die Workshops oder im skizzierten zweiten Schritt erfolgen sollte, um einen kohärenten Themenentwicklungsprozess in Richtung der Biointelligenz zu erreichen. Während es sich zunächst anbietet, breit Ideen zu sammeln, werden – wie die in diesem Projekt durchgeführten Workshops zeigten – Themen dabei sein, die grundsätzlich Potenzial versprechen, aber nur im weiteren Sinne ein Bezug zum Biointelligenz-Konzept haben. Um auch solche Themen einer Weiterentwicklung und Umsetzung zuzuführen, sollten Mechanismen bzw. Prozesse vorgesehen werden, durch die diese Ideen in andere Förderinstrumente vermittelt und dort eingespeist werden. Einer spezifischen Projektförderung für die Biointelligenz sollten solche Ideen vorbehalten bleiben, die in den Kernbereich der konvergierenden Ansätze fallen.

Projektförderung in Pilot- und Umsetzungsphase

Zur Realisierung der Potenziale der Biointelligenz sind erhebliche zusätzliche anwendungsorientierte Forschungsaktivitäten notwendig. Einen wichtigen Kern bilden sicherlich FuE-Projekte, die als interdisziplinäre Verbundprojekte angelegt sind und die verschiedenen

erforderlichen Kompetenzen zusammenbringen. Dabei ist es allerdings spezifisch für die jeweiligen Wertschöpfungssysteme,

- welchen Reifegrad (Technological Readiness Level) die Förderung adressieren soll, da sich themen-/sektorspezifisch die realistisch adressierbaren Reifegrade unterscheiden,
- wie die Förderinstrumente genau konzipiert sind. Denkbar sind z. B. FuE-Verbundprojekte, Aufbau von Pilot- und Demonstrationsanlagen, Reallabor-Ansätze etc.,
- ob zusätzliche Fördermittel und -maßnahmen notwendig sind, oder ob ein signifikanter Teil der Projektförderung auch innerhalb der existierenden Förderprogramme stattfinden könnte. Prinzipiell ist es denkbar, dass Biointelligenz-Projekte im Rahmen der nationalen oder EU-weiten Bioökonomie-, Material-, Produktionsforschungsförderung oder themenoffenen Förderungen (z. B. Future Emerging Technologies (FET), bzw. vergleichbare Nachfolgeaktivitäten in Horizon Europe) gefördert werden können. Dabei sollten im Anschluss an die für Baden-Württemberg erfolgte Themenfindung auch aktiv Andockpunkte an existierende Förderung Bund/EU identifiziert und kommuniziert werden, damit entsprechende Themen auf Bundes- und EU-Ebene in den dortigen Programmen aufgegriffen werden.

Je nach Wertschöpfungssystem/Themenfeld kann eine gewisse „Findungsphase“ notwendig sein, bis die unterschiedlichen Kompetenzen tatsächlich synergistisch zusammenarbeiten können und aus der Interdisziplinarität ein echter Mehrwert entsteht, der deutlich über ein „Nebeneinander verschiedener disziplinärer Teilprojekte unter dem Dach eines Verbundprojekts“ hinausgeht. Hierfür könnten kleine Vorprojekte geeignet sein, die auch Machbarkeits-/Marktpotenziale näher ausloten.



Themenkoordination, -begleitung und -vernetzung inkl. Stewardship aus Industrie:

Um die genannten Aktivitäten zur Unterstützung der Biointelligenz einerseits themen-/sektorspezifisch zu koordinieren und potenzielle inhaltliche Synergien zwischen Themen zu identifizieren, ist eine Themenkoordination für die Biointelligenz nötig. Wie bereits erläutert, steht dabei (zumindest zunächst) nur in beschränktem Maße die Etablierung der Marke Biointelligenz im Vordergrund, da dies in die Breite gesehen nur teilweise Durchschlagskraft haben wird. Vielmehr ist vor allem die Koordinierung der genannten Aktivitäten von Bedeutung. Dabei wäre noch zu klären, welche Akteure diese Funktion übernehmen sollten (z. B. Landesagentur(en), Kompetenzzentrum). Zudem ist bei der Themenbegleitung zu beachten, dass Industrieakteure frühzeitig und langfristig mit eingebunden werden (Stewardship), um die industrierelevante Ausrichtung sicherzustellen und die Wirtschaftsunternehmen Baden-Württembergs zu motivieren und zu mobilisieren.

Verbesserung der Rahmenbedingungen/Regulierung

Wie oben beschrieben, entstehen durch konvergierende technische Entwicklungen neue Regelungsfragen oder neuer Regelungsbedarf: Zum einen passen bestehende Regelungen oft nicht zu den Innovationen und stellen ein Hemmnis dar, oder es fehlen notwendige Anreize zur Mobilisierung ausreichender Nachfrage (z. B. durch öffentliche Beschaffung, Setzung von Umweltstandards, Vorschriften). Daher eröffnen sich hier insbesondere für die Landespolitik Handlungsoptionen: Zum einen wäre insbesondere bei den priorisierten Themen zu prüfen, inwieweit (regulative) Rahmenbedingungen weiterentwickelt werden können, um die Kommerzialisierung der zu entwickelnden Produkte, Prozesse und Systeme zu ermöglichen und zu fördern. Zum anderen könnten fallweise passfähige und günstige Rahmenbedingungen durch Ausschöpfen von Handlungsspielräumen auf regionaler oder kommunaler Ebene geschaffen werden.



Anhang

Indikatorauswertung für die Biointelligenz

Während eine Entwicklung zu einer Konvergenz von Sektoren und Technologien zunehmend in Diskussionen mit aufgenommen wird, stellt sich die Frage, inwieweit biointelligente Produkte, Prozesse oder Systeme schon im angewandteren Forschungsstadium, bzw. auf dem Markt, vertreten sind. Hierzu bieten sich insbesondere Innovationsindikatoren wie Publikationen, Patente oder Marktanalysen an.

Die genannten Offenheiten beim Konzept der Biointelligenz bezüglich inhaltlicher Abgrenzung führen aber zu erheblichen Schwierigkeiten bei der Messung. Wie in Abschnitt [Konzept der Biointelligenz \(S. 13 ff.\)](#) beschrieben, gibt es einen erheblichen Überlapp zu anderen Konzepten (z. B. Bioökonomie), und potenziell zurechenbare Prozesse, Produkte oder Märkte werden bereits Biotechnologie, Bioökonomie, Leichtbau, Energiewende oder anderen etablierten Feldern zugesprochen. Zudem gibt es für Recherchestrategien bei Patenten und Publikationen keine Termini, die einen höheren Grad an Konvergenz beschreiben und gängig in der Beschreibung der Technikentwicklung sind: Auch das gemeinsame Auftreten von Begriffen aus unterschiedlichen Disziplinen sagt nur beschränkt etwas über den Grad des Zusammenspiels aus, da Begriffe in bestimmten Communities unterschiedlich verwendet werden (siehe unten).

Ausgangspunkt der folgenden Überlegungen ist, dass Biologie begrifflich ein zentrales einendes Element der Biointelligenz ist. Verschiedene Themen, die begrifflich an die Biologie anschließen, werden der Biointelligenz bzw. Biologischen Transformation zugeordnet, unter anderem „Bioinspiration“, „Biomimetik“, „Bionik“ oder

„Biohybride“, aber auch „Biotechnologie“ und „Bioökonomie“. Dies sind aber auch Forschungsthemen, die häufig stark innerhalb bestimmter Fachdisziplinen verankert sind, und für die innerhalb der jeweiligen Fachdisziplinen ein eigenständiges Verständnis existiert. Folglich lässt sich aus der begrifflichen Nähe zur Biologie nicht unmittelbar eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Lebenswissenschaften und technischen Fachdisziplinen schlussfolgern.

Allerdings könnte ein zunehmender Gebrauch von Begrifflichkeiten in verschiedenen Fachbereichen darauf schließen lassen, dass auch Konzepte und Forschungsthemen eine stärker interdisziplinäre Forschung widerspiegeln. Daher wurde anhand explorativer Publikationsauswertungen untersucht, ob sich auf einer Metaebene eine zunehmende Überschneidung bei Begrifflichkeiten (Publikationen) oder Technologiegebieten (Patente) abbilden.

Publikationen

Im Folgenden wurden Publikationen der Scopus-Datenbank (Elsevier), welche die Begriffe „bio-inspired“ oder „bio-mimetic“ enthalten, gemäß der ihnen zugewiesenen Fachkategorien der Datenbank (Subject Areas) ausgewertet und deren Anteile im Zeitablauf für die letzten 20 Jahre betrachtet (Abb. 12 und Abb. 13). Es zeigt sich, dass in beiden Fällen ein Großteil der Publikationen Fachkategorien außerhalb „Biochemistry, Genetics and Molecular Biology“ zugeordnet werden, und über Ingenieurs-/Material-/IT-Wissenschaften verteilt sowie in etwas geringerem Maße der Chemie zuordenbar sind. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Publikationszahlen zwischen 2000 und 2020 insgesamt verzehn- oder sogar verzwanzigfach haben, also in aller Regel auch

bei sinkenden Anteilen ein erheblicher absoluter Zuwachs gegeben ist. Insgesamt gibt es Hinweise zu einer stärkeren Diversifizierung, d. h. die Dominanz einzelner Bereiche nimmt im Zeitverlauf ab, und der jeweilige Begriff wird zunehmend auch in anderen Bereichen aufgegriffen. Außerdem lässt sich ein gewisser Trend weg von grundlagenorientierten Bereichen hin zu stärker anwendungsorientierten beobachten. Insbesondere zeigt sich seit 2010 eine gleichbleibende („bio-inspired“) oder abnehmende Bedeutung („bio-mimetic“) der Lebenswissenschaften. Diese Entwick-

lungen könnten eine zunehmende Anwendungsnahe der Forschung widerspiegeln, sie könnten aber auch für die Verfestigung der eigenständigen Verwendungen von Begrifflichkeiten stehen.

Dies verdeutlicht, dass einerseits die Begriffe „Biologie“ bzw. „biologisch“ in verschiedenen Communities äußerst unterschiedlich verwendet werden und von dezidierten Communities geprägt sind. Eine tatsächliche Konvergenz mit den Lebenswissenschaften lässt sich nur begrenzt herauslesen.

Bio-mimetic | Subject Areas %

2000 (n=307) 2010 (n=2613) 2020 (n=6574)

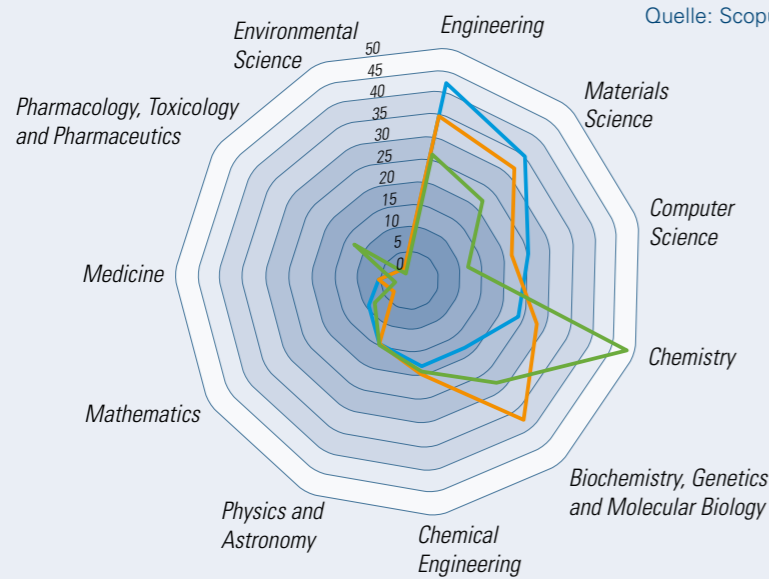


Abbildung 12: Anteilige Zuordnung von Publikationen zu Fachbereichen (Subject Areas) nach Schlagwortrecherche „bio-mimetic“.

Quelle: Scopus (Elsevier). Eigene Darstellung.

Bio-inspired | Subject Areas %

2000 (n=16) 2010 (n=736) 2020 (n=1962)

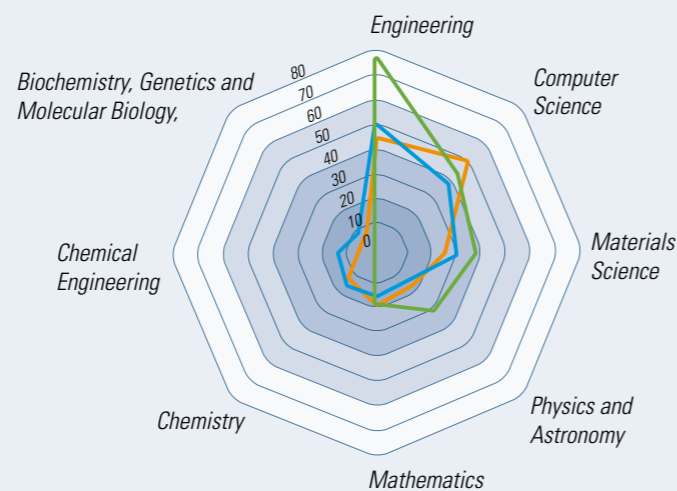


Abbildung 13: Anteilige Zuordnung von Publikationen zu Fachbereichen (Subject Areas) nach Schlagwortrecherche „bio-inspired“.

Quelle: Scopus (Elsevier). Eigene Darstellung.

Patente

Bei der Patentanalyse wurde die aktuelle Definition der OECD zur Biotechnologie (Friedrichs und van Beuzekom 2018) zugrunde gelegt und Kopatentierungen mit anderen Technologieklassen zwischen den Jahren 2008 bis 2018 analysiert. Es zeigt sich ein diverses und in der Entwicklung nicht ganz klares Bild (Abb. 14). Die tendenzielle Zunahme in vielen Klassen spiegelt ungefähr die Gesamtdynamik wider. So sind die Biotechnologie-Patentanmeldungen von knapp 11.500 Patenten weltweit im Jahr 2008 auf rund 15.300 im Jahr 2018 moderat gestiegen.

Zusammenfassend zeigen sich bislang keine eindeutigen Entwicklungen bei den hier dargestellten Indikatoren hin zu einer Konvergenz. Die Analyse wird aber wesentlich dadurch erschwert, dass kaum übergeordnete Begrifflichkeiten existieren, die dieses potenzielle Verschmelzen gut beschreiben können.

Tieferegehende Analysen könnten für ausgewählte Anwendungsbereiche sinnvoll sein (z. B. selbstheilender Beton, biohybride Sensoren). Sie wären aber allesamt nur Einzelfallbeispiele, für die aufwändig spezifische Recherchestrategien entwickelt werden müssten. Zudem muss generell beachtet werden, dass eine stärkere Konvergenz nur teilweise durch solche Publikations-/ Patentindikatoren erfasst werden kann, da nicht alle kommerziell relevanten Erfindungen patentiert und publiziert werden und sich ein stärkeres Zusammenspiel der Technologien auch durch die Integration bestehender Wissensbestände oder durch Übertragung von technologischem Wissen auf neue Anwendungsfelder ergibt (z. B. von Automatisierungstechnologien in bioindustriellen Bereichen). Dies spiegelt sich in Publikationen und Patenten jedoch oft nicht wider. Insbesondere lassen sich bioinspirierte Ansätze kaum über Patentklassifizierungen abbilden, da für die Eingruppierung nur die tatsächliche Umsetzung von Re-

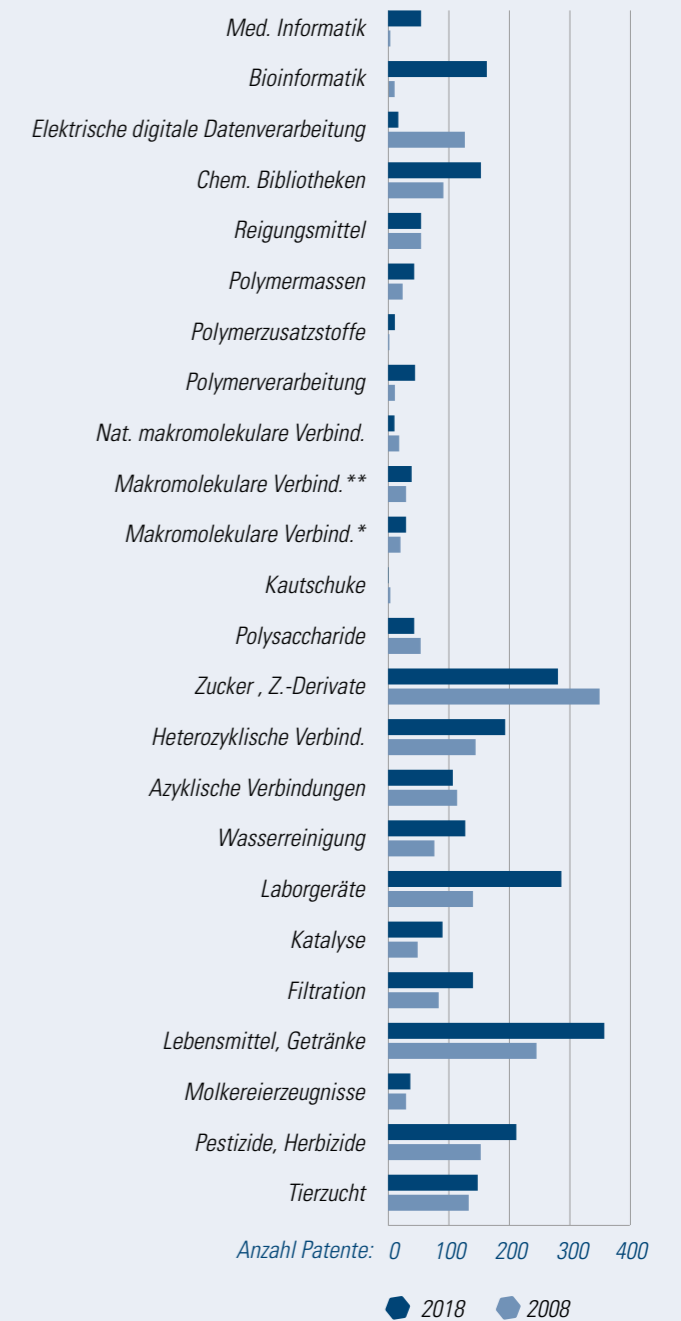


Abbildung 14: Biotechnologiepatente, die in anderen Patentklassen/-gebieten koklassifiziert wurden. Eigene Darstellung. Quelle: WPINDEX (Derwent).

* Makromol. Verbindungen, nur mit ungesättigten Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen;
** Makromol. Verbindungen, Sonstige

levanz ist, jedoch nicht die Frage, woher der ursprüngliche Anstoß für die Innovation kam.



Literaturverzeichnis

Antony, Florian; Griebhammer, Rainer; Speck, Thomas; Speck, Olga (2014): Sustainability assessment of a lightweight biomimetic ceiling structure. In: *Bioinspiration & Biomimetics* 9 (1), S. 16013. DOI: 10.1088/1748-3182/9/1/016013.

Bauer, Wilhelm; Weissenberger-Eibl, Marion; Ardilio, Antonino; Beckert, Bernd; Bratan, Tanja; Doll, Claus et al. (2018): Vorfahrt für Innovation – Wie Baden-Württemberg seine Spitzenposition behaupten kann. Innovationspolitische Impulse des Beauftragten für Technologie der Landesregierung von Baden-Württemberg.

Bauernhansl, Thomas; Brecher, Christian; Drossel, Welf-Guntram (2019): Biointelligenz. Eine neue Perspektive für nachhaltige industrielle Wertschöpfung: Ergebnisse der Voruntersuchung zur biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung (Biotrain).

Berger, Marius; Boockmann, Bernhard; Felbermayr, Gabriel; Klempt, Charlotte; Koch, Andreas; Kohler, Wilhelm K. et al. (2017): Strukturanalyse und Perspektiven des Wirtschaftsstandortes Baden-Württemberg im nationalen und internationalen Vergleich. Abschlussbericht. ZEW-Gutachten und Forschungsberichte.

BIOPRO Baden-Württemberg GmbH (Hg.) (2020): Gesundheitsindustrie 2020. Zahlen und Fakten für Baden-Württemberg. Stuttgart. Online verfügbar unter www.gesundheitsindustrie-bw.de/download_file/force/19547/78191, zuletzt geprüft am 16.03.2021.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hg.) (2020): Materialforschung. Wegbereiter von Innovationen in Industrie und Gesellschaft. Impulspapier des BMBF zur Materialforschung. Bonn.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hg.) (2020): Nationale Bioökonomiestrategie. Langversion. Berlin. Online verfügbar unter www.bundesregierung.de/breg-de/service/publikationen/nationale-biooekonomiestrategie-langfassung-1734090, zuletzt geprüft am 14.07.2020.

Bundesregierung (Hg.) (2020): Nationale Bioökonomiestrategie. Kabinettdokument, zuletzt geprüft am 12.05.2020.

Bundesverband Medizintechnologie – BVMed (Hg.) (2020): Branchenbericht Medizintechnologien 2020. Berlin. Online verfügbar unter www.bvmed.de/download/bvmed-branchenbericht-medtech.pdf, zuletzt geprüft am 19.03.2021.

Byrne, Gerald; Dimitrov, Dimitri; Monostori, Laszlo; Teti, Roberto; van Houten, Fred; Wertheim, Rafi (2018): Biologicalisation: Biological transformation in manufacturing. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 21, S. 1–32. DOI: 10.1016/j.cirpj.2018.03.003.

Byrne, G.; Damm, O.; Monostori, L.; Teti, R.; van Houten, F.; Wegener, K. et al. (2021): Towards high performance living manufacturing systems - A new convergence between biology and engineering. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.10.009.

CDU, CSU, SPD (Hg.) (2018): Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. Ein neuer Aufbruch für Europa. Eine neue Dynamik für Deutschland. Ein neuer Zusammenhalt für unser Land. 19. Legislaturperiode, zuletzt geprüft am 21.09.2020.

Chui, Michael; Evers, Matthias; Manyika, James; Zheng, Alice; Nisbet, Travers (2020): The Bio Revolution. Innovations transforming economies, societies, and our lives. Hg. v. McKinsey Global Institute, zuletzt geprüft am 18.05.2020.

Dispan, Jürgen (2020): Branchenanalyse Medizintechnik. Beschäftigungs-, Markt- und Innovationstrends. Hg. v. Hans-Böckler-Stiftung (WORKING PAPER FORSCHUNGSFÖRDERUNG, 183), zuletzt geprüft am 16.03.2021.

Fraunhofer-Gesellschaft (Hg.) (2018): Biologische Transformation und Bioökonomie. München, zuletzt geprüft am 12.05.2020.

Friedrichs, Steffi; van Beuzekom, Brigitte (2018): Revised proposal for the revision of the statistical definitions of biotechnology and nanotechnology.

Global Market Insights (Hg.) (2018): Exoskeleton Market. Competitive Landscape & Forecast, 2019 – 2026. Online verfügbar unter www.gminsights.com/industry-analysis/exoskeleton-market.

Global Market Insights (2020): Edible Insects Market Size By Product (Beetles, Caterpillars, Grasshoppers, Bees, Wasps, Ants, Scale Insects & Tree Bugs), By Application (Flour, Protein Bars, Snacks), Industry Analysis Report, Regional Outlook, Application Potential, Price Trends, Competitive Market Share & Forecast, 2020 – 2026. Online verfügbar unter www.gminsights.com/industry-analysis/edible-insects-market.

Grand View Research (Hg.) (2019a): Collaborative Robots Market Size, Share & Trends Report Collaborative Robots Market Size, Share & Trends Analysis Report By Payload Capacity, By Application (Assembly, Handling, Packaging, Quality Testing), By Vertical, By Region, And Segment Forecasts, 2019 - 2025. Online verfügbar unter www.grandviewresearch.com/industry-analysis/collaborative-robots-market.

Grand View Research (Hg.) (2019b): Smart Textile Market Size Worth \$5.55 Billion By 2025. Online verfügbar unter www.grandviewresearch.com/press-release/global-smart-textiles-industry.

Grand View Research (Hg.) (2020): Exoskeleton Market Size, Share & Trends Report Exoskeleton Market Size, Share & Trends Analysis Report By Technology Type (Mobile, Stationary), By Technology Drive Type, By End User, By Region, And Segment Forecasts, 2020 - 2027. Online verfügbar unter www.grandviewresearch.com/industry-analysis/exoskeleton-market.

Grand View Research (Hg.) (2021a): Cell Therapy Market Size, Share & Trends Analysis Report By Use-type, By Therapy Type (Autologous, Allogenic), By Region (North America, Europe, Asia Pacific, Latin America, MEA), And Segment Forecasts, 2021 - 2028. Online verfügbar unter www.grandviewresearch.com/industry-analysis/cell-therapy-market.

Grand View Research (Hg.) (2021b): Prosthetics & Orthotics Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (Orthotics, Prosthetics), By Region (North America, APAC), And Segment Forecasts, 2021 - 2028 (GVR-2-68038-553-3). Online verfügbar unter www.grandview-research.com/industry-analysis/prosthetics-orthotics-market.

Kearney (Hg.) (2019): Studie zur Zukunft des Fleischmarkts bis 2040. Online verfügbar unter www.de.kearney.com/pressecenter/article/?/a/a-t-kearney-studie-zur-zukunft-des-fleischmarkts-bis-2040=.

Kompetenzzentrum Biointelligenz (Hg.) (2019a): Biointelligente Produkte und Produktion – Die nachhaltige Revolution der Industrie. Stuttgart, 15.05.2019, zuletzt geprüft am 11.05.2020.

Kompetenzzentrum Biointelligenz (Hg.) (2019b): Die Biointelligente Wertschöpfung. White Paper des Kompetenzzentrums Biointelligenz, zuletzt geprüft am 15.04.2020.

ManuFUTURE High-Level Group (Hg.) (2018): ManuFUTURE Vision 2030. Online verfügbar unter www.manufuture.org/wp-content/uploads/Manufuture-Vision-2030_DIGITAL.pdf, zuletzt geprüft am 04.11.2020.

ManuFUTURE High-Level Group (Hg.) (2019): ManuFUTURE. Strategic Research and Innovation Agenda 2030. For a competitive, sustainable and resilient European manufacturing. Online verfügbar unter www.manufuture.org/wp-content/uploads/ManuFUTURE_SRIA_2030_Vfinal.pdf, zuletzt geprüft am 04.11.2020.

Market Research (Hg.) (2020): Bio-based Construction Polymers Market Research Report by Product - Global Forecast to 2025 - Cumulative Impact of COVID-19. Online verfügbar unter www.marketresearch.com/360iResearch-v4164/Bio-based-Construction-Polymers-Research-13973878/.

Market Watch News (Hg.) (2021): Lightweight Materials Market Size, Share Is Projected to Cross USD 237.1 Billion By 2026 - Industry News. Online verfügbar unter www.marketwatch.com/press-release/lightweight-materials-market-size-share-is-projected-to-cross-usd-2371-billion-by-2026---industry-news-2021-02-19.

MarketsAndMarkets (Hg.) (2020): Vertical Farming Market with COVID-19 Impact Analysis by Growth Mechanism (Hydroponics, Aeroponics, and Aquaponics), Structure (Building Based and Shipping Container), Offering, Crop Type, and Region - Global Forecast to 2025. Online verfügbar unter www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/vertical-farming-market-221795343.html?

Neugebauer, Reimund (2019): Biologische Transformation. Berlin: Springer Vieweg (Fraunhofer-Forschungsfokus).

PR Newswire (Hg.): Vertical Farming Market Size Worth USD 11.71 Billion by 2027 | CAGR of 20.1%: Emergen Research. Online verfügbar unter www.prnewswire.com/news-releases/vertical-farming-market-size-worth-usd-11-71-billion-by-2027--cagr-of-20-1-emergen-research-301161866.html.

Reports and Data (Hg.) (2019): Neuroprosthetics Market Size, Share & Analysis, By Type, By Technology (Deep Brain Stimulation, Vagus Nerve Stimulation, Spinal Cord Stimulation, Sacral Nerve Stimulation, Transcranial Magnetic Stimulation), By Application, Forecasts to 2026 (RND_002304). Online verfügbar unter www.reportsanddata.com/report-detail/neuroprosthetics-market.

Reports and Data (Hg.) (2020): Lightweight Materials Market By Product, By Application (Automotive, Aviation, Energy, Others), and By Distribution Channel (Offline Stores, Online Stores), Forecasts to 2027. Online verfügbar unter www.reportsanddata.com/report-detail/lightweight-materials-market.

Research and Markets (Hg.) (2019): Cobots Market - Forecasts from 2019 to 2024. Online verfügbar unter www.researchandmarkets.com/reports/4835501/cobots-market-forecasts-from-2019-to-2024.

Research and Markets (Hg.) (2020): Global Smart Textiles Markets Report 2020: U.S. Market is Estimated at \$740 Million, While China is Forecast to Grow at 24.8% CAGR. Online verfügbar unter www.globenewswire.com/news-release/2020/09/30/2101201/0/en/Global-Smart-Textiles-Markets-Report-2020-U-S-Market-is-Estimated-at-740-Million-While-China-is-Forecast-to-Grow-at-24-8-CAGR.html.

Research and Markets (2021): Edible Insects Market by Product, Insect Type and Application - Global Forecast to 2027. Online verfügbar unter www.globenewswire.com/news-release/2021/01/08/2155707/0/en/Edible-Insects-Market-by-Product-Insect-Type-and-Application-Global-Forecast-to-2027.html.

SPECTARIS Deutscher Industrieverband für Optik, Photonik, Analysen- und Medizintechnik e.V. (Hg.) (2020): Die deutsche Medizintechnik-Industrie. SPECTARIS Jahrbuch 2020/2021. Berlin. Online verfügbar unter www.spectaris.de/fileadmin/Content/Medizintechnik/Zahlen-Fakten-Publikationen/SPECTARIS_Jahrbuch2020-21_11-2020_Lesezeichen_3.pdf, zuletzt geprüft am 16.03.2021.

VFA (Hg.) (2020): Medizinische Biotechnologie in Deutschland 2020.

Impressum

Herausgeber

BIOPRO Baden-Württemberg GmbH

Projektleitung

Dr. Brigitte Kempter-Regel

BIOPRO Baden-Württemberg GmbH

Autoren/-innen

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Dr. Sven Wydra,

Dr. Bärbel Hüsing, Dr. Heike Aichinger, Dr. Thomas Reiss,

Dr. Liliya Pullmann, Dr. Piret Fischer, Alexander Schwarz

BIOPRO Baden-Württemberg GmbH

Dr. Brigitte Kempter-Regel, Prof. Dr. Ralf Kindervater

Lektorat

Dr. Petra Neis-Beeckmann

Grafik und Layout

Designbüro Mees + Zacke + Naumann GbR

Bildnachweise

Titelgrafik: ©cooperr, carloscastilla, WilliamJu; Inhalt: Hans-Joachim Schneider, Julia Garan, iaremenko, AYDINOZON, Dilok, willyam, denisismagilov, Alexander Limbach, Laymanzoom, sompong tom, sdecoret, Ivan Traimak, Maitree.B Hin255, vegefox.com, Gorodenkoff Productions OU, Laymanzoom - stock.adobe.com

Druck

Druckerei Raisch GmbH + Co. KG

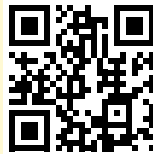
Die vorliegende Studie wurde durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg finanziell gefördert.

© BIOPRO Baden-Württemberg GmbH, 2021

Alexanderstraße 5 • 70184 Stuttgart • Telefon: + 49 (0) 711 21 81 85 00

info@bio-pro.de • www.bio-pro.de

www.bio-pro.de



BIO PRO Baden-Württemberg GmbH • Alexanderstraße 5 • 70184 Stuttgart/Germany
Telefon: +49 (0) 711 21 81 85 00 • E-Mail: info@bio-pro.de