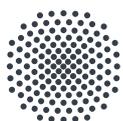




# DIE BIOINTELLIGENTE WERTSCHÖPFUNG

White Paper des Kompetenzzentrums Biointelligenz

Stuttgart, den 15. Mai 2019



**Universität Stuttgart**



**UNIVERSITÄT  
HOHENHEIM**

**NMI**  
schafft Ergebnisse



**Fraunhofer**

# INHALT

Zusammenfassung *Summary*

1. Ausgangslage

2. Vision einer biointelligenten Wertschöpfung

3. Biointelligente Wertschöpfung in den Bedürfnisfeldern

3.1 Gesundheit

3.2 Ernährung

3.3 Konsum

3.4 Energie

3.5 Wohnen

4. Fünf Thesen für eine biointelligente Wertschöpfung in Deutschland

5. Glossar

6. Ein Aufruf zum Handeln

7. Literatur



# ZUSAMMENFASSUNG

Der Erhalt des Wirtschaftsstandorts Deutschland und die Notwendigkeit einer nachhaltigen Wirtschaftsweise erfordern ein neues Wirtschaftsmodell und neue Technologien für einen strukturellen Wandel. Die Biologische Transformation, d. h. die zunehmende Nutzung von Materialien, Strukturen, Prozessen und Organismen der belebten Natur in der Technik, wird es immer mehr Menschen ermöglichen, glücklicher, gesünder, sicherer und nachhaltiger zu leben. Die erste Veröffentlichung des Kompetenzzentrums Biointelligenz, einem Zusammenschluss von Forschenden der Universitäten Stuttgart und Hohenheim, der Fraunhofer-Institute IAO, IBP, IGB und IPA sowie des Naturwissenschaftlichen und Medizinischen Instituts an der Universität Tübingen (NMI), skizziert innovative Visionen und potenzielle Leuchttürme einer biointelligenten Wertschöpfung in den menschlichen Bedürfnisfeldern Gesundheit, Ernährung, Wohnen, Konsum und Energie. Möglich wird die Biologische Transformation durch eine Konvergenz verschiedener vormalig häufig getrennter Technologiebereiche. Entscheidend für das Gelingen sind eine transdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Fachgebieten, eine offene Innovationskultur in Forschung, Unternehmen, Gesellschaft und Politik, Freiräume für die Wissenschaft, Zugang zu ausreichend Forschungsförderung und Risikokapital, umfangreiche Bürgerdialoge und Informationskampagnen sowie eine exzellente gemeinsam abgestimmte Aus- und Weiterbildung in Naturwissenschaften, Technik, Informatik, Sozial- und Geisteswissenschaften.

## SUMMARY

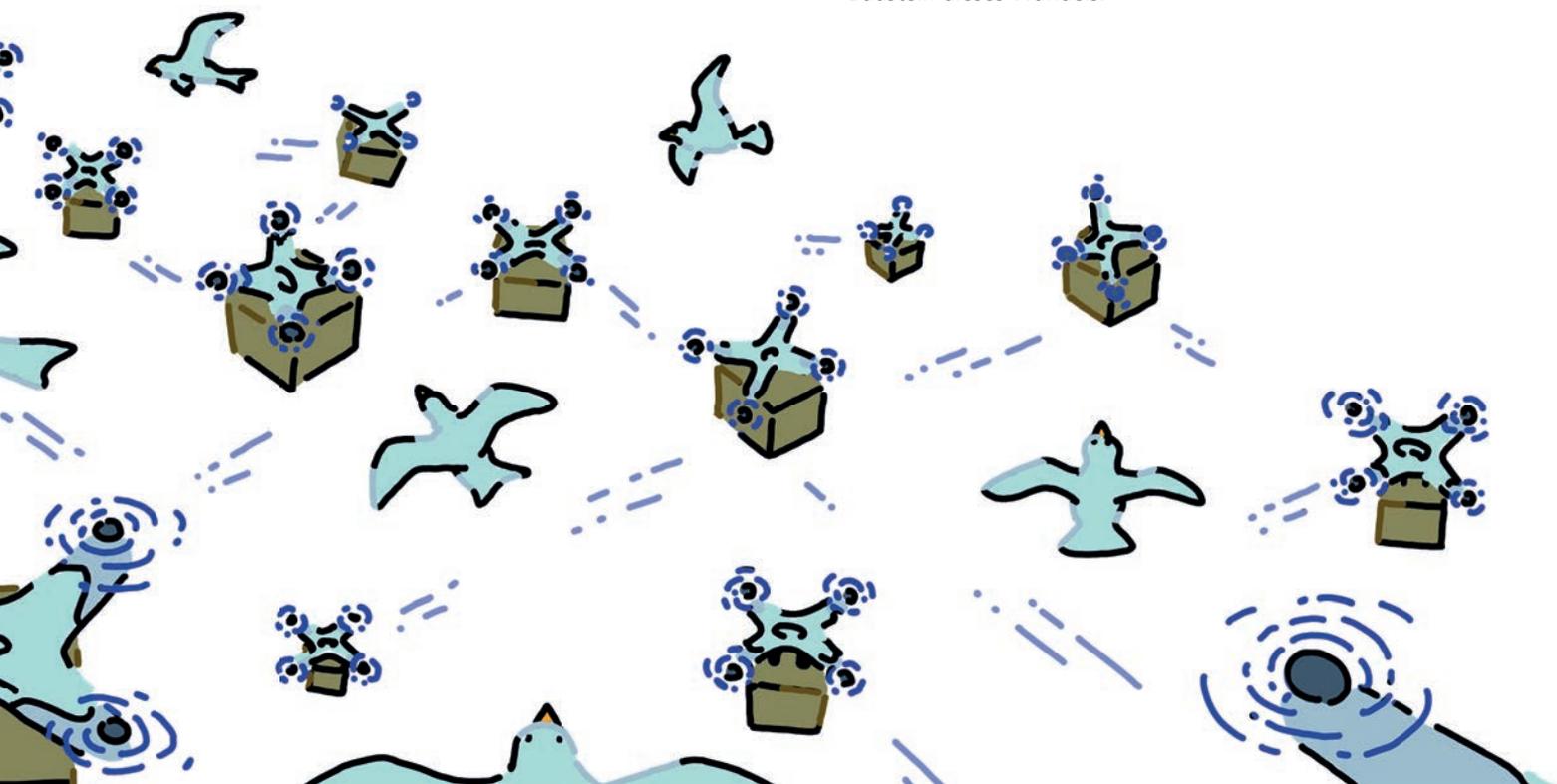
*Increasing worldwide economic competition, growing and aging populations, rearrangements of the political maps of national interests and the growing need for sustainability require a new economic model and new technologies for structural changes. The biological transformation, i.e. the increasing use of materials, structures, processes and organisms of the living nature in technology, will enable more and more people to live happier, healthier, safer and more sustainable. The first publication of the Competence Center Biointelligence, an association of researchers from the Universities of Stuttgart and Hohenheim, the Fraunhofer Institutes IAO, IBP, IGB and IPA as well as the Natural and Medical Sciences Institute at the University of Tübingen (NMI), outlines innovative visions and potential lighthouse projects of a biointelligent value creation in essential fields of human needs (health, nutrition, housing, consumption, energy). The biological transformation is made possible by a convergence of various formerly separate technology areas. Decisive for the success are a transdisciplinary cooperation between disciplines, an open innovation culture in research, companies, society and politics, free space for science, access to sufficient research funding and venture capital, extensive citizen dialogues and information campaigns and an excellent education in natural sciences, engineering, computer science, social sciences and humanities.*

# 1. AUSGANGSLAGE

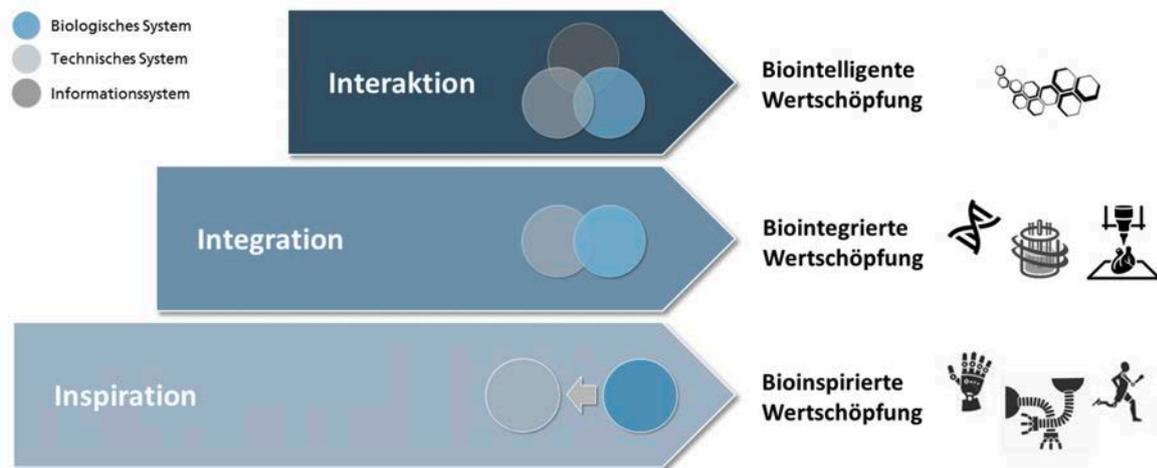
Die industrielle Wertschöpfung ist der Kern der deutschen Volkswirtschaft. Dies gilt im Besonderen für das Land Baden-Württemberg, in dem das produzierende Gewerbe seit Jahren einen um rund 8 Prozent höheren Beitrag zur Bruttowertschöpfung leistet als im Bundesdurchschnitt. Neben der wachsenden Konkurrenz aus Schwellen-, Entwicklungs- und anderen Industrienationen, sehen sich Unternehmen hierzulande jedoch zunehmend disruptiven Technologien (z. B. Elektrifizierung des Antriebsstrangs oder Internet der Dinge) gegenübergestellt, die das Potenzial haben, bestehende Geschäftsmodelle vollständig zu verdrängen.

Doch der Erhalt bzw. der Ausbau der Wettbewerbsvorteile stellt nur eine Herausforderung dar, der sich Unternehmen stellen müssen. Mehr und mehr gewinnt die Etablierung einer nachhaltigen Wirtschaftsweise eine strategische Relevanz in der betrieblichen Leistungserstellung. Da der erwartete Effekt des 1987 durch die Brundtland-Kommission definierten Konzepts lange weitestgehend ausblieb, werden die Folgen unserer seit Jahrzehnten unbedachten Wirtschaftsweise zunehmend offensichtlich. Der globale Ressourcenverbrauch stieg alleine in den letzten 30 Jahren um 118 Prozent. Bis 2050 ist im Zuge des Bevölkerungswachstums auf weltweit rund 10 Mrd. Menschen mit einer weiteren Verdopplung zu rechnen.

Ineffiziente Produktionsprozesse und unbedachter Konsum haben bereits eine globale Erwärmung von etwa 1 °C gegenüber vorindustriellem Niveau verursacht. Wenn sie mit der aktuellen Geschwindigkeit weiter zunimmt, erreicht die globale Erwärmung die im Paris-Abkommen als Grenzwert vereinbarten 1,5 °C wahrscheinlich zwischen 2030 und 2052. Rund zwei Drittel der weltweiten Treibhausgasemissionen entstehen im Zusammenhang mit der Verbrennung von fossilen Brennstoffen zur Energiegewinnung (Heizen, Stromerzeugung, Verkehr und Industrie). Im Kontext der Nahrungsmittelproduktion sticht in diesem Zusammenhang u. a. die Produktion von Fleisch und tierischen Produkten, insbesondere Rinderfleisch und Kuhmilchkäse, hervor, die in unterschiedlichen Studien zu einem signifikant hohen Anteil zur Treibhausgasemission beiträgt. Hinzu kommt, dass heute knapp ein Drittel der weltweit zur Verfügung stehenden Ackerfläche ausschließlich für die Futtermittelproduktion für Schlachtvieh genutzt wird. Doch nicht nur Energie- und Nahrungsmittelproduktion müssen in Zukunft umdenken. Gleiches gilt für den Umgang mit Ressourcen durch produzierende Unternehmen in den Bereichen Gesundheit, Konsumgüterherstellung und Wohnen. Wie sehr das Thema in den Augen der deutschen Bevölkerung an Bedeutung gewinnt, zeigt nicht zuletzt die „Fridays for Future“-Bewegung, die uns ermahnt, unseren Nachkommen einen bewohn- und bewirtschaftbaren Planeten zu übergeben. Wollen wir es also schaffen, eine Wirtschaftsweise zu entwickeln, die Wachstum und Ressourcenverbrauch entkoppelt, ist ein radikaler Wandel innerhalb einer einzigen Generation notwendig. Die Biologische Transformation der Wertschöpfung ist ein unerlässlicher Baustein dieses Wandels.



## 2. VISION EINER BIOINTELLIGENTEN WERTSCHÖPFUNG

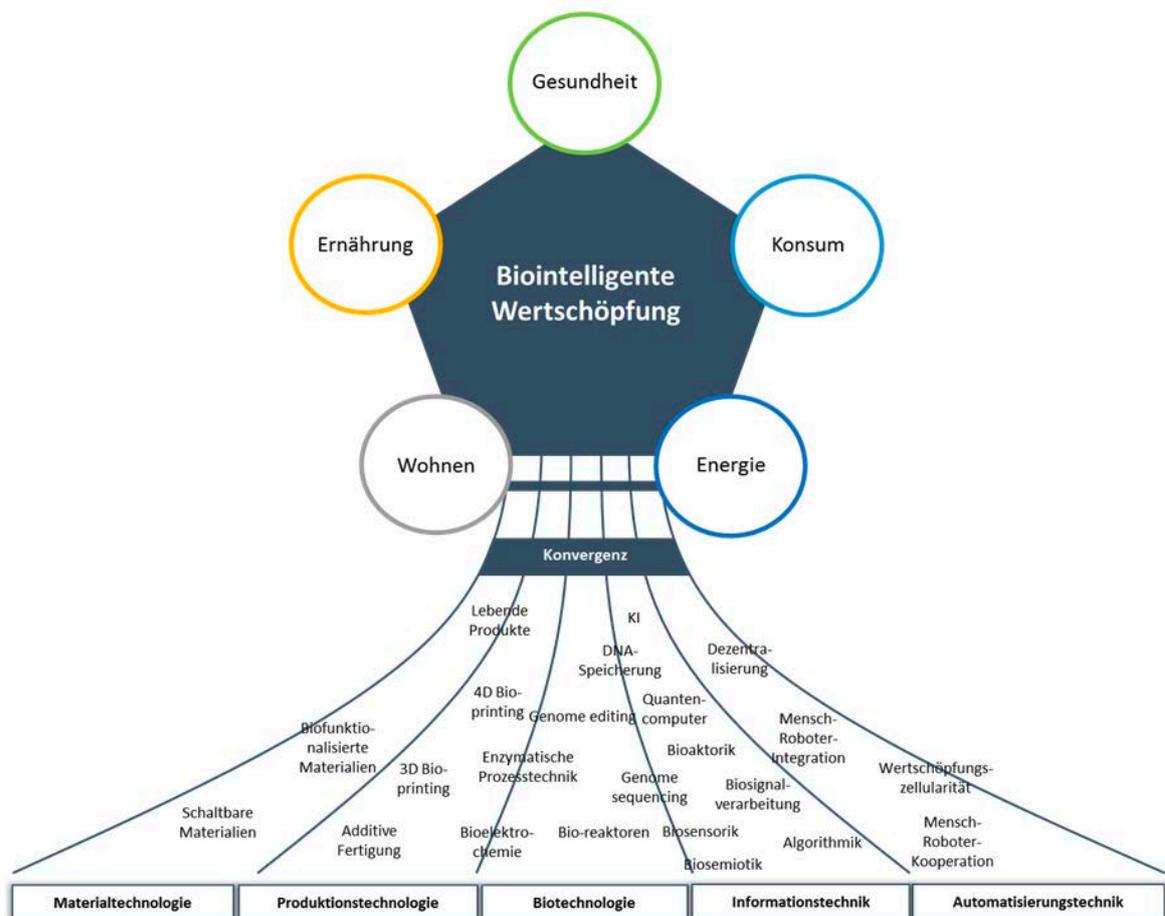


Die Biologische Transformation der industriellen Wertschöpfung, d. h. die zunehmende Nutzung von biobasierten Materialien sowie Strukturen, Prinzipien und Prozessen der belebten Natur in der Technik und Produktion, bereitet den Nährboden für eine Vielzahl struktureller Innovationen, die den Übergang in eine nachhaltige Wirtschaftsweise entscheidend begünstigen. Dabei werden drei Entwicklungsmodi unterschieden, die elementare Anforderungen an die technologische Weiterentwicklung verbinden: Inspiration, Integration und Interaktion. Die Inspiration ermöglicht es, über Jahrtausende evolutionär entstandene biologische Phänomene auf Wertschöpfungssysteme zu übertragen. Auf diese Weise lassen sich zum einen neuartige Materialien und Strukturen (z. B. Leichtbau), Funktionalitäten (z. B. Biomechanik) sowie Organisations- und Kooperationslösungen (z. B. Schwarmintelligenz, künstliche neuronale Netze, evolutionäre Algorithmen) entwickeln.

Zum anderen ermöglicht dieser Modus die dringend benötigte Annäherung technischer Prozesse an natürliche. In einem weiteren Modus findet das Wissen über die Biologie Anwendung in Form einer Integration biologischer Systeme in Produktionssysteme (z. B. Substitution chemischer durch biologische Prozesse). Anwendungsbeispiele dieses Modus sind u. a. biotechnisch hergestellte Pharmazeutika oder aus Zucker und/oder CO<sub>2</sub>-Abfallströmen gewonnene Grundstoffe für die chemische Industrie. Nicht zuletzt führt die umfassende Interaktion technischer, informatorischer und biologischer Systeme zur Schaffung völlig neuer, autarker Wertschöpfungsstrukturen und -technologien, sogenannten biointelligenten Wertschöpfungssystemen. Die wesentlichen Integrationsebenen, die die Grundlage für den Prozess bilden, sind demnach die technische Ebene, die Informationsebene und die biologische Ebene. Wie dies zu verstehen ist, illustriert die obige Abbildung.

Möglich wird die Biologische Transformation durch eine Konvergenz verschiedener vormals meist separat betrachteter Technologiebereiche. Auf diese Weise werden sogenannte Smart Biomanufacturing Devices (intelligente Bioproduktionszellen) entwickelt, mit denen es möglich wird, verschiedenste Produkte selbstständig mit den gegebenen biologischen Ressourcen vor Ort zu produzieren. Hierzu werden u. a. auf der additiven Fertigung basierende Produktionsverfahren mit selbstlernenden Algorithmen gekoppelt, um regional zur Verfügung stehende biobasierte Materialien aufzubereiten (u. a. Bioreaktoren, Bioraffinerien), zu verarbeiten und auf spezifische Anforderungen (u. a. Nutzung, End-of-Life) zu adaptieren. Das technologische und das biologische System werden dazu befähigt, miteinander zu kommunizieren und voneinander zu lernen. Minizellfabriken, aufbauend auf den Prinzipien des 3D-Bioprinting bzw. Tissue Engineering, finden Einzug in die Küchen der Haushalte (z. B. in Form von Foodprinting).

Auf diese Weise wird die nachhaltige Produktion von Fleischersatz und anderen Lebensmitteln auf Knopfdruck möglich. Entstehende Haushaltsabfälle werden z. B. mithilfe von bioelektrochemischen Produktionszellen direkt verwertet und fließen in Form von Energie und/oder Material, ohne Umweg über das Recycling, direkt in neue Produkte ein. Die Gestaltung der Wertschöpfung in den Bedürfnisfeldern Ernährung, Gesundheit, Wohnen, Konsum und Energie verlagert sich mehr und mehr zum Nutzer, was eine nachhaltige Wirtschaftsweise, die technologiebasierte Bedarfswirtschaft, ermöglicht. Die nachfolgende Abbildung illustriert die Technologiekonvergenz beispielhaft.



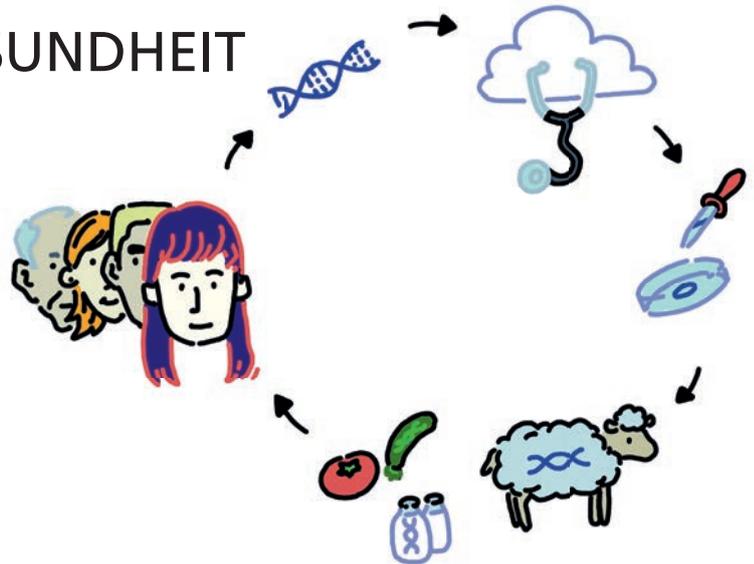
# 3. BIOINTELLIGENTE WERTSCHÖPFUNG IN DEN BEDÜRFNISFELDERN

## 3.1 BIOINTELLIGENTE GESUNDHEIT

Rund 1,3 Mrd. Menschen fehlt der Zugang zu effektiver und erschwinglicher Gesundheitsversorgung. Trotz einer vergleichsweise guten Situation steht auch Deutschland vor großen Herausforderungen: Oft zielen heute übliche Therapien darauf ab, eine möglichst breite Patientengruppe hinlänglich therapieren zu können. Konsequenterweise sind derartige Therapeutika abhängig vom jeweiligen Patienten unterschiedlich wirksam, viele gehen zudem mit gravierenden Nebenwirkungen einher. Für viele Krankheiten stehen jedoch gar keine oder nur wenig anhaltende Therapien zur Verfügung. Gleichzeitig steigen die Behandlungskosten in alarmierendem Ausmaß.

Bedingt durch den demographischen Wandel treten Krankheiten in den Vordergrund, für die dringend Therapieformen gefunden werden müssen (z. B. im Bereich neurodegenerativer Erkrankungen wie Parkinson, Alzheimer, Multiple Sklerose, etc). Ebenfalls zunehmend sind Erkrankungen des Muskelskelettsystems, die häufig einen chronischen Verlauf nehmen. Die WHO plant daher, körperliche Hilfen, sogenannte „assistive devices“, zur vierten Säule der Organisation zu machen. Schließlich sind wir aufgrund des demografischen Wandels bereits heute mit vermehrt auftretenden Krebs- und altersbedingten Erkrankungen und Bedürfnissen konfrontiert. Im Jahr 2018 waren weltweit 18 Mio. Menschen an Krebs erkrankt, wovon 9,6 Mio. daran verstarben. Für das Jahr 2040 wird eine Zunahme der Neuerkrankungen auf 29 Mio. erwartet.

Aktuell steigt zudem die Sorge, dass Infektionserkrankungen, von denen viele durch langjährige Impf-Anstrengungen eingedämmt und nahezu ausgerottet werden konnten, in Folge von Globalisierung, Klimaänderung und Impfskepsis zunehmen. Dass sie kurzfristig wieder zu unserem Alltag gehören könnten, wird an den gerade verstärkt auftretenden Masernerkrankungen deutlich. Dringender Handlungsbedarf besteht zudem durch die weltweite Zunahme von Antibiotika-Resistenzen, welche die Behandlung bakterieller Erkrankungen erschwert, sowie das vermehrte Auftreten von viralen Epidemien (z. B. Ebola, HIV, Grippe, etc).



Die Entwicklung von innovativen Strategien und Verfahren ist essenziell, um diese Herausforderungen zu meistern – mit dem Ziel, allen Menschen eine effektive und erschwingliche Gesundheitsversorgung zu ermöglichen. Biologische, bioinspirierte, chemische, technische und informatorische Technologien sind reif und können nun zu hochinnovativen biointelligenten Ansätzen konvergiert werden. So lassen sich evolutionär entstandene Biomoleküle, Zellen, Viren, sogar komplexe Gewebesysteme als Aktoren, Sensoren und Informationsspeicher in technische Systeme integrieren und mit diesen verschmelzen. Biologische und chemische Prinzipien können durch informatische Modellierung, die vom wissensgetriebenen Moleküldesign, über die Einzelzellanalyse bis hin zur prädiktiven Produktion im industriellen Maßstab reicht, in neue und effektive Therapien sowie nachhaltige Produktions- und Versorgungssysteme transformiert werden. Dabei werden skalenübergreifende Effekte möglich, die für den angestrebten Innovationssprung erforderlich sind. Insgesamt kann auf diese Weise die gesamte Wertschöpfungskette vom Molekül bis hin zum Produkt durch enge Verzahnung umfangreicher biologischer und chemischer Forschung mit ingenieurwissenschaftlichen Prinzipien abgebildet werden.

Biointelligente Gesundheit fokussiert auf die Erforschung neuer Wirkstoffe, Diagnostika und Produktionsverfahren durch die enge Verzahnung lokaler Forschungskapazitäten aus Natur- und Ingenieurwissenschaften, um skalenübergreifend Innovation vom Labor schnell in die Produktion und zum Verbraucher zu bringen.

Um die Vision „Länger gesund leben“ umzusetzen, werden drei Leuchtturmthemen adressiert:

- Entwicklung von biobasierten und maßgeschneiderten Präzisionstherapeutika, die schonend sind, langanhaltende Effekte haben und sich durch biointelligente Produktionsverfahren effizienter und kostengünstiger herstellen lassen.
- Entwicklung einer präziseren Diagnostik basierend auf biointelligenten Prinzipien für den zielgerichteten Einsatz neuer Therapien und präventive Maßnahmen.
- Biosignalgesteuerte aktive Implantate sowie Exoprothesen und Exoskelette als optimierte Schnittstellen zwischen biologischem und technischem System, um dadurch Nutzerfunktionalität, Rehabilitationserfolg, Partizipation, Selbständigkeit und Lebensqualität maßgeblich zu verbessern.



## 3.2 BIOINTELLIGENTE ERNÄHRUNG

Um die für 2050 prognostizierte Weltbevölkerung von bis zu 10 Mrd. Menschen quantitativ und qualitativ versorgen zu können, muss die globale Lebensmittelproduktion um ca. 70 Prozent gesteigert werden. Gleichzeitig verringern sich die nutzbaren Agrarflächen, deren Intensivierungspotenzial mittels konventionellem Landbau weitgehend ausgeschöpft ist. Die durch Urbanisierung zunehmende Trennung von Agrar- und Lebensräumen ist energie- und logistikintensiv, schafft Verpackungs- und Abfallprobleme, erhöht klimaschädliche Emissionen und birgt Risiken für Böden, Biodiversität und Ökosystem-Resilienz. Eine biointelligente Lebensmittelproduktion kann diese Herausforderungen meistern.

Durch den Einsatz künstlicher Intelligenz (KI) – derzeit im Lebensmittel- und Ernährungssektor unterproportional genutzt – können systemische Lösungen für Wertschöpfungskreisläufe, syntropische Landnutzung, agrarisierte Stadtplanung, effizientere Technologien, neue oder optimierte Nahrungsmittelquellen, deren Qualitätssicherung sowie nachhaltige Liefer- und Verwertungsketten umfassend erschlossen werden. Exemplarisch ist hier die intelligente Biokonversion noch ungenutzter Nährstoffquellen zu nennen. Als zukunftsweisende und nachhaltige Alternative zur landwirtschaftlichen Tierhaltung können durch die biotechnologische Transformation bisher unverwertbarer Roh- und Reststoffe (z. B. Lignocellulose, Chitin-Exoskelette) durch biotechnologische Konversion als neue Protein-, Fett- und Kohlehydratquellen erschlossen werden, die z. B. als Rohstoffe für 3D-Foodprint-Verfahren genutzt werden können. Die konsequente Erforschung solcher 3D-Foodprint-Verfahren soll zu sensorisch individuell optimierten Lebensmitteln führen, die eine hohe Akzeptanz erwarten lassen. Die Entkopplung der Lebensmittelproduktion von der traditionellen Landwirtschaft und die Einführung von funktionsoptimierten Peptiden, Proteinen und Fetten stellt eine neuartige Lebensmitteltechnologie dar, die zur globalen Ernährungssicherheit und Klimanachhaltigkeit beitragen wird und gleichzeitig ermöglicht, gesunde, sichere und ethisch überlegene Lebensmittel bereitzustellen. Neueste Entwicklungen der KI, künstlicher neuronaler Netzwerke und Bioinformatik können dabei in jeder Phase, d. h. vom Design optimierter Enzyme bis hin zur Optimierung der Produktionsprozesse in Echtzeit genutzt werden.

Potenziale für biointelligente Ansätze ergeben sich auch in der individuellen Ernährung und Gesundheitsvorsorge. Laut Global Nutrition Report 2018 gehören Mangel- und Fehlernährung zu den häufigsten Ursachen gesundheitlicher Probleme. Sie führen zu diversen Folgeerkrankungen, höheren Sterblichkeitsraten und damit zu rasant steigenden Kosten unserer Gesundheitssysteme. Smarte und individualisierte Ernährungskonzepte bieten Lösungen für diverse Probleme, insbesondere bei zunehmender Prävalenz von Übergewicht und dessen Komorbiditäten, aber auch für Nahrungsmittelunverträglichkeiten oder situationsbedingt verändertem Nährstoffbedarf, z. B. in verschiedenen Lebensphasen (Heranwachsen, Alter). Ebenso eröffnen sich Möglichkeiten der Vorbeugung von Krankheiten durch gezielte, maßgeschneiderte Versorgung mit präventiv wirksamen Nahrungsmittelkomponenten. Deren Realisierung ist durch den rasanten Wissenszuwachs auf dem Gebiet der (Epi-)Genetik, Mikrobiom- und Stoffwechselforschung mittelfristig avisiert und wird in Verbindung mit Biosensor/Monitoring-Systemlösungen, der Echtzeit-Evaluation großer Datenmengen und KI-gestützter Modellierung und Entscheidungsfindung zu einem neuen Zugang in der individualisierten Ernährungsberatung, des „metabolic engineering“ und für die Therapie führen.

Biointelligente Ernährung fokussiert auf die Erforschung neuer personalisierter Lebensmittel und deren dezentraler, bedarfsgerechter Herstellung, um sowohl einen Beitrag zu einer flächendeckenden Versorgung mit gesunden Nahrungsmitteln als auch zu einer ressourcenschonenden und sozial verträglichen Produktion zu leisten.

Die hierfür notwendige Grundlagen- und Anwendungsforschung eröffnet nicht nur Chancen für Start-ups, sondern ermöglicht auch die Transition konventioneller Produktionskonzepte – das Kompetenzzentrum Biointelligenz wird so zum Wegbereiter gesellschaftlicher Transformation und gibt Impulse für Forschung, Lehr- und Weiterbildungsmöglichkeiten.

Im Ernährungsbereich wird die Vision verfolgt, die Versorgung der wachsenden Weltbevölkerung sicherzustellen, Lebensmittel nachhaltiger zu produzieren und Ernährungskonzepte auf individuellen Bedarf und situativ anzupassen. Dazu wird auf vielseitige Lösungsansätze zurückgegriffen, wie z. B. innovative Agrarkonzepte, die Erschließung neuer Nährstoffquellen, die optimale Verwertung von Roh- und Reststoffen, innovative Lebensmitteltechnologien sowie wissenschaftsbasierte Ernährungsstrategien und Interventionen.

## 3.3 BIOINTELLIGENTER KONSUM

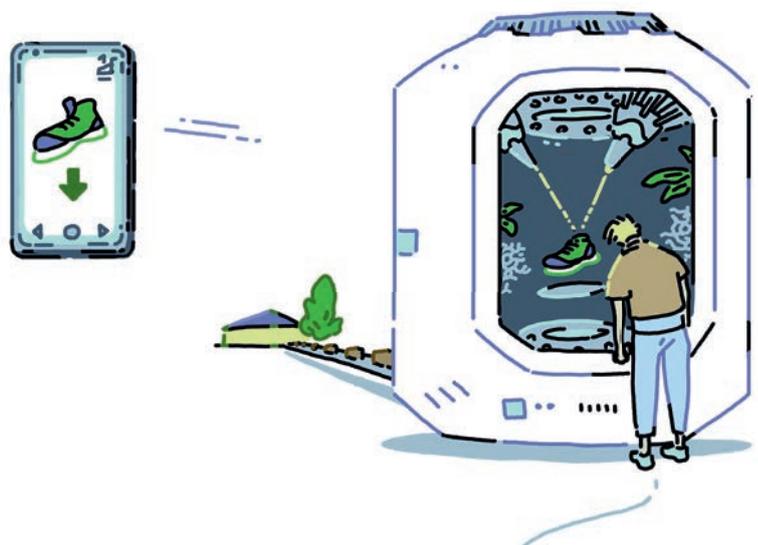
Die Herstellung und Nutzung von Konsumgütern trägt erheblich zum globalen Ressourcenverbrauch bei und generiert große Abfallmengen. So fallen alleine in Deutschland pro Jahr rund 18 Millionen Tonnen Verpackungen an. Mikrokunststoffe und Mikrokunstfasern finden sich in den Ozeanen, auf Land und in nicht bewohnten Gebieten wieder und entstehen durch schwer oder gar nicht biologisch abbaubare Kunststoffe, die durch Abrieb (Textilien, Reifen) oder als Abfall in die Umwelt gelangen.

In Zukunft werden biointelligente Ansätze im Konsumbereich massiv zu einer nachhaltigen Optimierung beitragen. So sollen biologisch abbaubare Werkstoffe für Anwendungen verwendet werden, die zwangsläufig in die Umwelt gelangen sowie recyclingfähige Werkstoffe mit günstiger Ökobilanz für alle anderen Güter. Dies gilt sowohl für kurzlebige Güter (z. B. Verpackungen, Kosmetika) als auch für langlebige Güter (z. B. Automobile, Geräte, Textilien). So wird die biointelligente Produktion von nachhaltigen Konsumgütern zukünftig einen Beitrag zu Ressourceneffizienz, Klima- und Umweltschutz leisten. Neue Möglichkeiten ergeben sich z. B. aus der Kombination von Bio- und Informationstechnologien für die intelligente Steuerung von biotechnologischen Prozessen (z. B. zur Produktion von Tensiden und Plattformchemikalien), den Einsatz von KI für die gezielte Herstellung neuer biobasierter oder biologisch abbaubarer Werkstoffe mit neuen maßgeschneiderten Eigenschaften (z. B. biobasierte oder bioabbaubare Kunststoffe, Textilien, Beschichtungen oder Additive), die intelligente Konzeption gesamter Produktionsverfahren, insbesondere in Bezug auf den ressourcenschonenden Materialeinsatz, die Vermeidung der Überproduktion, die Auswahl geeigneter Materialeigenschaften sowie die Optimierung komplexer Prozesse entlang der gesamten Wertschöpfungskette einschließlich des Verbrauchs und der Wiederverwertung (Recycling, Downcycling), z. B. im Fahrzeugbau oder Urban Gardening. Neue Möglichkeiten ergeben sich aber auch, indem der Konsum von Gütern durch intelligente Dienstleistungen ersetzt wird oder dadurch, den Konsum kurzlebiger Güter durch den Konsum langlebiger Güter zu substituieren. Die technologische Entwicklung muss immer mit einer Entwicklung neuer intelligenter und ökologischer Geschäftsmodelle einhergehen, damit biointelligenter Konsum ökologisch sinnvoll und gleichzeitig ökonomisch interessant ist.

Leuchtturmthemen für kompetitive Forschungsvorhaben in diesem Bereich sind z. B. die nanoskalige proteingestützte Strukturierung von Elektronikbauteilen oder der Einsatz von Enzymen in der 3D-Drucktechnik. Darüber hinaus besteht großes Potenzial in der Modellierung von Stoffwechselwegen von Pflanzen oder Mikroorganismen, die für die numerische oder analytische Vorhersage von komplexen Umsetzungsprozessen genutzt werden kann. Hier gilt es auch die zahlreichen weltweit verfügbaren experimentellen Daten für die Optimierung dieser Prozesse zu nutzen. Beim Design gesamter Prozessketten bietet die Entwicklung und Programmierung digitaler Zwillinge neue Möglichkeiten für die auf Nachhaltigkeit ausgerichtete Optimierung. Diese Zwillinge können für die mathematische Modellierung und computergestützte Simulation sowohl der Prozesse als auch der Produkteigenschaften (Abbaubarkeit, Funktion) genutzt werden.

Biointelligenter Konsum fokussiert daher auf die Etablierung nachhaltiger Wertstoffketten vom Substrat zum Produkt unter ganzheitlicher Betrachtung der Öko- und Ökonomiebilanz. Neue Ansätze der neuronalen Netze bilden das Bindeglied zur engen Interaktion zwischen Ingenieur- und Naturwissenschaften.

Die Vision mit Blick auf den Konsum richtet sich somit auf die Verbesserung von Geschäftsmodellen, Produkteigenschaften und Herstellungsprozessen entlang der kompletten Wertschöpfungskette. Besonders hilfreich sind dabei zukunftsweisende informatorische Modelle zur Optimierung.



## 3.4 BIOINTELLIGENTE ENERGIE

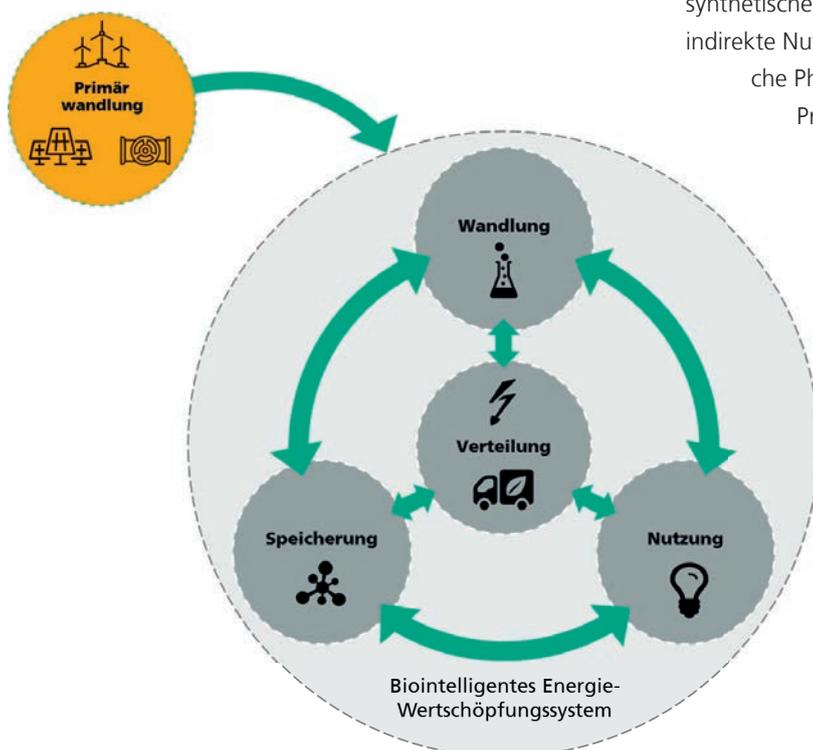
Seit Beginn des Maschinenzeitalters im 19. Jahrhundert steigt der weltweite Primärenergieverbrauch kontinuierlich an. Dabei werden ca. 81 Prozent des Weltenergieverbrauchs durch fossile Energieträger gedeckt. Der intensive Verbrauch fossiler Rohstoffe zur Energiebereitstellung trägt dabei maßgeblich zum Klimawandel durch CO<sub>2</sub> und weitere Treibhausgase bei. Eine effiziente und flexible Versorgung der industriellen Prozesse mit Energie und energieintensiven Grundstoffen steht damit in einem direkten Zusammenhang mit der notwendigen Reduzierung der Umweltbelastung.

Grundsätzlich kann eine nachhaltige Energieversorgung nur realisiert werden, wenn die Menge an Energie, die kontinuierlich von der Sonne zur Verfügung gestellt wird, über die Erzeugung bzw. Konvertierung, Verteilung, Speicherung und Nutzung, mit möglichst geringem Exergieverlust, robust und wirtschaftlich genutzt wird. Die weitgehend lineare Energiewertschöpfungskette (Erzeugung, Verteilung, Speicherung, Nutzung) wird sich zu einem weitaus komplexeren sogenannten biointelligenten Energiewertschöpfungs-system entwickeln.

Perspektivisch besteht die Herausforderung darin, die zur Verfügung stehende Sonnenenergie darüber hinaus auch zur Bindung von CO<sub>2</sub> aus der Umwelt zu nutzen. Nach der primären Energiewandlung der von der Sonne kontinuierlich bereitgestellten Energie in eine technisch nutzbare Energieform (z. B. elektrischer Strom oder als Kraftstoff nutzbare chemische Verbindungen) folgen weitere Wandlungs-, Speicherungs- und Verteilungsprozesse für die Energie.

Zur Umsetzung der Vision einer biointelligenten Energiewertschöpfung sollten verschiedene Leuchtturmvorhaben adressiert werden, zunächst indem auf Prinzipien zurückgegriffen wird, die in der Natur etabliert sind (Inspiration). Die Weiterentwicklung von bioinspirierten Algorithmen, wie z. B. künstliche neuronale Netze, zur Optimierung von Energieverteilungssystemen (Smart Grids) oder die bionische Optimierung von Strukturen und Oberflächen in Energiewandlungssystemen sind beispielsweise wichtige Anwendungen.

Auch auf biologische Komponenten wie Mikroorganismen oder Enzyme kann zurückgegriffen werden, um diese in das technische Energiewertschöpfungs-system einzubinden (Integration). Die effiziente Herstellung und Nutzung chemischer Energieträger (z. B. Wasserstoff oder Methan) spielt hierbei eine große Rolle. Diese stellen problemlos skalierbare Energiespeichermöglichkeiten dar, die sich mittels Biotechnologie und synthetischer Biologie erschließen lassen. Eine direkte oder indirekte Nutzung des Sonnenlichts als Energiequelle (Künstliche Photosynthese) und die Umsetzbarkeit biologischer Prozesse unter moderaten Drücken und Temperaturen tragen dabei wesentlich zur Nachhaltigkeit solcher Prozesse bei.

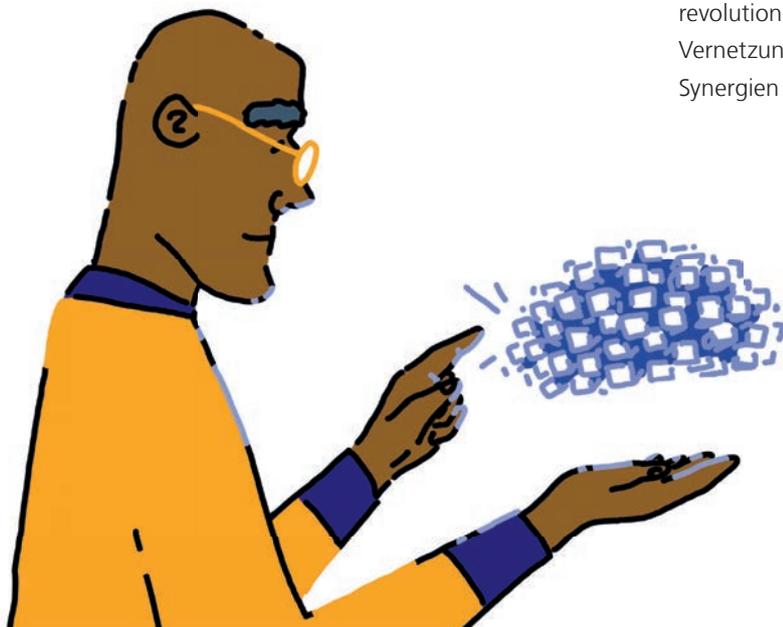


Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch die integrierte Betrachtung von Stoff- und Energieströmen, analog zur Natur. Der biologische Stoffaufbau (Biosynthese) reduziert sich in vielen Fällen nicht auf eine reine Speicherung der Energie in chemischen Verbindungen, sondern kombiniert diese in den überwiegenden Fällen mit einer stofflichen Nutzung. Die biotechnologische Herstellung von Materialien (z. B. Basischemikalien) aus lokal verfügbarer überschüssiger Energie spielt in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle.

Durch die zusätzliche Anwendung von Informationstechnik als Bindeglied zwischen der Bio- und Technosphäre (Interaktion) lassen sich diese Potenziale noch erheblich vergrößern, z. B. durch computergestützte Optimierung synthetisch biologischer Verfahren (biointelligente Energieversorgung).

Das Bedürfnisfeld Energie stellt zudem einen wichtigen Kopplungsfaktor zwischen den übrigen Bedürfnisfeldern dar. Die Kopplung von Stoff- und Energieströmen, z. B. durch die direkte Erzeugung von Basischemikalien mittels solarer Energie zur Herstellung von Konsumprodukten (z. B. Polymere), Nahrungsergänzungsmitteln (z. B. Omega-3-Fettsäuren), biobasierten Kraftstoffen für die post-fossile Mobilität (Biofuels oder Wasserstoff) oder auch biotechnologisch herstellbarer Pharmazeutika ist möglich. Darüber hinaus kann mittels bioelektrochemischer Einheiten Energie aus biobasierten Rest- und Abfallströmen vieler Teilprozesse zurückgewonnen werden – etwa mithilfe von mikrobiellen Brennstoffzellen. Neben der Abfallnutzung zur Stromerzeugung kann auch der prozessbegleitende Einsatz von Mikroben in den Bedürfnisfeldern Ernährung und Konsum einen wichtigen Beitrag zur dezentralen Stromversorgung liefern.

Beim Vorantreiben der Biologischen Transformation besteht die Vision im Energiebereich darin, dem Klimawandel erfolgreich entgegenzuwirken, indem nicht nur die Herstellung, sondern auch die Verteilung und Speicherung von Energie revolutioniert wird. Ein weiterer Aspekt ist dabei die bessere Vernetzung von Stoff- und Energieströmen, aus der sich neue Synergien in Produktionsprozessen ergeben.



## 3.5 BIOINTELLIGENTES WOHNEN

Die gebaute Umwelt umgibt uns täglich. Menschen halten sich je nach Kulturkreis bis zu 90 Prozent ihres Lebens in Gebäuden auf. Sie sind unsere Lebensumwelt, die neben sozialen Interaktionen unser tägliches Wohlbefinden maßgeblich beeinflusst. Darüber hinaus wissen wir heute, dass 35 Prozent der energiebedingten Treibhausgasemissionen auf das Bauen zurückzuführen sind. Gleichzeitig stammen 50 Prozent der Abfallmengen auf Landes- und Bundesebene aus dem Bausektor. Darüber hinaus entfallen 36 Prozent des Endenergieverbrauchs in Deutschland auf den Gebäudebereich (Wärme und Strom) und 25 Prozent der energiebedingten Treibhausgasemissionen in Deutschland sind auf die Bereitstellung von Gebäudewärme zurückzuführen.

Zusätzlich ist hervorzuheben, dass das deutsche Baugewerbe mit 1,85 Mio. Beschäftigten (Basis 2017) zu den größten deutschen Arbeitgebern zu zählen ist. Die Beschäftigten setzen ein Bauvolumen von mehr als 400 Mrd. Euro um (Basis 2018), wobei Wohngebäude mehr als 57 Prozent des nominalen Bauvolumens ausmachen. Vor diesem Hintergrund ist der zukunftssträchtige Ansatz der Biointelligenz gerade auf dem Weg zur nachhaltigen Entwicklung unserer Wohngebäude zu nutzen. Es gilt nachhaltigen Wohnraum bereitzustellen, der sich verschiedener Lösungsansätze bedient.

Diese sollten wie folgt gestaltet sein:

- dezentral (z. B. dezentrale Produktion von Lebensmitteln im Wohnkontext; wenig Transport, personalisierte Kleinmengen, wenig Abfall),
- gruppenspezifisch, personalisiert und adaptiv (z. B. spezifische Wohnräume selbstregelnd, flexibel),
- konnektiv (z. B. Interaktion von Individuen, technischen und biologischen Systemen),
- ressourcenschonend, klimafreundlich und biodiversitätsfördernd (z. B. Kreislaufwirtschaft, urbane Ökosysteme),
- resilient (z. B. widerstandsfähig gegenüber unumkehrbaren klimatischen Veränderungen),
- kostengünstig (z. B. „bezahlbaren Wohnraum“) und
- technologiebasiert (z. B. durch KI Wohlbefinden steigern und Energieverbrauch senken).



Bei der Entwicklung derartiger Lösungsansätze werden nicht nur die Ingenieurwissenschaften (Technologie) mit der Biologie (Naturwissenschaft) verknüpft, sondern auch die sozialwissenschaftlichen Rahmenbedingungen des Wohnens berücksichtigt, um Teilhabe, Identität und Akzeptanz zu fördern.

Durch die Biologische Transformation erschließen sich herausragende Möglichkeiten, Lebensräume nachhaltig zu gestalten und gleichzeitig das Wohlbefinden, die Leistungsfähigkeit und die Gesundheit der Menschen zu verbessern. So können mit einer Reihe von Leuchtturmvorhaben in den folgenden Themenbereichen signifikante Fortschritte erzielt werden.

Biointelligenz bietet die Chance, durch neuartige Baustoffe, -elemente und -produkte sowie deren Herstellungs- und Recyclingverfahren, erheblich zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und somit zur Ressourcenschonung beizutragen. Einen vielversprechenden Ausgangspunkt bieten biobasierte Materialien sowie bioinspirierte und -integrierte Designs von Bauelementen (z. B. multifunktionale urbane Oberflächen) bis hin zu ganzen Gebäuden. Biointegrative Verfahren (z. B. unter Nutzung spezialisierter Organismen) stellen hocheffiziente Herstellung und selektives Recycling wertvoller Stoffe und Materialien bei möglichst geringem Energieverbrauch in Aussicht.

Insbesondere bietet die Entwicklung biointelligenter Baumaterialien als Alternative zu Beton große Chancen. In diesem Bereich sind neuartige Biopolymer-Komposit-Materialien vielversprechend, die in ihrer Mikrostruktur in Hinblick auf Isolationsverhalten, Gewicht und Tragfähigkeit anisotrop optimierbare Eigenschaften aufweisen. Solche neuartigen Baumaterialien sollen Möglichkeiten bieten, die weit über die des heute möglichen innovativen Holzbaus hinausgehen.

Darüber hinaus erschließen sich durch Biointelligenz neue Potenziale, den Gestaltungsspielraum von Wohn- und anderen Lebensräumen (z. B. Büro, Hotel, ...) deutlich und auch wirtschaftlich zu erweitern. Biologische Systeme bieten exzellente Eigenschaften zur Reduktion von Schadstoffen sowie zur akustischen, hygrothermischen und mikrobiellen Optimierung von Lebensräumen (Green Follows Function). Insbesondere durch den synchronisierten Einsatz mit Künstlicher Intelligenz wird es möglich, biologische und technische Systeme so zu vernetzen, dass die Lebens- und Umweltqualität in Räumen, Gebäuden und in der urbanen Umgebung erhöht und gleichzeitig der ökologische Fußabdruck des Wohnens minimiert werden kann, z. B. durch intelligente Regelung von Raumklima und Luftqualität durch Vernetzung von Pflanzen und Gebäudetechnik unter Berücksichtigung von Prognosen zu Umweltbedingungen (z. B. Wetter) und Raumnutzungsbedarfen (z. B. Personenzahl im Raum).

Indem Lösungsansätze nicht nur für einzelne Bedürfnisbereiche entwickelt werden, sondern auch stets das Zusammenspiel der einzelnen Lösungen als Ziel verfolgen, lässt sich die Hebelwirkung von Biointelligenz nochmals potenzieren. Insbesondere das Verstehen, Planen und Organisieren von Quartieren und Städten als biointelligente Organismen birgt ein beispielloses Potenzial, das Gemeinwohl zu steigern und drängende Herausforderungen (z. B. Klimawandel, Urbanisierung etc.) effektiv anzugehen. Auch hierfür bietet der Einsatz digitaler Technologien und insbesondere der Künstlichen Intelligenz herausragende Möglichkeiten in Leuchtturmvorhaben (z. B. Reallabore auf Gebäude- oder Quartiersebene) neue Lösungsansätze zu etablieren.

Die Vision im Bedarfsfeld Wohnen richtet sich insbesondere an das Baugewerbe. Diesem sollen biointelligente Konzepte bereitgestellt werden, wie sich die Wohnqualität in Gebäuden und damit zugleich auch die Lebensqualität in Städten verbessern lässt. Davon betroffen sind auch die Lebensbereiche Gesundheit und Arbeiten.

# 4. BIOINTELLIGENTE WERTSCHÖPFUNG IN DEUTSCHLAND

Es ist die Aufgabe unserer Generation, einen radikalen, strukturellen Wandel hin zu einer nachhaltigen Wertschöpfung zu realisieren. Die Biologische Transformation wird entscheidend zum Erhalt des Wirtschaftsstandorts Deutschland beitragen und stellt gleichzeitig eine einzigartige Chance dar, eine innovative, nachhaltige Wertschöpfung in die Tat umzusetzen. Aus Sicht des Kompetenzzentrums Biointelligenz ergeben sich folgende Thesen für die erfolgreiche Entwicklung einer biointelligenten Wertschöpfung in Deutschland:

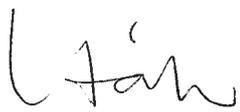
1. Um das Potenzial der Biologischen Transformation vollständig zu nutzen, ist eine transdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Fachgebieten (Natur-, Geistes- und Ingenieurwissenschaften) entscheidend. Voraussetzung für das Gelingen der Transformation ist eine offene Innovations- und Kommunikationskultur in Forschung, Unternehmen, Gesellschaft und Politik.
2. In vielen relevanten Feldern der biointelligenten Wertschöpfung (u. a. Künstliche Intelligenz, Biotechnologie) ist Deutschland derzeit nicht führend. Dies liegt nicht zuletzt an der vergleichsweise restriktiven Gesetzgebung und dem eingeschränkten Zugang zu Risikokapital. Um nicht den Anschluss an andere Nationen zu verlieren, ist es von immenser Bedeutung, Freiräume für die Wissenschaft sowie Interaktionsplattformen mit der Wirtschaft zu schaffen. Gründer, die entscheidend dazu beitragen, Ideen zu marktreifen Produkten zu transferieren, sollten durch Abbau von Bürokratie, vereinfachten Kapitalzugang und verbesserte soziale Absicherung unterstützt werden.
3. Die Biologische Transformation stellt eine immense Herausforderung dar. Will sich Deutschland als Vorreiter positionieren, ist es wichtig jetzt interdisziplinäre Leuchtturmvorhaben umzusetzen, eine gemeinsame politische Agenda zu entwickeln sowie regionale Kompetenz- und Transferzentren zu etablieren. Forschungsinstitutionen sind aufgerufen, ihre Kompetenzen zu bündeln und fachübergreifende Partnerschaften einzugehen. Unternehmen positionieren sich in diesem Innovationsfeld strategisch, indem sie – insbesondere in der Forschung und Entwicklung – eine interdisziplinäre Personalstruktur schaffen und über den Tellerrand hinaus blicken.
4. Die Biologische Transformation wird elementare menschliche Bedürfnisfelder (Gesundheit, Ernährung, Wohnen, Konsum, Energie) spürbar beeinflussen. Dies kann Unsicherheiten bei der Bevölkerung auslösen. Die Akzeptanz in der Bevölkerung ist ein kritischer Erfolgsfaktor. Das Für und Wider bestimmter Handlungsalternativen muss in Form von umfangreichen Bürgerdialogen und Informationskampagnen im öffentlichen Diskurs entwickelt werden.
5. Ausschlaggebend für den langfristigen Erfolg der Biologischen Transformation ist ein breites und grundlegendes Wissen in Naturwissenschaften, Technik, Informatik sowie in den Sozial- und Geisteswissenschaften. Dies ist sowohl in der Ausbildung, durch Anpassung von Lehr- und Studienplänen sowie dem Aufbau neuer Studiengänge, als auch in der Forschung und Entwicklung notwendig. Grundlegend ist hier die Schaffung eines einheitlichen Sprachraums, der eine Zusammenarbeit über alle Disziplinen hinweg ermöglicht.

## 5. GLOSSAR

<b>bioinspiriert</b>	Beschreibt alle technischen Prozesse und Produkte, die von Organismen und Ökosystemen, der Evolution oder der Natur im Allgemeinen inspiriert wurden und keine aktiven biologischen Komponenten beinhalten.
<b>biointegriert</b>	Beschreibt alle technischen Prozesse und Produkte, die aktive biologische Komponenten beinhalten.
<b>biointelligent</b>	Beschreibt alle technischen Prozesse und Produkte mit mindestens einer aktiven biologischen Komponente, die in einem durch Datenverarbeitungssysteme regel- bzw. steuerbaren Informationsaustausch mit einem technischen System stehen.
<b>biobasiert</b>	Anteilig oder vollständig aus inaktiver Biomasse bzw. zirkulärem Kohlenstoff.
<b>Biotechnologie</b>	Biotechnologie ist die Anwendung von Wissenschaft und Technik auf lebende Organismen, Teile von ihnen, ihre Produkte oder Modelle von ihnen zwecks Veränderung von lebender oder nicht lebender Materie zur Erweiterung des Wissensstandes, zur Herstellung von Gütern und zur Bereitstellung von Dienstleistungen.
<b>Systembiologie</b>	Ansatz, ein biologisches System holistisch, d. h. ganzheitlich, zu betrachten und quantitativ zu beschreiben. Dabei steht die Interaktion der einzelnen Module (Moleküle, Zellen, Regulationsmechanismen oder Populationen) im Vordergrund der Untersuchungen.
<b>Bioökonomie</b>	Erzeugung und Nutzung biologischer Ressourcen (auch Wissen), um Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren im Rahmen eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems bereitzustellen.
<b>Nachhaltige Bioökonomie</b>	Bioökonomie, die Beiträge zu den Nachhaltigkeitszielen liefert.
<b>Biologische Transformation</b>	Die Biologische Transformation ist der Prozess der zunehmenden Nutzung von Materialien, Strukturen, Prinzipien und Prozessen der belebten Natur in der Technik mit dem Ziel der nachhaltigen Wertschöpfung.
<b>Technologiebasierte Bedarfswirtschaft</b>	Die technologiebasierte Bedarfswirtschaft ist die zukunftsfähige Wirtschaftsform, die durch die Biologische Transformation angestrebt wird, mit folgenden Merkmalen: <ul style="list-style-type: none"><li>■ Produkte werden ausschließlich nach Bedarf produziert.</li><li>■ Verschwendung und Abfall durch Überproduktion existieren nicht.</li><li>■ Alle Produkte werden auf die individuellen (heutigen und zukünftigen) Bedürfnisse des Kunden zugeschnitten.</li><li>■ Fabrikation und Refabrikation finden vornehmlich in dezentralen Einheiten und auf Basis lokal vorhandener Ressourcen statt.</li><li>■ Alle Produkte können nach Ende ihres Lebenszyklus zu 100 Prozent in neue Produkte überführt werden oder ohne negative Auswirkung auf die Umwelt an diese abgegeben werden.</li></ul>
<b>Zusammenhang Biologische Transformation und Bioökonomie</b>	Die Biologische Transformation ist der Lösungsansatz, der zu einer Bioökonomie in Form einer technologiebasierten Bedarfswirtschaft führt.

## 6. EIN AUFRUF ZUM HANDELN

Das Kompetenzzentrum Biointelligenz sieht in der biointelligenten Wertschöpfung eine einzigartige Gelegenheit für Deutschland, eine Positivision als Vorreiter umzusetzen, die es der Wirtschaft nicht nur erlaubt existierende Wettbewerbsvorteile weiter auszubauen, sondern einen nachhaltigen Fortschritt garantiert. Zünglein an der Waage ist die rechtzeitige Formulierung einer politischen Agenda, die es den Bürgern, Industrie und Forschung erlaubt, das Thema gemeinsam erfolgreich zu gestalten. Die Beteiligten des Kompetenzzentrums forcieren den Wandel gemeinsam.



apl. Prof. Dr. Susanne Bailer



Prof. Dr. Wilhelm Bauer



Prof. Dr. Thomas Bauernhansl



Prof. Dr. Joachim Bill



Prof. Dr. Christian Bonten



Prof. Dr. Melina Claussnitzer



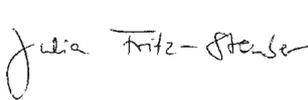
Jun.-Prof. Dr. Hanaa Dahy



Prof. Dr. Bernd Ebersberger



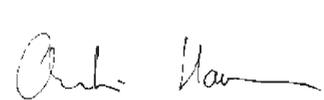
Prof. Dr. Jan Frank



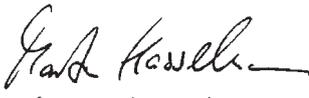
Prof. Dr. Julia Fritz-Steuber



Johannes Full



Prof. Dr. Christine Hannemann



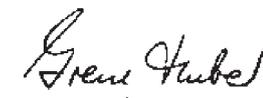
Prof. Dr. Martin Hasselmann



Prof. Dr. Rudolf Hausmann



Prof. Dr. Marco Huber



Dr. Irene Huber



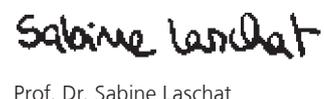
Prof. Dr. Roland Kontermann



Prof. Dr. Marc Kreuzbruck



Sabine Krieg, MBA



Prof. Dr. Sabine Laschat



Prof. Dr. Philip Leistner



Prof. Dr. Iris Lewandowski



Dr. Robert Miehe



Prof. Dr. Markus Morrison



Prof. Monilola Olayioye, PhD



Prof. Martin Ostermann



Prof. Dr. Bernd Plietker



Prof. Dr. Alexander Sauer



Prof. Dr. Katja Schenke-Layland



Prof. Dr. Christian Stoy



Dr. Oliver Schwarz



Prof. Dr. Ralf Takors



apl. Prof. Dr. Günter Tovar



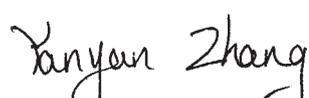
Jun.-Prof. Dr. Björn Voß



Prof. Dr. Christina Wege



Dr. Markus Wolperdinger



Jun.-Prof. Dr. Yanyan Zhang



Dr. Susanne Zibek

## 7. LITERATUR

- Bauer, W. et al. (2018): Vorfahrt für Innovation – wie Baden-Württemberg seine Spitzenposition behaupten kann – Innovationspolitische Impulse des Beauftragten für Technologie der Landesregierung von Baden-Württemberg; Stuttgart
- Bauernhansl, T. et al. [Hrsg.] (2019): Biointelligenz – Eine neue Perspektive für nachhaltige industrielle Wertschöpfung – Ergebnisse der Voruntersuchung zur Biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung (BIOTRAIN); Fraunhofer-Verlag; Aachen, Dortmund, Dresden, Freiburg, Stuttgart (ISBN 978-3-8396-1433-4)
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2019): Bericht zur Lage und Perspektive der Bauwirtschaft 2019; Bonn
- Byrne, G. et al. (2018): Biologicalisation: Biological transformation in manufacturing; CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology; 21; 1–32
- Deutsche Energie Agentur (2018): dena-Gebäudereport Kompakt 2018 – Statistiken und Analysen zu Energieeffizienz im Gebäudebestand; Berlin
- Deutschland in Zahlen [Hrsg.] (2019): Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen – in Mrd. Verfügbar: <https://www.deutschlandin zahlen.de/tab/deutschland/volkswirtschaft/entstehung/bruttowertschoepfung-nach-wirtschaftsbereichen>
- DGNB (2018): [https://issuu.com/dgnb1/docs/180923-dgnb-kein\\_ ja\\_ aber\\_ mehr-web-e/10](https://issuu.com/dgnb1/docs/180923-dgnb-kein_ ja_ aber_ mehr-web-e/10), zitiert Umweltbundesamt: Nationales Treibhausgasinventar 2018; 04/2018
- Fischer-Kowalski, M. et al. (2011): Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth: Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel; Paris (ISBN: 978-92-807-3167-5)
- Gorning, M. Michelsen, C., Bruns, M. (2019): Bauwirtschaft weiter in Vorwärtsgang – staatliche Impulse treiben die Preise; DIW-Wochenbericht 1+2/2019; Berlin
- Miehe, R. et al. (2018): The biological transformation of the manufacturing industry – Envisioning biointelligent value adding; Procedia CIRP 72; pp. 739-743
- Miehe, R. et al. (2018): Biointelligenz im Produkt und in der Produktion. In: Rieg, F.: Handbuch Konstruktion; Hanser; München; S. 621-634 (ISBN: 978-3-446-45224-4)
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2018): Abfallbilanz 2017, Ressourcen aus unseren kommunalen Kreislaufwirtschaft; Stuttgart
- Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg [Hrsg.] (2018): Wirtschaftsdaten Baden-Württemberg 2018; Statistisches Landesamt Baden-Württemberg; Stuttgart
- Patermann, C. (2014): Innovation, Wachstum, Bioökonomie – Europa wird sich sputen müssen, um in der Umsetzung der Bioökonomie im industriellen Maßstab mitzuhalten. In: Blickwinkel. Verfügbar: [https://www.brain-biotech.de/content/blickwinkel/1314q2\\_growth/1314\\_q2\\_Wachstum\\_Patermann.pdf](https://www.brain-biotech.de/content/blickwinkel/1314q2_growth/1314_q2_Wachstum_Patermann.pdf)
- Schmidt-Salomon, M. (2014): Hoffnung Mensch. Eine bessere Welt ist möglich; Piper Verlag (ISBN 978-3-492-05608-3)
- Statistisches Bundesamt (2017): Abfallbilanz Deutschland 2016; Wiesbaden
- Sustainable Europe Research Institute (SERI) / Vienna University of Economics and Business (WU Vienna) [Hrsg.] (2011): Global resource extraction by material category 1980-2011. Verfügbar: <http://www.materialflows.net/trends/analyses-1980-2011/global-resource-extraction-by-material-category-1980-2011/>
- Telgheder, M. (2009): Die Biologisierung der Welt. In: Handelsblatt, 17.09.2009; Verfügbar: <http://www.handelsblatt.com/technik/forschung-innovation/zukunft-der-industrie-die-biologisierung-der-welt/3260566.html>
- Weizsäcker et al. (2017): Wir sind dran – Was wir ändern müssen, wenn wir bleiben wollen – Eine neue Aufklärung für eine volle Welt; Gütersloher Verlagshaus; Gütersloh (ISBN 978-3-579-0869-3)
- World Commission on Environment and Development [Hrsg.]. (1987): Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development; United Nations; verfügbar: [www.un-documents.net/our-common-future.pdf](http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf)



Schlussredaktion, Layout und Satz  
Jan Müller, Thaya Schroeder

Grafiken  
Abdelhamid Ameer

Herausgeber  
Kompetenzzentrum Biointelligenz



## KONTAKT

Fraunhofer-Institut für Produktions-  
technik und Automatisierung IPA  
Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl  
Telefon +49 711 970-1100  
[thomas.bauernhansl@ipa.fraunhofer.de](mailto:thomas.bauernhansl@ipa.fraunhofer.de)