

Untersuchung

# BENCHMARK BIOINTELLIGENZ

Stand und Perspektiven  
einer nachhaltigen  
industriellen Wertschöpfung



## Projektkonsortium



VDMA Services GmbH



Gefördert vom

Betreut vom



**Zum Titelbild:** Das Titelbild zeigt eine abstrakte Darstellung von Nervenzellen, auch als Neuronen bekannt, die auf sechseckigen Elektroden wachsen. Mittels elektrochemischer Signale werden Reize weitergeleitet, sodass die Neuronen sowohl untereinander als auch mit den Elektroden „kommunizieren“. Diese Abbildung symbolisiert die Schnittstelle zwischen biologischen Prozessen und einem informationstechnischem System.

Untersuchung

# BENCHMARK BIOINTELLIGENZ

Stand und Perspektiven  
einer nachhaltigen  
industriellen Wertschöpfung

## Impressum

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt mit dem Förderkennzeichen 02P20E800 wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zur Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Benchmark Biointelligenz – Stand und Perspektiven einer nachhaltigen industriellen Wertschöpfung

### Layout und Infografiken

Silke Langanki

### Titelbild

Vesela Stanoeva

### Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl, Dr.-Ing. Robert Mieke; Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Prof. Dr. Andreas Pyka; Lehrstuhl für Innovationsökonomik (520i) der Universität Hohenheim

Prof. Dr.-Ing. Ralf Takors; Institut für Bioverfahrenstechnik der Universität Stuttgart

Richard Clemens; VDMA Services GmbH

### Verfasser

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: Yannick Baumgarten, Johannes Full, Andrea Gaißler, Silja Hohmann, Steffen Kiemel, Franziska Mais, Dr.-Ing Robert Mieke, Michael Rentschler, Maximilian Schutzbach, Dr. Nadine Silber

Lehrstuhl für Innovationsökonomik (520i) der Universität Hohenheim: Lea F. Stöber

Institut für Bioverfahrenstechnik der Universität Stuttgart: Dr. Isabella Casini, Stefanie Föllner

VDMA Services GmbH: Dr. Eric Maiser, Anna Küster, Nathalie Wagner

### Druck

Fraunhofer-Druckerei, Stuttgart

### Bildnachweise

Adobe Stock (S. 13 Andrey, S. 17 Aurora Blaze, S. 19 Andrey, S. 29 Who is Danny, S. 33 Andrey, S. 34 Vance, S. 36 Aukid, S. 37 Denis, S. 38 Gorodenkoff, S. 40 marritch, S. 43 Andrey); S. 49 Ginkgo Bioworks; Adobe Stock (S. 64 Aurora Blaze, S. 75 Philippova, S. 77 SKT Studio); S. 79 Colt International, Arup Deutschland; Adobe Stock (S. 80 AkuAku); S. 81 Koniku; S. 82 Cellbox Labs; Adobe Stock (S. 83 Tommy, S. 85 Science RF, S. 86 Haleema, S. 98 Aurora Blaze, S. 115 Andrey, S. 139 Andrey, S. 142 musa, S. 143 atapdesain, S. 144 bluering-media, S. 146 BlazingDesigns, S. 151 Andrey)

Icons: The Noun Project

DOI: 10.24406/publica-2748



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitungen 4.0 International Lizenz (CC BY-NC-ND 4.0 DE): <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>

# INHALT

4 – Vorwort Förderer  
6 – Vorwort Herausgeber  
9 – Zusammenfassung  
11 – Executive Summary

## S. 13 — 1. Einleitung

## S. 19 — 2. Methodik

## S. 33 — 3. Aktuelle Trends und Herausforderungen

## S. 43 — 4. Analyse der weltweiten Aktivitäten

44 – Akteure der biointelligenten Wertschöpfung  
66 – Befähigertechnologien für die biointelligente Wertschöpfung  
91 – Markt- und Investitionspotenziale der biointelligenten Wertschöpfung

## S. 115 — 5. Globales Rennen: Benchmarking der Biointelligenz im internationalen Vergleich

## S. 139 — 6. Auf dem Weg zur biointelligenten Wertschöpfung: Vier Szenarien für Deutschland

## S. 151 — 7. Fazit und Ausblick

152 – Kernergebnisse  
156 – Ausblick  
158 – Grenzen der Untersuchung

160 – Literaturverzeichnis  
170 – Glossar  
173 – Beteiligte

# VORWORT FÖRDERER

Schlüsseltechnologien sind kein Wert an sich, sondern Treiber der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit und der gesellschaftlichen Entwicklung. Ob diese Technologien tatsächlich ein „Schlüssel“ zu Wohlstand und Beschäftigung sind, entscheidet sich im Prozess der Wertschöpfung. Das ist der Grund, warum die Bundesregierung dem Forschungstransfer einen besonders hohen Stellenwert beimisst.

Neue Technologien in Zusammenarbeit zwischen Wirtschaft und Wissenschaft bis zur Entwicklung von Prototypen zu bringen, das ist ein wesentlicher Teil der Förderung des BMBF. Gerade im Programm „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ steht dieser Aspekt im Mittelpunkt.

Es ist für diese Art der Förderung wichtig, sehr früh zu erkennen, ob eine Technologie überhaupt das Potenzial hat, sich zu einer Schlüsseltechnologie zu entwickeln. Jede

---

Jede heute führende Technologie hat einmal als »neues Phänomen« angefangen, und erst in der Rückschau zeigte sich, dass sich daraus eine führende Anwendung entwickelt hatte.

---

heute führende Technologie hat einmal als „neues Phänomen“ angefangen, und erst in der Rückschau zeigte sich, dass sich daraus eine führende Anwendung entwickelt hatte.

Das Thema „Biologisierung der Technik“ stellt hier keine Ausnahme dar. Es ist deshalb nur folgerichtig, dass das BMBF sich des Themas früh annimmt und sich u. a. damit beschäftigt, welche Potenziale

hier schlummern, ob zu erwarten ist, dass sich mit der Biologisierung neue industrielle Möglichkeiten ergeben, wie diese zu erreichen sind und ob es noch Wissenslücken gibt, die durch F&E geschlossen werden können. Bereits 2019 wurden daher die Ergebnisse der vom BMBF geförderten Voruntersuchung „Biologische Transformation der industriellen Wertschöpfung (BIOTRAIN)“ veröffentlicht.

Schaut man so auf das Thema, so zeigt sich: „Biologisierung der Technik“ umfasst – allgemein gesprochen – drei Aspekte. Es geht (1) um das Lernen von der Natur, (2) die Integration von biologischen Systemen in die Produktion und (3) die Kombination

von biologischen Systemen und modernen digitalen Technologien mit Produktionssystemen in der Wertschöpfung.

In der Praxis werden die drei genannten Aspekte als Umsetzungsstufen von Biologisierung in der Technik verstanden:

Auf der ersten Stufe steht die Bioinspiration, die Übertragung von biologischen Prozessen und Systemen auf technische Materialien, Strukturen und Prozesse. Ziel ist die Entwicklung neuer Materialien und Strukturen, Funktionalitäten sowie Organisations- und Kooperationslösungen. Wir alle kennen das Beispiel des Lotuseffektes, aber auch die Steuerung logistischer Prozesse mit Simulationen, die nach dem Vorbild von Bienenstöcken organisiert wird, fällt hierunter.

Auf der zweiten Stufe – der Biointegration – werden, wie beispielsweise in der industriellen Biotechnologie, biologische Systeme in technische Verfahren, Prozesse bzw. Systeme integriert. Etwa der Einsatz von programmierbaren Organismen in Sensoren.

Auf der dritten und letzten Stufe – der Biointelligenz – interagieren technische und biologische Systeme mittels intelligenter Informationsverarbeitung wie beispielsweise Verfahren der künstlichen Intelligenz, mit dem Ziel, neue Formen intelligenter Produktionssteuerung zu entwickeln. Biointelligenz betrifft daher alle Bereiche der Produktion, denn das Ziel ist die ganzheitliche Optimierung von Produktionssystemen.

Es ist leicht zu erkennen, dass Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet keine disziplinären Grenzen einhalten kann, sondern diese akademischen Trennlinien ganz bewusst überschreitet, sogar überschreiten muss. Diese F&E ist interdisziplinär angelegt. Schon deshalb sind Untersuchungen wie die im Projekt „Internationaler Benchmark Biointelligenz (InBenBio)“ unverzichtbar. Alle wichtigen Gesichtspunkte der Technologie zusammenzubringen, den Stand der neuesten Aktivitäten und Initiativen im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung zu inventarisieren und die Ergebnisse dann der großen Zahl potenzieller Nutzer anzubieten, sind große und fordernde Aufgaben.

Die Anknüpfungspunkte für die Wissenschaft und die Wirtschaft sind vielfältig. Beispielsweise wird durch die potenzielle Anwendung von natürlichen Prozessen in der industriellen Anwendung erkennbar, wie biointelligente Wertschöpfung eine nachhaltige Wirtschaftsweise unterstützen kann.

Es könnten noch viele weitere Punkte genannt werden. Jedoch reicht dafür der Platz nicht aus. Daher lege ich Ihnen die Lektüre dieses Berichts sehr ans Herz. Sie können dann die Frage, ob „Biologisierung der Technik“ das Potenzial zu einer Schlüsseltechnologie hat, selbst beantworten. Für die wertvolle Arbeit im Projekt bedanke ich mich bei allen Beteiligten.

Dr. Tina Klüwer,

Leiterin der Abteilung „Forschung für technologische Souveränität und Innovationen“ im Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

# VORWORT HERAUSGEBER

Die biointelligente Wertschöpfung eröffnet einen neuen, nachhaltigen Innovationsraum. Die neuen technologischen Möglichkeiten hierfür entstehen durch die gegenseitige Befruchtung von Bio-, Hard- und Software, die neuartige Produkte, Produktionstechnologien und Wertschöpfungsnetzwerke hervorbringt. Mit disruptiven Innovationen werden neue und etablierte Akteure die Modernisierung der deutschen Industrie und Bildungslandschaft vorantreiben. Obwohl der Begriff der Biointelligenz bereits Ende des 20. Jahrhunderts aufkam, entfaltet das Konzept erst seit dem Ende der zweiten Dekade des 21. Jahrhunderts seine volle Wirkung. Maßgeblich initiiert durch die Ergebnisse der BMBF-geförderten Voruntersuchung zur Biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung (BIOTRAIN) etablierten sich in den letzten Jahren in Deutschland und Europa zunehmend Netzwerke, die Akteure an den Schnittstellen der Lebens-, Ingenieur- und Informationswissenschaften zusammenbringen. Verwandte Initiativen und Forschungsprogramme entstanden jüngst u. a. in den USA, Kanada, Israel und China. Will die Bundesrepublik Deutschland eine führende Rolle in diesem Innovationsfeld einnehmen, sind jetzt die richtigen Maßnahmen erforderlich. Dafür ist ein Blick auf die Stärken der internationalen Wettbewerber und Marktpotenziale notwendig.

Dies ist die Motivation für die vorliegende Internationale Benchmark-Untersuchung zur biointelligenten Wertschöpfung. Im Mittelpunkt der Untersuchung stand dabei stets die Frage, wie Deutschland als Wirtschaftsstandort zu einem Leitmarkt und Leitanbieter einer biointelligenten Wertschöpfung werden kann. Zu diesem Zweck wurden Trends in Bedürfnisfeldern analysiert, eine umfangreiche Akteur- und Technologierecherche durchgeführt, Interviews mit hochrangigen internationalen Experten geführt, Marktpotenziale quantifiziert und die Ergebnisse in einer eigens entwickelten Benchmark-Systematik leicht verständlich ausgewertet. Auf Basis der Benchmark-Auswertung und einer Szenario-Analyse schließt die Untersuchung mit einer Zusammenfassung der Kernergebnisse sowie einem Ausblick.

Die erfolgreiche und notwendigerweise interdisziplinäre Umsetzung einer solchen Untersuchung erfordert das Mitwirken mehrerer Projektpartner im effektiven Zusammenspiel mit externen Experten. Nur durch die Beteiligung zahlreicher engagierter Experten aus Industrie, Forschung, Politik, sowie Repräsentanten gesellschaftlicher Gruppen in Interviews, Workshops und dem Begleitkreis war es möglich, detaillierte Steckbriefe von elf Ländern zu erstellen, die einen wissenschaftlich fundierten internationalen Vergleich ermöglichen. An dieser Stelle sei der herzlichste

Dank allen Akteuren ausgesprochen, die sich den detaillierten Fragen in den Interviews oder den Diskussionen in den Workshops gestellt haben. Ihre Sichtweisen, Anregungen und auch Kritik haben das Projekt InBenBio bedeutend vorangetrieben. Weiterer Dank gilt selbstverständlich allen beteiligten Projektpartnern, Beiräten sowie Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die sich monatelang sowohl mit inhaltlichen wie auch organisatorischen Aufgaben auseinandersetzen.

Auf den nachfolgenden Seiten finden Sie die Ergebnisse der Untersuchung kompakt und anschaulich dargestellt. Wir wünschen Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, eine ansprechende und aufschlussreiche Lektüre.

Thomas Bauernhansl, Richard Clemens, Robert Mieke,  
Andreas Pyka, Ralf Takors

---

Will die Bundesrepublik Deutschland eine führende Rolle in diesem Innovationsfeld einnehmen, sind jetzt die richtigen Maßnahmen erforderlich. Dafür ist ein Blick auf die Stärken der internationalen Wettbewerber und Marktpotenziale notwendig.

---

# ZUSAMMENFASSUNG

## Erläuterung der Icons



**Kapitelzusammenfassung:** Dieses Symbol weist auf eine Zusammenfassung des wesentlichen Inhalts des Kapitels hin.



**Best Practice:** Dieses Symbol weist auf eine Best Practice hin. Dies kann entweder ein Unternehmen, Verband oder ein Forschungsinstitut oder eine Technologie, ein Produkt oder eine Dienstleistung sein. Die in dieser Untersuchung präsentierten Ergebnisse, Unternehmen und Technologien dienen ausschließlich als Beispiele und spiegeln keine Empfehlung, Unterstützung oder Präferenz seitens des Projektkonsortiums oder der Autoren wider. Die Auswahl dieser Beispiele erfolgte aufgrund ihrer Relevanz für die Thematik der Untersuchung. Es besteht keine Verbindung zu Dritten, die die Unabhängigkeit der Forschung oder der Ergebnisse beeinträchtigen könnte.



**Diagramm:** Dieses Symbol weist auf eine Grafik oder ein Diagramm hin.

**Hinweise zum Lesen der Broschüre:** Die vorliegende Broschüre bietet einen zusammenfassenden Überblick über die Ergebnisse des Projektes „Internationaler Benchmark Biointelligenz“ (kurz: InBenBio). Interessierte Leser\* können mit Hilfe der QR-Codes, an ausgewählten Stellen des Dokuments, direkt auf vertiefende Analysen zugreifen.

\*Das in dieser Untersuchung gewählte generische Maskulinum bezieht sich zugleich auf männliche, weibliche und andere Geschlechteridentitäten. Zur besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Alle Geschlechteridentitäten werden ausdrücklich mitgemeint, soweit die Aussagen dies erfordern.

InBenBio ist eine breit angelegte Untersuchung des Entwicklungsstands und der internationalen Positionierung Deutschlands im Kontext der biointelligenten Wertschöpfung. Präsentiert wird eine Analyse der relevanten Rahmenbedingungen, der Innovationsfähigkeit sowie der aktuellen industriellen Umsetzung im Vergleich mit zehn weiteren führenden Ländern (im Folgenden als Leitländer bezeichnet). Das Projekt wurde zwischen November 2022 und März 2024 von einem Projektkonsortium bestehend aus dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, dem Institut für Bioverfahrenstechnik der Universität Stuttgart, dem Lehrstuhl für Innovationsökonomik der Universität Hohenheim sowie der VDMA Services GmbH mit Unterstützung von acht industriellen und wissenschaftlichen Beiräten durchgeführt. Nach umfangreichen Literatur- und Patentrecherchen, Technologie- und Marktanalysen sowie einer Analyse der Forschungs- und Industrielandschaft und 79 internationalen Experteninterviews wurde der Status quo in Deutschland anhand einer eigens entwickelten Benchmark-Systematik in den internationalen Kontext eingeordnet. Darüber hinaus wurden 17 Befähigertechnologiefelder definiert und für eine Marktanalyse in insgesamt 83 Marktsegmente eingeteilt und hinsichtlich des Marktvolumens, des Marktwachstums bis 2030 und 2040 sowie des notwendigen Anfangsinvestitionsvolumens analysiert. Darüber hinaus wurden mögliche Entwicklungspfade für die biointelligente Wertschöpfung in Deutschland bis zum Jahr 2040 skizziert.

Die Analyse zeigt, dass die Entwicklung und Etablierung von biointelligenten Wertschöpfungssystemen

ein koevolutionärer Prozess ist, der eine enge Vernetzung von Akteuren aus Wissenschaft, Industrie, Politik und Gesellschaft erfordert. Insgesamt wurden 691 Akteure mit direktem Bezug zur biointelligenten Wertschöpfung, in den Leitländern identifiziert, darunter ein signifikanter Anteil von KMU. Ein Anstieg der Anzahl der Akteure ist insbesondere seit dem Jahr 2000 zu verzeichnen. Seit diesem Zeitpunkt hat sich die Anzahl der Akteure um insgesamt 417% erhöht. Insgesamt wurden 414 Technologien, Produktionssysteme, Produkte und Dienstleistungen im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung in den Leitländern identifiziert. Davon können 259 bereits als (nahezu) biointelligent bezeichnet werden. Den größten Anteil an diesen identifizierten Technologien, Produktionssystemen, Produkten und Dienstleistungen haben die USA mit 34%. Deutschland folgt mit einem Anteil von 21% und ist in vielen Befähigertechnologiefeldern Vorreiter in der Grundlagenforschung sowie bei der Entwicklung wesentlicher Aspekte der biointelligenten Wertschöpfung. Dazu zählen Smart Greenhouse und Smart Farming, biobasierte Energieerzeugung und -speicherung sowie Bioraffinerien und Bioreaktoren. Das aktuelle Gesamtmarktvolumen von 139 Mrd. US-Dollar entspricht rund 0,24% des BIP der elf Leitländer und könnte bis 2030 verdreifacht werden. Bis 2040 könnte der Anteil der biointelligenten Wertschöpfung am BIP auf knapp 1% steigen, was deutlich über dem Gesamtwachstum der Volkswirtschaften liegt.

Im Mittelpunkt der Untersuchung stand die Analyse des Potenzials eines Landes, eine Schlüsselrolle in der biointelligenten Wertschöpfung einzunehmen. Dazu wurde eine Bewertung des Status quo vorgenommen.

Derzeit zeigt sich, dass die USA über das größte Potenzial verfügen, gefolgt von Deutschland. Deutschlands Stärke liegt in seiner diversifizierten Forschungslandschaft, insbesondere in der ausgeprägten Grundlagenforschung zur biointelligenten Wertschöpfung. Gleichzeitig ist es auch hier die Entwicklung interdisziplinärer Studiengänge und Ausbildungsberufe entscheidend, um qualifizierte Fachkräfte für die Umsetzung der biointelligenten Wertschöpfung auszubilden. Deutschland hat die Chance, seine Position durch eine geschickte Anpassung an globale Marktveränderungen und ein starkes Bewusstsein für die Bedeutung der Wertschöpfung im Konvergenzbereich weiter auszubauen. Trotz einer breiten Basis an Akteuren und Technologien in der Forschung, besteht eine deutliche Schwäche bei der Markteinführung von biointelligenten Technologien, Produkten und Dienstleistungen. Das komplexe deutsche Regulierungssystem und hohe bürokratische Hürden erschweren den Marktzugang. Dies wird in Deutschland häufig auch als Hemmnis für das Unternehmenswachstum wahrgenommen. Die vorherrschende stark institutionalisierte Finanzierungsstruktur kann die Entwicklung und den Fortschritt in neuen, risikoreichen Technologiefeldern der biointelligenten Wertschöpfung einschränken. Die befragten Experten sind sich einig, dass es in diesem hochdynamischen Umfeld entscheidend ist, das deutsche Engagement kontinuierlich zu stärken, um auch zukünftig ein Leitland der biointelligenten Wertschöpfung zu bleiben und die derzeitige Position auszubauen.

Die in dieser Untersuchung dargestellten vier Szenarien der biointelligenten Wertschöpfung bis 2040 unterscheiden zwischen einer globalen Vorreiterrolle Deutschlands bei biointelligenten Innovationen (I), einer Rolle als etablierter Anbieter mit gesicherter Position (II), einer passiven Rolle, die zu einer Schwächung der aktuellen Position führt (III) sowie einer Rolle, die sich auf die Spezialisierung in einzelnen Bereichen konzentriert (IV). Die Entwicklung und Etablierung biointelligenter Wertschöpfung wird dabei von einer Vielzahl komplexer Faktoren wie der Akzeptanz in der Gesellschaft, der Verfügbarkeit von Fachkräften, der finanziellen Unterstützung und der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten beeinflusst, die sowohl fördernd als auch hemmend wirken können. Dabei lassen sich vier Bereiche beschreiben, die

sich wie folgt auszeichnen: (I) hohe Innovationskraft und Umsetzungsorientierung, (II) hohe Umsetzungsorientierung, (III) hohe Innovationsperspektive, aber geringe Umsetzungsorientierung, (IV) weder Innovationskraft noch Umsetzungsorientierung.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Deutschland über gute Grundlagen für die Umsetzung einer biointelligenten Wertschöpfung verfügt, die es in Zukunft zu nutzen und weiterzuentwickeln gilt. Die vorliegende Untersuchung hat gezeigt, dass hierfür eine umfassende Beteiligung aller relevanten Akteure, d. h. Gesellschaft, Forschung, Industrie und Politik, aber auch (Branchen-)Verbände, Vereine, NGOs, Kommunen und weitere, erforderlich ist. Dies umfasst zum einen die Sensibilisierung aller Akteure für eine biointelligente Wertschöpfung und zum anderen den Transfer von der Forschung in die Anwendung. Um dieses Ziel zu erreichen, ist eine effektive Kommunikationsstrategie entscheidend, um alle Akteure für die Bedeutung einer biointelligenten Wertschöpfung zu sensibilisieren. Diese Strategie sollte sowohl die ökologische als auch die ökonomische Relevanz dieses Konzepts hervorheben. Die Ergebnisse zeigen auch, dass (Weiter-) Bildungs- und Qualifizierungsprogramme für die Etablierung und Umsetzung einer biointelligenten Wertschöpfung hilfreich sind. Die enge Verzahnung von Forschung und Wirtschaft, beispielsweise durch Translationszentren, bietet die Chance, innovative Ökosysteme zu schaffen. Durch den Austausch von Ideen und Know-how zwischen verschiedenen Disziplinen können Forschungsergebnisse rasch in marktfähige Produkte oder Dienstleistungen umgesetzt werden.

## EXECUTIVE SUMMARY

InBenBio is a broad-based study on the development of biointelligent value creation in Germany by comparing the relevant framework conditions, innovation capacity, and current industrial implementation with ten other leading countries (from now on referred to as lead countries). The project was carried out between November 2022 and March 2024 by a consortium consisting of the Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA, the Institute of Biochemical Engineering at the University of Stuttgart, the Chair of Innovation Economics at the University of Hohenheim, and VDMA Services GmbH, supported by an industrial and scientific advisory board consisting of eight members. Following extensive literature and patent research, technology and market analyses as well as an analysis of the research and industrial landscape and 79 international expert interviews, the status quo in Germany was placed in an international context using a benchmark system, especially developed for this analysis. In addition, 17 enabling technology fields were defined and divided into 83 market segments for a market survey and analysed in terms of market volume, market growth up to 2030 and 2040, and the necessary initial investment volume. In addition, possible development paths for biointelligent value creation in Germany until 2040 were outlined.

The analysis shows that developing and establishing biointelligent value creation systems is a co-evolutionary process that requires close networking between stakeholders from science, industry, politics, and society. A total of 691 actors with a direct link to biointelligent value creation, including a significant share of SMEs, have been identified in the lead countries. An increase in the number of stakeholders has been particularly noticeable since 2000. Since then, the number of actors

has increased by 417%. 414 technologies, production systems, and services in the field of biointelligent value creation were identified in the lead countries. 259 of them can already be described as (almost) biointelligent. The USA has the largest share of the identified technologies, production systems, products, and services, with 34%. Germany follows with a share of 21%. The country is a pioneer in basic research and in the development of key aspects of biointelligent value creation in many enabling technology areas. These include smart greenhouses and smart farming, bio-based energy production and storage, and biorefineries and bioreactors. The current market volume of 139 billion USD represents 0.24% of the GDP of the eleven lead countries and could triple by 2030. By 2040, biointelligence could account for almost 1% of GDP, significantly outpacing overall economic growth.

The study focused on analysing the potential of a country to play a key role in biointelligent value creation. To this end, the status quo was assessed. It is currently apparent that the USA has the greatest potential, followed by Germany. The country's strength lies in its diversified research landscape, particularly in its distinctive basic research into biointelligent value creation. At the same time, the development of interdisciplinary study programmes and training occupations is also crucial here in order to train qualified specialists for the implementation of biointelligent value creation. Germany can expand its position further through skilful adaptation to global market changes and a strong awareness of the importance of value creation in the convergence sector. Despite a broad base of players and technologies in research, there is a clear weakness in the market launch of biointelligent technologies, products, and services. The complex German regulatory

system and high bureaucratic hurdles make market access difficult. This is often perceived as an obstacle to company growth in Germany. The prevailing highly institutionalised financing structure can restrict development and progress in new, high-risk technology fields of biointelligent value creation. The experts agree that in this highly dynamic environment, it is crucial to continuously strengthen Germany's commitment to remain a leading country in biointelligent value creation and expand its current position.

The four development paths of biointelligent value creation until 2040 presented in this study distinguish between a global pioneering role of Germany in biointelligent innovations (I), a role as an established provider with a secure position (II), a passive role that leads to a weakening of the current position (III), and a role that focuses on specialization in individual areas (IV). Developing and establishing biointelligent value creation is influenced by a variety of complex factors, such as social acceptance, availability of skilled labour, financial support, research and development activities, and others, which can have both facilitating and inhibiting effects. Four areas can be described: (I) is characterized by high innovativeness and implementation orientation, (II) by high implementation orientation, (IV) by high innovativeness but low implementation orientation, and (III) has none of these characteristics.

To summarize, Germany has a sound basis for implementing biointelligent value creation, which must be used and further developed in the future. This study has shown that this requires the comprehensive involvement of all relevant stakeholders, i. e., society, research, industry, and politics, but also (industry) associations, organizations, NGOs, local authorities, and others. This includes, on the one hand, sensitizing all stakeholders to biointelligent value creation and, on the other hand, the transfer from research to application. To achieve this goal, an effective communication strategy is crucial to sensitize all stakeholders to the importance of biointelligent value creation. This strategy should emphasize both the ecological and economic relevance of this concept. The results also show that (further) training and qualification programmes are helpful for the establishment and implementation

of biointelligent value creation. The close integration of research and industry, for example, through translation centres, offers the opportunity to establish innovative ecosystems. Through the exchange of ideas and expertise between different disciplines, research results can be quickly translated into viable products or services.

# 1. EINLEITUNG

# EINLEITUNG

## Nachhaltige Wertschöpfung als zentrales Ziel

Die zukunftsfähige Gestaltung der industriellen Wertschöpfung ist für Unternehmen eine der größten Herausforderungen unserer Zeit. Verantwortlich hierfür sind vielfältige, äußerst komplexe Veränderungen ökonomischer, ökologischer und sozialer Faktoren, die teilweise voneinander abhängig sind und sich gegenseitig verstärken können. Neben bereits überschrittenen planetaren Grenzen<sup>1</sup> und der kontinuierlichen Steigerung des Ressourcenverbrauchs<sup>2</sup>, führen die rasante Entwicklung neuartiger Technologien<sup>3</sup>, der zunehmende Wettbewerbsdruck aus Schwellen- und Entwicklungsländern sowie die Zunahme von Handelshemmnissen und globalen Regularien zu einem steigenden Transformationsdruck in produzierenden Unternehmen. Dieser wird in Deutschland und Europa zusätzlich verstärkt durch einen bereits jetzt erkennbaren und sich in Zukunft noch verstärkenden Fachkräftemangel und den zunehmenden Generationenkonflikt, der sich jüngst anhand vielfältiger polarisierender Tendenzen<sup>4</sup> bemerkbar macht (1-3).

## Eine neue Dimension der Hochtechnologie

Um sich auch in Zukunft in diesem herausfordernden Umfeld wirtschaftlich erfolgreich betätigen zu können, ist ein grundlegender Wandel im Denken und Handeln von Unternehmen sowie eine umfassende Erweiterung ihrer Kompetenzen im Bereich der Hochtechnologie unvermeidlich. Nicht erst seit dem unmittelbaren Erfolg von sogenannten Deep-Learning-Algorithmen, wie ChatGPT, gelten Hochtechnologiefirmen<sup>5</sup> als Treiber der technologischen Transformation. Mehr und mehr werden dabei die Prinzipien der Natur einbezogen (4). Eine derartige „Bio-Revolution“, geprägt durch die Anwendung von Gestaltungsprinzipien der

Natur sowie die Nutzung und Effektivierung ihrer Produktionskapazitäten, wird heute von weltweit nahezu allen großen Forschungsinstitutionen und Beratungshäusern als entscheidender Innovationspfad für eine nachhaltige Gestaltung der Wertschöpfung gesehen (5).

## Technologische Paradigmen als Treiber der zyklischen ökonomischen Erneuerung

Neue Technologien haben das Potenzial einen sozio-technischen Paradigmenwechsel einzuleiten, der Arbeitsweisen, Kommunikationsmuster und Interaktionsformen von Volkswirtschaften grundlegend verändern kann. Oft werden diese Wechsel von Paradigmen, benannt nach ihrem Entdecker, als Kondratieff-Zyklen bezeichnet. Bislang besteht Konsens über fünf bereits erfolgte Zyklen, die einer zunehmenden Frequenz unterliegen. Der gegenwärtige fünfte Zyklus basiert maßgeblich auf der Informationstechnologie und der Vernetzung von Wertschöpfungsakteuren (Industrie 4.0). Seit einigen Jahren prognostizieren verschiedene Autoren einen sechsten Zyklus, der durch die Konvergenz vormals getrennter Technologiebereiche und der Verbreitung selbstregulierender Systeme angetrieben wird (6). Dieser Zyklus wird aller Voraussicht nach zwischen den 2020er und den 2040er Jahren seine volle Wirkung entfalten und wesentlich durch das gestiegene Nachhaltigkeitsbedürfnis und die Fortschritte in der Gesundheitstechnik ausgelöst werden. Seine Auswirkungen werden jedoch wesentlich weitreichender sein und nahezu alle Bereiche des menschlichen Lebens tiefgreifend verändern.

## Biointelligenz als Konvergenz von Bio-, Hard- und Software

Als unerlässlicher Baustein der Etablierung nachhaltiger Wertschöpfung wurde vor etwas mehr als fünf

Jahren das Konzept der Biointelligenz ins Leben gerufen (7, 8). Grundlegend hierfür ist jene Technologiekonvergenz, die sich bereits seit geraumer Zeit in verschiedenen Branchen abzeichnet. An der Schnittstelle zwischen Produktion und Informatik haben sich in den letzten Jahren und Jahrzehnten neue Bereiche und Disziplinen wie Mechatronik, technische

Kybernetik und angewandte Datenwissenschaft entwickelt. Cloud-Computing, Industrial Internet of Things (IIoT) und Big Data Analytics ebneten den Weg für cyber-physische Systeme (CPS) zunächst in der Stückgutfertigung und zunehmend auch in der Verfahrenstechnik wie der Beschichtungstechnik und neuerdings in der Nanotechnologie. Gleichzeitig

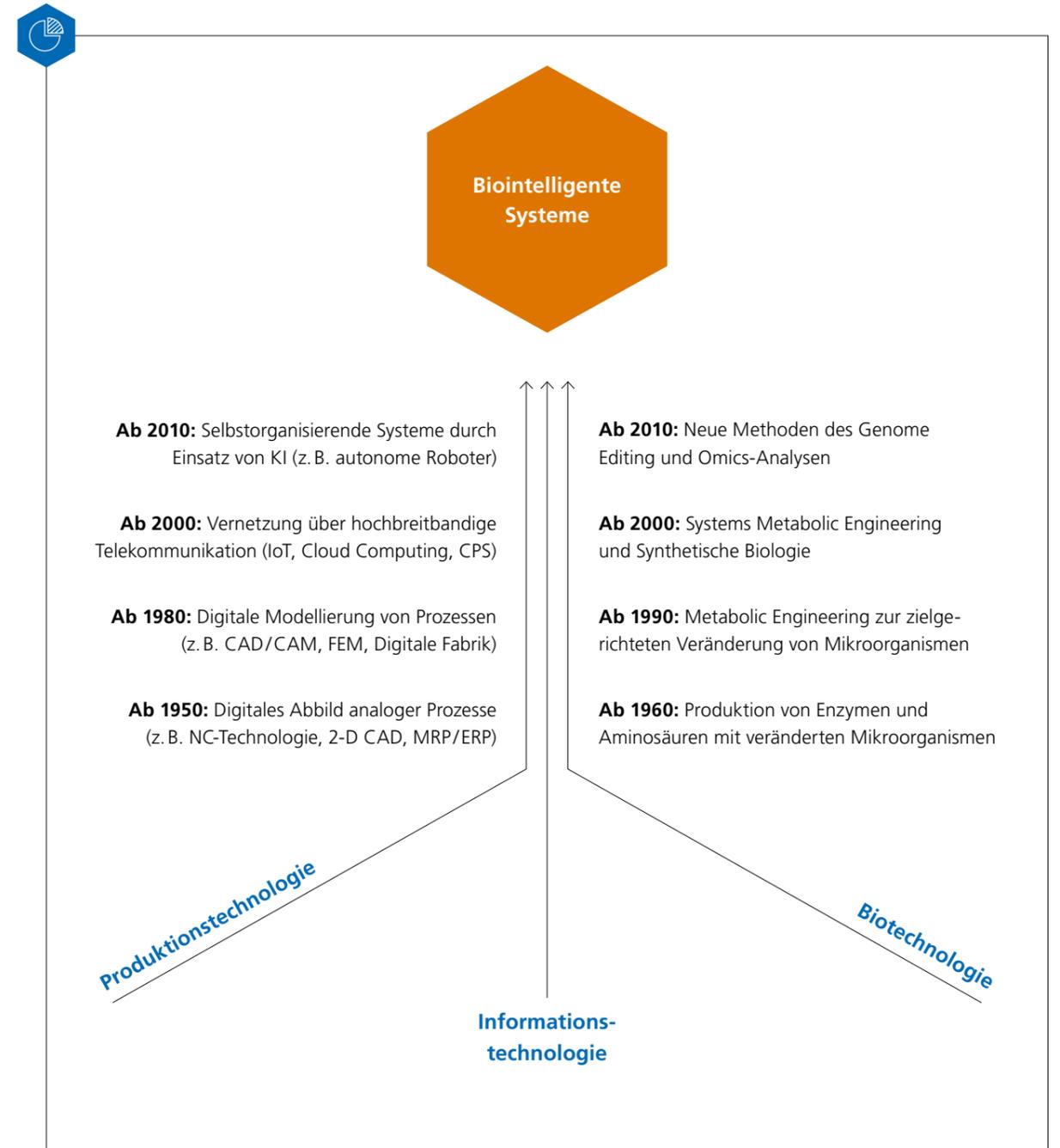


Abbildung 1: Technologiekonvergenz als Basis biointelligenter Systeme in Anlehnung an Mieke et al (9).

leistete die Informationswissenschaft einen enormen Beitrag zur Entwicklung der modernen Biotechnologie im Hinblick auf Simulationen, um Daten aus biotechnologischen Systemen zu verstehen. Nach dem Aufkommen dieser Innovationen, meist an der Schnittstelle zweier Disziplinen, besteht jetzt eine der größten Herausforderungen darin, digitalisierte Produktionstechnologien und Biotechnologien miteinander zu kombinieren, um biointelligente Systeme zu schaffen (Abbildung 1).

Die Biointelligenz als Konvergenz von Bio-, Hard- und Software ist verwandt mit Ansätzen wie dem Biomufacturing, der Bioproduktion, dem Bioengineering oder der Bioökonomie. Sie stellt durch ihren strengen Fokus auf die trilaterale Zusammenführung von Lebens-, Ingenieur- und Informationswissenschaften aber einen eigenständigen Innovationspfad dar und ist damit in erster Linie eine Ausprägung der aus dem englischsprachigen Raum bekannten „Converging Technologies“ bzw. „BioConvergence“ bzw. „BioDigital-Convergence“. Eine klare Abgrenzung der Begriffe und Ansätze wird im Glossar vorgenommen.

#### Von der Machbarkeit zur Nutzenzentrierung

Das Nachhaltigkeitskonzept zielt im Wesentlichen auf eine gerechte Verteilung von Möglichkeiten zur Bedürfnisbefriedigung zwischen Menschen innerhalb einer Generation und der nachfolgenden Generationen ab (10). Dabei wird sowohl von inter- als auch von intragenerationeller Gerechtigkeit gesprochen. Die Inanspruchnahme der Umwelt erfolgt dabei in erster Linie durch die materiellen Bedürfnisse, die in die Kategorien Ernährung, Gesundheit, Konsum, Mobilität und Wohnen zusammengefasst werden können. Biointelligente Systeme haben ein erhebliches Potenzial, heute vorherrschende Produktionsmuster in diesen Bedürfnisfeldern zu verändern und mit innovativen Ansätzen zur Lösung der elementaren Herausforderungen beizutragen. Sie nutzen dabei u. a. biogene Ressourcen, die oftmals als Abfallströme vorliegen, nahezu verschwendungsfrei und vor Ort, um hochpersonalisierte Güter autonom in sogenannten Nicht-Experten-Systemen zu produzieren. Bedeutet die nachhaltige Gestaltung der Wertschöpfung eine gerechte Befriedigung der Bedürfnisse heutiger und künftiger Generationen, so reicht die bloße Ent-

wicklung derartiger Technologien alleine nicht aus. Vielmehr muss mit der Biologisierung der Technik auch eine Veränderung im Denken und Handeln in Forschung, Industrie und Politik einhergehen, dessen Ziel eine Verschiebung des Fokus von einer reinen Machbarkeits- hin zu einer Nutzenorientierung ist (11). Dies erfordert transformationsförderliche sozio-politische und institutionelle Rahmenbedingungen.

#### Die Biologische Transformation im internationalen Wettlauf

Biointelligente Wertschöpfungssysteme sind das Ergebnis aus komplexen Verflechtungen und Austauschbeziehungen zwischen verschiedenen Akteuren aus Wissenschaft, Industrie, Politik und Gesellschaft (12, 13). Technologische Entwicklungen und institutionelle sowie infrastrukturelle Veränderungen beeinflussen sich gegenseitig in einem koevolutionären Prozess. Aufgrund des Querschnittscharakters der Biointelligenz ist davon auszugehen, dass sowohl neue Industrien entstehen werden als auch bestehende Industrien durch die Entwicklungsdynamiken neue Impulse erhalten. Gleichzeitig können einzelne heute noch existierende Industrien in Zukunft durch die Biointelligenz in ihrem Bestand gefährdet werden.

Aktuell befindet sich das technologische Innovationssystem der Biointelligenz noch in der Entstehungsphase (14). Charakteristisch hierfür ist das Vorhandensein vielfältiger technologischer Möglichkeiten bei gleichzeitig geringer Vernetzung relevanter Akteure. Dieser transdisziplinäre Vernetzungsaspekt ist der wichtigste Baustein für die Entwicklung biointelligenter Systeme. Seit der Veröffentlichung des Biointelligenz-Konzepts in der BMBF geförderten Voruntersuchung BIOTRAIN, in der das Thema erstmals systematisch beschrieben wurde, sind viele weitere Studien und Untersuchungen, wie etwa die VDMA Zukunftsstudie „Biologisierung der Industrie 2035“, das Whitepaper „Biointelligent Manufacturing“ der ManuFUTURE Subplattform Biointelligent Manufacturing (BIM) oder der acatech Diskussionsreport „Materialforschung Impulsgeber Natur“ entstanden. Zudem bildeten sich weltweit verschiedene Cluster heraus. Einige Initiativen (u. a. das Kompetenzzentrum Biointelligenz e.V.) und erste Förderprogramme in Deutschland (z. B. die beiden Ausschreibungen zur „Biologisierung

der Technik“ des BMBF mit Produktions- und Materialfokus sowie das Projekt BioFusion 4.0) greifen das Thema auf. In Europa entstanden Initiativen, wie die beiden EU-HORIZON Ausschreibungen „Development of Technologies/Devices for bio-intelligent Manufacturing (RIA)“ und „Bio-intelligent Manufacturing Industries (Made in Europe Partnership)“. Vor allem in den USA, Australien, Israel, Kanada und China nimmt das Thema an Fahrt auf. Programme und Institute wie Bio-MADE, BioFabUSA, Bio-Convergence und das Chongqing Research Institute of Biointelligent Manufacturing sind nur einige Beispiele. Will Deutschland langfristig eine führende Rolle in der Biologischen Transformation einnehmen, sind umfangreiche Maßnahmen in Wissenschaft, Industrie und Politik notwendig.

#### Bedarf einer internationalen Untersuchung der biointelligenten Wertschöpfung

Die hier vorgestellte internationale Benchmark-Untersuchung fasst den aktuellen Stand der Entwicklungen biointelligenter Wertschöpfungssysteme auf internationaler Ebene zusammen. Grundlegend dafür ist die Betrachtung und Analyse der Innovationsdynamiken anhand des Konzepts der technologischen Innovationssysteme (15–17). Eine solche innovations-

systemische Perspektive ermöglicht eine ganzheitliche Analyse aller relevanten Komponenten und Akteure, der Zusammenhänge sowie der Funktionalität und (zukünftigen) Leistungsfähigkeit eines technologischen (Innovations-)Systems. Dadurch wird der Entscheidungsprozess unterstützt, der auf eine Entwicklung in eine gesellschaftlich wünschenswerte Richtung abzielt (18–20).

Konkret heißt das: Basierend auf einer umfangreichen Analyse der internationalen Forschungs- und Industrielandschaft sowie der institutionellen und finanziellen Voraussetzungen wird eine Bewertung des Entwicklungsstands in ausgewählten Leitländern präsentiert. Dabei werden wesentliche Befähigungstechnologiefelder (BTF) vorgestellt sowie Marktvolumina in 83 Segmenten kalkuliert. Durch die kontinuierliche Einbindung eines Expertenbeirats sowie zahlreiche unterschiedlich ausgerichtete Expertengespräche und -workshops werden eine breite Partizipation unterschiedlicher Interessengruppen und die Integration von Spezialkenntnissen sichergestellt. Durch den internationalen Charakter der Untersuchung und die Positionsbestimmung Deutschlands im internationalen Vergleich bietet InBenBio eine erhebliche Erweiterung und Ergänzung aktueller Untersuchungen.





Die vorliegende Broschüre bietet einen zusammenfassenden Überblick über die Ergebnisse des Projektes „Internationaler Benchmark Biointelligenz“ (kurz: InBenBio). Die Untersuchung ist in acht Kapitel gegliedert. Nach einer kurzen Einführung in **Kapitel 1** wird in **Kapitel 2** die Methodik der Untersuchung beschrieben. **Kapitel 3** diskutiert Trends und Herausforderungen in den Bedürfnisfeldern Energie, Konsum, Gesundheit, Wohnen und Ernährung, die in ihrer Dynamik den Wandel hin zu einer biointelligenten Wertschöpfung beschleunigen. **Kapitel 4** fasst die weltweiten Aktivitäten zusammen und spiegelt damit den Status quo sowohl der relevanten Akteure als auch der Befähigungstechnologiefelder der biointelligenten Wertschöpfung wider. In **Kapitel 5** werden zunächst die Ergebnisse des Benchmarks aus deutscher Perspektive dargestellt und in einen länderspezifischen Vergleich gestellt. **Kapitel 6** zeigt in einer Szenario-Vorausschau mögliche Entwicklungen bis zum Jahr 2040 auf. Sie dienen als Diskussionsgrundlage für die Frage, welche Weichen gestellt werden können, um Deutschland zur Vorreiterrolle in der biointelligenten Wertschöpfung zu verhelfen. Die Broschüre schließt in **Kapitel 7** mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick.

<sup>1</sup> Elementare Limitierungen für die langfristige Stabilität des Ökosystems bspw. Klimawandel. Von neun planetaren Grenzen sind bereits heute sechs auf kritische Weise überschritten (1).

<sup>2</sup> In den letzten 30 Jahren stieg der globale Ressourcenverbrauch um knapp 120 %, bis 2050 wird mit einer weiteren Verdopplung gerechnet (2).

<sup>3</sup> Disruptive Technologien und Innovationen sowie Regularien haben das Potenzial, bestehende Geschäftsmodelle vollständig zu verdrängen bzw. diese grundlegend zu verändern.

<sup>4</sup> U. a. die Schuld-Lösungsfrage im Kontext der ökologischen Krise, die Wohlstands-Sinn-Debatte und der Freiheit-Gerechtigkeitsdisput (3).

<sup>5</sup> Hier: Firmen, die Technologielösungen entwickeln, die auf äußerst herausfordernden wissenschaftlichen oder technischen Zusammenhängen basieren.

## 2. METHODIK

# METHODIK

Dieses Kapitel fasst die methodischen Grundlagen der Untersuchung zusammen und gibt einen Überblick über die einzelnen Arbeitsschritte. Das systematische Vorgehen lässt sich in sechs wesentliche Arbeitsschritte unterteilen, welche in *Abbildung 2* grafisch veranschaulicht sind. Die Strukturierung des Kapitels orientiert sich an dieser Gliederung.

Beginnend mit einer Instanziierung zur Definition des Analyserahmens folgt die Analyse der weltweiten Aktivitäten der biointelligenten Wertschöpfung, eine Berechnung und Bewertung von Marktvolumina für

identifizierte biointelligente Technologien, Produkte und Dienstleistungen. Abschließend erfolgt der Benchmark der weltweiten Aktivitäten sowie einer Szenario-Analyse.

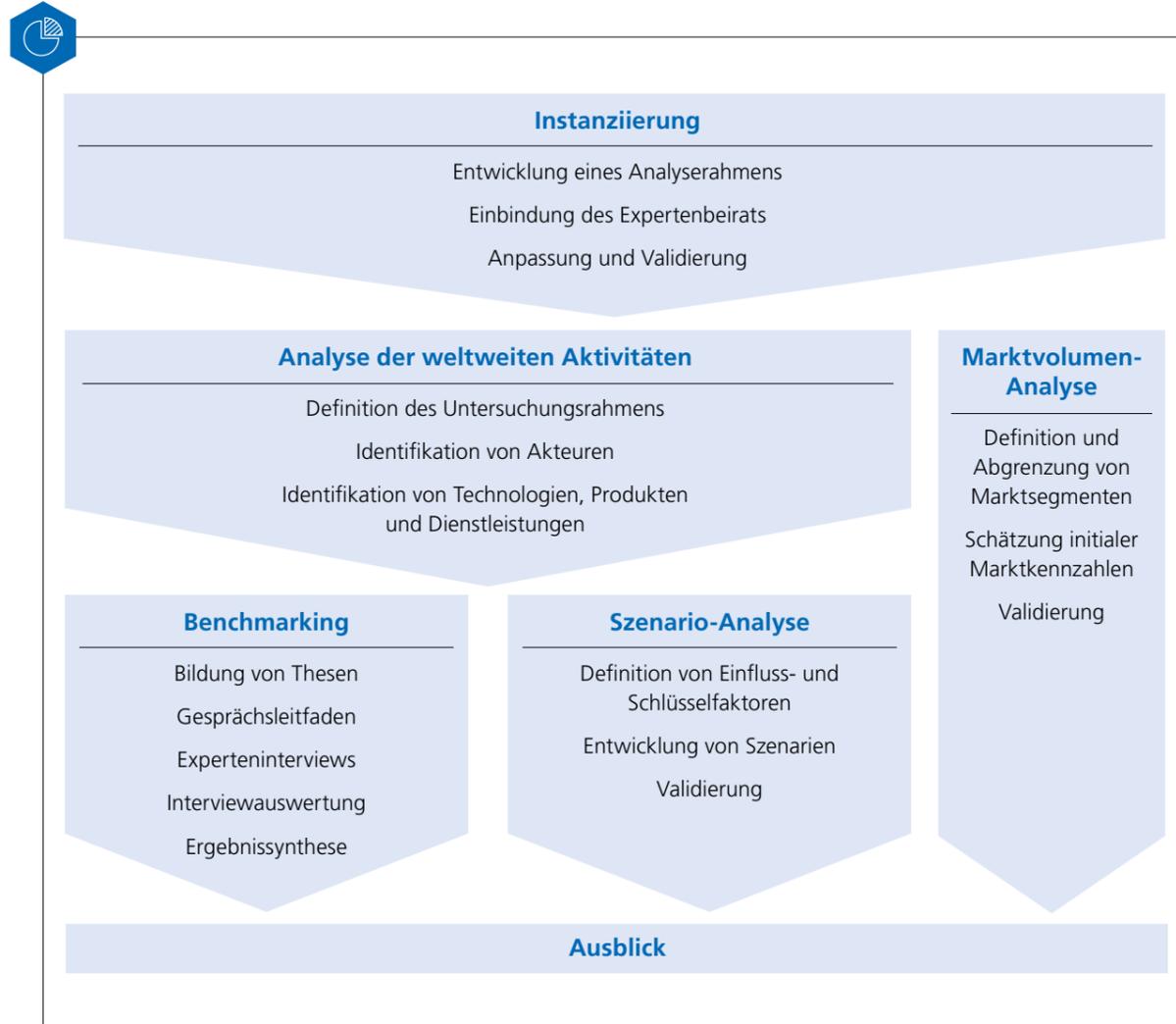


Abbildung 2: Methodische Vorgehensweise in der Untersuchung.

# INSTANZIIERUNG

## Entwicklung eines Analyserahmens für den länderspezifischen Vergleich

Die Entwicklung des Analyserahmens erfolgte in einem dreistufigen Prozess, wobei die erste Stufe einer Konzipierung und die letzten beiden Stufen der Anpassung und Validierung dienten. Im ersten Schritt wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, auf deren Basis anschließend der Analyserahmen konzipiert wurde. Im Wesentlichen orientiert sich der Analyserahmen an dem Ansatz der technologischen Innovationssysteme (15–17, 21) und Systemfunktionen (20, 22) und passt diese auf die Spezifika der biointelligenten Wertschöpfung im Sinne der in dieser Untersuchung erarbeiteten Definition an (*Abbildung 3*).



In einem Workshop wurden 14 Fokusthemenfelder identifiziert, welche die Entwicklung und Etablierung biointelligenter Wertschöpfungssysteme in einem Land beeinflussen und bei entsprechender Ausgestaltung fördern können. Die erarbeiteten Themenfelder wurden in drei Dimensionen gruppiert (*Abbildung 4*): Rahmenbedingungen, Innovationskapazität und Wertschöpfung. Die Dimension „Rahmenbedingungen“ beschreibt in erster Linie, welche Voraussetzungen ein Land mitbringt und wie sich diese entwickeln. Sie bildet somit den äußeren Rahmen für die beiden anderen Dimensionen. Diese wiederum fokussieren sich auf die generelle „Innovationskapazität“ eines Landes und die Möglichkeiten zur „Wertschöpfung“ im Konvergenzbereich, wobei beide Dimensionen eng miteinander verknüpft sind und sich gegenseitig beeinflussen. Diese Strukturierung ermöglicht die gezielte Betrachtung politischer und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen, bestehender innovationssystemischer Strukturen und konkreter

Wertschöpfungsmöglichkeiten im Konvergenzbereich. Um jedes Fokusthemenfeld quantitativ und/oder qualitativ bewerten zu können, wurden pro Themenfeld vier bis sieben relevante Indikatoren festgelegt und definiert. Die herangezogenen Indikatoren basieren auf ausgewählten öffentlich zugänglichen Datenbanken (z. B. World Bank Group, Worldwide Governance Indicators, United Nations Conference on Trade and Development), anerkannten Studien (23–25) und einschlägiger Literatur (26–34).

Eine Ergänzung und Validierung des Analyserahmens erfolgte in zwei Feedbackschleifen unter Einbindung des Expertenbeirats in interaktiven Workshops. Dieses dreistufige methodische Vorgehen gewährleistet die Entwicklung eines robusten und fundierten Analyserahmens. Die Fokusthemenfelder sind für die gesamte Untersuchung und den länderspezifischen Benchmark von zentraler Bedeutung, da sie eine differenzierte Betrachtung des umfassenden Themenfelds der biointelligenten Wertschöpfung ermöglichen und im Zentrum der nachfolgenden Analyseschritte stehen. Angesichts ihrer Relevanz in dieser Untersuchung erfolgt in den folgenden Abschnitten eine eingehende Betrachtung der identifizierten Fokusthemenfelder.

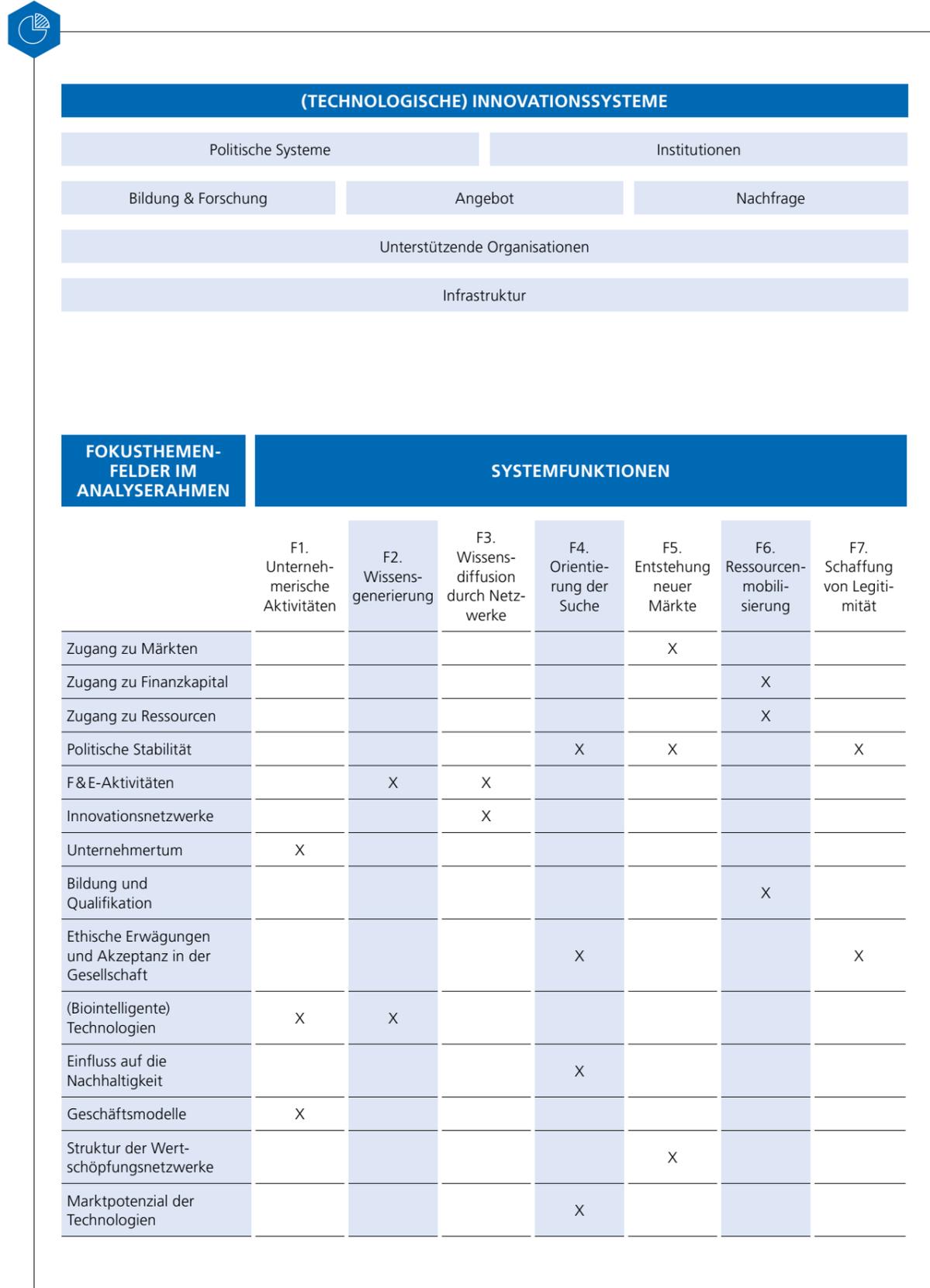


Abbildung 3: Entwicklung des Analyserahmens basierend auf dem Kontext des Benchmarks und dem Ansatz der technologischen Innovationssysteme.

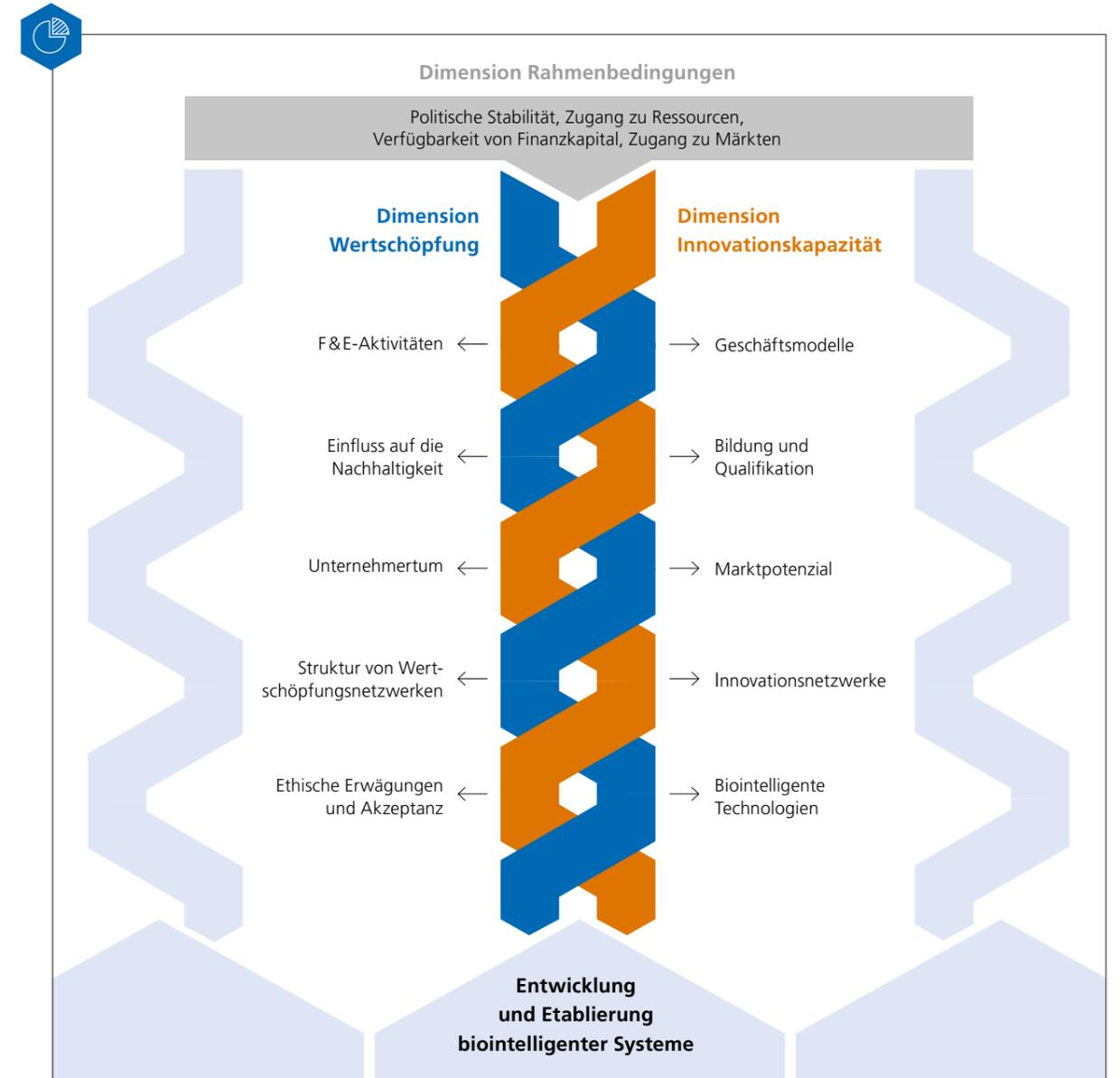


Abbildung 4: Analyserahmen für den länderspezifischen Vergleich des Potenzials biointelligenter Wertschöpfung bestehend aus 14 Fokusthemenfeldern in drei Dimensionen.

### Dimension 1: Rahmenbedingungen

Die Dimension „Rahmenbedingungen“ umfasst vier Fokusthemenfelder, die sich mit den wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen eines Landes beschäftigen:

**Zugang zu Märkten.** Der Zugang zu Märkten ist für Unternehmen von großer Bedeutung. Die Etablierung einer biointelligenten Wertschöpfung besitzt das Potenzial, das Wettbewerbsumfeld von Unternehmen nachhaltig zu transformieren. Dieser Wandel könnte

erhebliche Auswirkungen auf die vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsprozesse haben. Für eine erfolgreiche Etablierung neuer Technologien, Produkte und Dienstleistungen sowie die langfristige Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen und Staaten ist nicht nur ein umfassender Zugang zu Absatzmärkten, sondern auch ein Zugang zu Beschaffungsmärkten entscheidend. Da neue Technologien und Produkte häufig Schwierigkeiten haben, mit bestehenden eingebetteten Technologien und Produkte zu konkurrieren, ist die Entstehung neuer Märkte,

bspw. durch Steuervergünstigungen oder neue (Umwelt-)Normen, ebenfalls entscheidend (20).

**Verfügbarkeit von Finanzkapital.** Für die Forschung und Entwicklung sowie die Etablierung einer biointelligenten Wertschöpfung im Rahmen von Technologieentwicklung, einer Umgestaltung von Wertschöpfungsketten oder Geschäftsmodellinnovationen, ist der Zugang zu finanziellen Ressourcen, u. a. in Form von Risikokapital, eine zentrale Prämisse. Um weitere Anreize für den Technologie- und Wissenstransfer zu schaffen, ist es neben Investitionen in Forschung und Entwicklung (F&E) wichtig, ausreichend finanzielle Mittel bspw. durch Risikokapital bereitzustellen.

**Zugang zu Ressourcen.** Bei der Etablierung einer biointelligenten Wertschöpfung können (neue) Ressourcen sowie die Energieinfrastruktur in den Fokus der Unternehmen rücken. Der Zugang zu und die Verfügbarkeit von Ressourcen ist eine wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung und Umsetzung biointelligenter Produktion. Unter physischen Ressourcen sind in diesem Zusammenhang Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe zu verstehen. Ein unzureichender Zugang zu physischen Ressourcen (auch durch Abhängigkeitsbeziehungen) kann die Innovationsfähigkeit eines Landes sowie seine Wettbewerbsfähigkeit auf globaler Ebene beeinträchtigen. Die Bewertung des Zugangs eines Landes zu physischen Ressourcen ist daher entscheidend für die Beurteilung seines Potenzials für technologische Entwicklung und Innovation.

**Politische Stabilität.** Die regulatorischen Rahmenbedingungen bestimmen den Grad sowie die Art und Weise der Umsetzung einer biointelligenten Wertschöpfung in einem Land. Dabei sind die politische und gesellschaftliche Stabilität ebenso von Bedeutung wie Gesetze, Normen und Richtlinien, die sowohl von staatlichen Gesetzgebern als auch von Nichtregierungsorganisationen (NGOs) oder Verbänden erlassen werden. Politische Maßnahmen können die normative Dimension von Innovationen maßgeblich beeinflussen, etwa im Hinblick auf die Bewältigung von Nachhaltigkeits Herausforderungen durch politische Regulationen, Subventionen, Ziele oder Anforderungen an neue technologische Lösungen.

## Dimension 2: Innovationskapazität

Die zweite Dimension „Innovationskapazität“ betrachtet die generelle Innovationsfähigkeit eines Landes:

**Forschungs- und Entwicklungs-Aktivitäten.** F&E-Aktivitäten spielen eine grundlegende Rolle bei der Entwicklung von Technologien, Produkten, Dienstleistungen und Geschäftsmodellen und tragen so zu einer biointelligenten Wertschöpfung bei. Die Generierung neuen Wissens im Rahmen von F&E-Aktivitäten und gegenseitigen Lernmechanismen sind der Kern eines jeden Innovationsprozesses und somit eine zentrale Funktion (technischer) Innovationssysteme. Die F&E-Aktivitäten erfolgen meist in enger Zusammenarbeit und Co-Entwicklung zwischen verschiedenen Akteuren. Die Schaffung neuen Wissens bildet die Grundlage für die Erschließung neuer Märkte und die Identifikation neuer Nutzer und Wertschöpfungsnetzwerke. In diesem Fokusthemenfeld spielt neben der Generierung auch die Verbreitung des technologischen Wissens eine zentrale Rolle. Dieser Prozess wird maßgeblich durch Forschungseinrichtungen sowie durch Kollaborationen in Innovationsnetzwerken vorangetrieben.

**Innovationsnetzwerke.** Innovationsnetzwerke spielen eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung und Diffusion von Wissen, indem sie die Zusammenarbeit und Interaktion zwischen verschiedenen Akteuren innerhalb eines sozioökonomischen Systems im Innovationsprozess ermöglichen (35). Im Kontext der anwendungsorientierten Forschung zur biointelligenten Wertschöpfung spielen Forschungs- und Industriernetzwerke eine herausragende Rolle. Diese Netzwerke schaffen eine Plattform für den Austausch von Wissen und Ressourcen und können so innerhalb eines Landes zu einer industriellen Symbiose beitragen. Dabei können nicht nur gewinnbringende Transaktionen erfolgen, ebenso auch geschäftliche und technische Prozesse verbessert werden.

**Unternehmertum.** Unternehmer haben im Innovationsprozess und bei der Verbreitung neuer Technologien, Produkte und Dienstleistungen eine zentrale Rolle. Sie setzen das Potenzial von neuem Wissen oder Ideen in konkrete Lösungen um, wodurch Geschäftsmöglichkeiten geschaffen und genutzt werden

und revolutionäre Technologien überhaupt erst in die Anwendung gelangen. Sowohl etablierte Unternehmen als auch neue Marktteilnehmer wie z. B. Startups ergreifen entstehende Geschäftsmöglichkeiten durch technologische Entwicklungen, indem sie neue Angebote schaffen, ihre Produkte und Dienstleistungen weiterentwickeln oder neue Märkte bedienen. Sie spielen eine entscheidende Rolle bei der Überwindung von Unsicherheiten in der frühen Entwicklungsphase und der Markteinführung neuer Technologien, Produkte und Dienstleistungen.

**Bildung und Qualifikation.** Die Umsetzung biointelligenter Wertschöpfungssysteme erfordert eine Anpassung der Fähigkeiten und Qualifikationen von Fachkräften, um die Möglichkeiten dieses interdisziplinären Feldes zu erschließen. Angesichts der Konvergenz von Lebens-, Ingenieur- und Informationswissenschaften wird die Entwicklung interdisziplinärer Kompetenzen daher immer wichtiger. Darüber hinaus beeinflusst der Bildungsstand einer Gesellschaft nicht nur die potenzielle Etablierung biointelligenter Wertschöpfung, sondern auch die Akzeptanz biointelligenter Technologien, Produkte, Dienstleistungen und Systeme.

**Ethische Erwägungen und Akzeptanz in der Gesellschaft.** Die Konvergenz von biologischen, technischen und Informationssystemen wirft Fragen zur gesellschaftlichen Akzeptanz und ethischen Verantwortung auf, insbesondere in Bezug auf Themen wie Gentechnik und Eingriffe in das Ökosystem. Zudem ist eine aufgeschlossene Bevölkerung, die bereit ist, die Unsicherheit des Innovationsprozesses zu akzeptieren und mitzutragen, für die erfolgreiche Etablierung einer biointelligenten Wertschöpfung erforderlich. Der mit einer solchen Transformation verbundene grundlegende Wandel bestehender Wertschöpfungsstrukturen kann jedoch insbesondere bei etablierten Akteuren, die von aktuellen Technologien profitieren, auf Widerstand stoßen. Dieses Fokusthemenfeld bezieht sich auf den breiten Komplex gesellschaftlicher Teilhabe und unterstreicht, dass u. a. Interessensverbände als Katalysatoren fungieren können, indem sie sich bspw. für die neuen Technologie, Produkte und Dienstleistungen, für den Einsatz von Ressourcen in deren Entwicklung und Produktion oder für günstige Steuerregelungen

einsetzen. Durch solche Lobbyaktivitäten können sie Legitimität für die neue Technologie schaffen (20).

## Dimension 3: Wertschöpfung

Die Fokusthemenfelder in der dritten Dimension „Wertschöpfung“ widmen sich den Produktionstechnologien, -prozessen und -netzwerken sowie Produkten und Dienstleistungen, die zur biointelligenten Wertschöpfung eines Landes beitragen, als auch deren Potenziale.

**(Biointelligente) Technologien.** Die biointelligente Wertschöpfung hat das Potenzial für ein neues technologisches Paradigma<sup>6</sup>, wodurch sich ein fundamental veränderter Suchraum, neue Suchheuristiken, neue Materialien und Designprinzipien ergeben. Ein biointelligentes Paradigma eröffnet neue Perspektiven für innovative Transformations- und Entwicklungspfade, insbesondere in den fünf Bedürfnisfeldern Wohnen, Energie, Ernährung, Gesundheit und Konsum. Im Zentrum der Entwicklung biointelligenter Technologien steht die nachhaltige Gestaltung von Produkten und Produktionsprozessen. Dies stellt eine weitere grundlegende Änderung der Denk- und Handlungsweisen in den Bedürfnisfeldern dar, die sich co-evolutionär mit der Entwicklung neuer Lebensstile entfaltet. Die Betrachtung biointelligenter Technologien sowie deren Entwicklung, Produktion und Diffusion stehen im Zentrum der systematischen Analyse von weltweiten Aktivitäten im Kontext der biointelligenten Wertschöpfung.

**Einfluss auf die Nachhaltigkeit.** Biointelligente Technologien, Produkte und Dienstleistungen können auf vielfältige Weise die ökologischen, ökonomischen und sozialen Nachhaltigkeitsdimensionen beeinflussen. Eine umfassende Analyse der Nachhaltigkeitswirkungen biointelligenter Technologien und Systeme erfordert eine Betrachtung der Auswirkungen entlang des gesamten Wertschöpfungsprozesses. Angesichts begrenzter Ressourcen ist es entscheidend, Schwerpunkte für Investitionen in verschiedene technologische Optionen zu setzen, da ein fehlender Fokus die Verfügbarkeit von Ressourcen für jede Option gefährden kann. Dies wird vor dem Hintergrund der dringlichen gesamtgesellschaftlichen Herausforderungen besonders relevant.

**Geschäftsmodelle.** Geeignete innovative Geschäftsmodelle ermöglichen die wirtschaftliche Nutzung der sich abzeichnenden Potenziale biointelligenter Technologien, Produkte sowie Dienstleistungen und sind daher neben der Technologie- und Produktentwicklung entscheidend für deren wirtschaftlichen Erfolg. Innovative Geschäftsmodelle vor dem Hintergrund biointelligenter Technologien ermöglichen die Erfüllung nachhaltiger und sozialer Bedürfnisse in der Gesellschaft und bei Kunden. Zu den Merkmalen innovativer Geschäftsmodelle sowie relevanter Weiterentwicklungen gehören ein angepasstes Wertversprechen, die Erschließung neuer Kundengruppen und die Verbreitung der neuen (biointelligenten) Technologie auf dem Markt. Basierend auf einer Vernetzung und Interaktion von Akteuren im Wertschöpfungsprozess entstehen neue biointelligente Dienstleistungs- und Ertragsmodelle und neue Kundengruppen können erschlossen werden.

**Struktur von Wertschöpfungsnetzwerken.** Biointelligente Technologien und Systeme, Produkte und Dienstleistungen haben das Potenzial, bestehende Wertschöpfungsnetzwerke in Richtung innovativer Systeme zu verändern, die sowohl dezentral, autonom als auch vernetzt agieren können. In diesem Kontext sind technologische Ansätze von großer Bedeutung, die die Entwicklung solcher Systeme ermöglichen. Wertschöpfungsnetzwerke sind eng mit den produktionsseitigen Komponenten eines technischen Innovationssystems verbunden, können aber ebenso durch konsumseitige Veränderungen beeinflusst werden.

**Marktpotenzial der Technologien.** Im Mittelpunkt der biointelligenten Wertschöpfung stehen die Bedürfnisse und Anforderungen der Nutzer. Dadurch ergeben sich innerhalb der fünf Bedürfnisfelder neue Marktpotenziale für biointelligente Technologien, Produkte und Dienstleistungen. Hierbei liegt der Fokus insbesondere auf der Nachhaltigkeit. Marktpotenzial-

analysen können länderspezifische Chancen im Sektor der biointelligenten Technologien aufzeigen. Dies ermöglicht es, den Einfluss der Technologien im Hinblick auf die Zukunft der Wirtschaft und einer nachhaltigen Entwicklung zu betrachten.

<sup>6</sup> Ein technologisches Paradigma kann als eine Denkweise zur Lösung technologischer Probleme verstanden werden. In diesem Sinne definiert das vorherrschende technologische Paradigma den Suchraum für Problemlösungen und neue Konzepte und Praktiken und beeinflusst damit die Richtung des technologischen Wandels (36).

<sup>7</sup> In dieser Untersuchung werden Großbritannien, Irland und Nordirland zur Vereinfachung unter dem Begriff „Vereinigtes Königreich und Irland (UK/IE)“ zusammengefasst.

# ANALYSE DER WELTWEITEN AKTIVITÄTEN

Die Analyse der weltweiten Aktivitäten im Kontext der biointelligenten Wertschöpfung beginnt mit der Definition des Untersuchungsrahmens, folgt die Identifikation wesentlicher Akteure und schließt mit der Analyse ihrer (biointelligenten) Technologien, Produkte, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle ab. Dabei liegt der Fokus auf expliziten Produktionsverfahren.

## Definition des Untersuchungsrahmens

Der Untersuchungsrahmen und die Leitländer wurden anhand der vier Fokusthemenfelder Zugang zu Märkten, Zugang zu Finanzkapital, Zugang zu Ressourcen und politische Stabilität in der Dimension Rahmenbedingungen bestimmt. Ein Leitland ist in dieser Untersuchung definiert als ein Land, das derzeit führend im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung ist. Die Auswahl der Leitländer erfolgt anhand eines auf die genannten Fokusthemenfelder gleichverteilten quantitativen Kriterienkatalogs. Die herangezogenen Indikatoren stammen aus den zuvor beschriebenen Datenbanken und Studien. Zusätzlich wurde in der Literaturdatenbank Scopus geprüft, ob in den Ländern bereits relevante Publikationen im Kontext der Biointelligenz vorliegen. Basierend auf einer Rangfolge, die sich aus den Teilergebnissen des Kriterienkatalogs und den Ergebnissen der Literaturrecherche ergibt, wurden zehn Leitländer festgelegt. Der Untersuchungsrahmen des Benchmarks umfasst die Analyse und Bewertung der Aktivitäten Deutschlands im Vergleich zu den zehn Ländern Australien, China, Finnland, das Vereinigte Königreich und Irland<sup>7</sup>, Israel, Kanada, Niederlande, Norwegen, Schweden sowie den USA. Durch die Fokussierung auf diese zehn Länder wird eine gezielte und aussagekräftige Vergleichsbasis geschaffen, die es erlaubt, die Position Deutschlands klar aufzuzeigen.

## Identifikation von weltweiten Akteuren

Grundlegend für die Realisierung einer biointelligenten Wertschöpfung sind die Leistungen von Unternehmen, Forschungsinstituten und Universitäten. Zur Abbildung eines weltweiten Vergleichs wurde eine systematische Akteursrecherche im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung sowie verwandte Themenfelder in den Leitländern durchgeführt. Hierfür wurde die Unter-

nehmensdatenbank delphai genutzt, die Informationen aus unterschiedlichen Quellen (Nachrichten, Finanzberichte, Investorenportfolios, Patente und mehr) mittels Natural Language Processing zusammenführt und aus einer Vielzahl von Sprachen ins Englische übersetzt. Dies ermöglicht eine umfassende internationale und gleichzeitig effiziente Recherche nach Unternehmen, die spezifische Technologien anbieten oder anwenden. Es wurden jeweils Suchbefehle für die fünf Bedürfnisfelder Gesundheit, Konsum, Energie, Wohnen und Ernährung sowie technologiespezifische Suchbefehle analog zur Technologierecherche entwickelt. Die identifizierten Akteure wurden hinsichtlich ihrer Branche, ihres Gründungsjahrs und der Unternehmensgröße analysiert. Die Einteilung der Unternehmen erfolgte nach der Anzahl der Mitarbeitenden (MA) in Anlehnung an die KMU-Definition der Europäischen Kommission (37). Unternehmen, die nicht älter als fünf Jahre sind, d. h. deren Gründungsjahr nicht vor 2018 liegt, werden als Startup bezeichnet (38). Die Betrachtung des Unternehmenssitzes bzw. weiterer Standorte von Akteuren ermöglichte die Identifikation von Clusterregionen innerhalb der Leitländer, in denen sich konzentriert Akteure ansiedeln und potenzielle Wertschöpfungsnetzwerke ausbilden.

## Identifikation und Bewertung von biointelligenten Technologien, Produkten und Dienstleistungen

Um den Umfang der technologischen Basis eines Leitlandes zu bestimmen, wurden mehrere Einzelrecherchen durchgeführt. Ziel war es, ein möglichst vollständiges Bild von Anzahl und Reife biointelligenter Technologien, Produkten und Dienstleistungen zu zeichnen. Dazu wurden neben Unternehmenswebseiten und -datenbanken auch Veröffentlichungen und Patentanmeldungen analysiert. Als Ausgangsbasis

dienten 17 initial definierte BTF der biointelligenten Wertschöpfung.

Die Unternehmensdatenbank delphai wurde zur Identifikation der Technologiebasis, die in Unternehmen bereits vorliegt, d.h. nahe am Markt sind, genutzt. Die durchgeführte Literaturrecherche diente der Identifikation von Technologien und -feldern in denen zeitnah mit technologischen Durchbrüchen zu rechnen ist. Die Literaturrecherche erfolgte mittels Web of Science Core Collection. Untersucht wurden wissenschaftliche Veröffentlichungen ab dem Jahr 1950 bis 2022 in englischer Sprache. Um die Ergebnisse weiter zu detaillieren, erfolgte eine Analyse des Herkunftslandes des Hauptautors, der Co-Autoren sowie eine Untersuchung des beschriebenen Anwendungsfalls im Hinblick auf die Produktionsnähe. Für das Jahr 2023 wurde die Anzahl der Veröffentlichungen anhand von Trendanalysen prognostiziert. Zur systematischen Erfassung von Technologien, die auf dem Sprung in die industrielle Anwendung sind, wurde eine Patentrecherche über die globale Patentdatenbank PatBase durchgeführt. Die definierten Suchstrings orientierten sich an denen der Literaturrecherche. Betrachtet wurden alle Patente bis zum Jahr 2021. Die Suche erfolgte in Kombination mit den relevanten, international definierten Patentklassen nach IPC (International Patent Classification) und CPC (Cooperative Patent Classification). Allgemein ist bei der Patentrecherche zu beachten, dass Patentanmeldungen international in der Regel erst nach Ablauf von 18 Monaten veröffentlicht werden und erst ab diesem Zeitpunkt von den Patentämtern offengelegt werden. Erst dann können sie von den Patentdatenbanken wie PatBase aufgenommen werden. Folglich gibt es für 2022 und folgende Jahre aktuell noch keine verlässlichen Daten zu Patentanmeldungen und -bewilligungen. Alle patentdaten-basierten Aussagen in dieser Untersuchung sind somit zwangsläufig datenbedingt nur bis einschließlich 2021 aussagekräftig.

Im Anschluss an die Technologie- und Produktsammlung erfolgte die Bewertung des Biointelligenz- und Produktionsgrads jeder Einzeltechnologie anhand von drei Skalen. Die Biointelligenzskala umfasst fünf Stufen, die durch die Erfüllung bestimmter Kriterien gekennzeichnet sind. Tabelle 1 fasst die Stufen der Skala

zusammen. Ab Stufe 4 ist in dieser Untersuchung eine Technologie als biointelligent definiert.

Stufe	Beschreibung
1	Konvergenz aus Ingenieur-, Informationswissenschaft und Wissen aus der Biologie.
2	Konvergenz aus Ingenieur- und Biowissenschaften mit einer (nicht digitale) Interaktion.
3	Konvergenz aus Ingenieur- und Biowissenschaften inkl. einer Informationsaufnahme sowie darauf basierenden Steuerung, ohne Informationsanalyse.
4	Konvergenz aus Ingenieur- und Biowissenschaften sowie Informationsaufnahme/-eingabe und Informationsanalyse durch KI oder Regelung mit dem Ziel eines autonomen Systemverhaltens.
5	Konvergenz aus Ingenieur- und Biowissenschaften sowie Informationsaufnahme/-eingabe und Informationsanalyse durch KI oder Regelung mit dem Ziel eines autonomen Systemverhaltens. Es besteht das Potenzial, zur Nachhaltigkeit (ökologische, ökonomische und soziale Aspekte) beizutragen.

Tabelle 1: Beschreibung der Biointelligenzskala.

Die definierte Produktionsskala ordnet die Technologien nach ihrer Nähe zu einem Produktionssystem auf einer dreistufigen Skala ein:

- Ebene 1: serviceorientierte Technologie
- Ebene 2: Technologie ist produktionsverwandt/ unterstützt bei der Produktion
- Ebene 3: Produktionstechnologie

Die Bewertung des Technologiereifegrades (TRL) folgte der Grundsatzdefinition der Europäischen Kommission (39). Zusätzlich wurden die Technologien einem oder mehrerer Bedürfnisfelder, in denen sie potenziell angewandt werden können, sowie mindestens einem Applikationsbeispiel zugeordnet.

# ANALYSE VON MARKTVOLUMEN

Zur Quantifizierung des Markt- und Investitionsvolumens für biointelligente Technologien, Produkte und Dienstleistungen und zur Abschätzung von Marktwachstumsraten bis zum Jahr 2040 in verschiedenen Marktsegmenten wurde ein dreistufiger Ansatz verfolgt.

Ein Marktsegment ist definiert als der Teilbereich eines relevanten Marktes, auf dem eine bestimmte (biointelligente) Technologie oder ein bestimmtes (biointelligentes) Produkt oder eine Dienstleistung angeboten wird und auf spezifische Kundengruppen und Kundentypen als Nachfragende trifft.

Auf Basis der oben identifizierten 17 BTF wurden in einem ersten Schritt im Rahmen einer Expertendiskussion drei bis sechs Teilmärkte pro BTF definiert. Im nächsten Schritt wurden für diese Marktsegmente das aktuelle Marktvolumen und das jährliche Wachstum bis 2030 bzw. 2040 abgeschätzt, wobei die erste

Abschätzung mit Hilfe der webbasierten KI-Anwendung ChatGPT erfolgte. Diese ersten Schätzungen wurden in einem weiteren Schritt durch eine umfassende Analyse repräsentativer Marktstudien validiert. Zur Sicherstellung der Belastbarkeit erfolgte in einem dritten Schritt eine weitere Evaluierung der ermittelten Marktvolumina und Wachstumsraten durch ein Sounding Board, bestehend aus einschlägigen Experten. Die quantitative Analyse der erforderlichen Investitionsvolumina je BTF wird zudem durch qualitative Beschreibungen der notwendigen Investitionen ergänzt, welche auf der Auswertung von Experteninterviews und ergänzenden Literaturrecherchen basieren.



# BENCHMARKING

Das Ziel des Benchmarks ist die Konkretisierung der derzeitigen Aktivitäten Deutschlands in der biointelligenten Wertschöpfung sowie die Einordnung in den internationalen Kontext. Das eigens für den Benchmark entwickelte Konzept basiert auf einem komplexen Auswertungsalgorithmus für eine große Anzahl durchgeführter Experteninterviews sowie deren Plausibilitätsprüfung anhand öffentlich zugänglicher Statistiken.

Um in einem ersten Schritt die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (SWOT) Deutschlands im internationalen Vergleich zu identifizieren, wurden zunächst individuell auf Fokusthemenfelder angepasste Thesen formuliert und Indikatoren identifiziert, die eine Quantifizierbarkeit ermöglichten. Die Thesen dienten als Basis für die Entwicklung eines allgemeinen Gesprächsleitfadens für die Durchführung von Experteninterviews. Hierfür wurden die Thesen in meist offene Fragen überführt. Konkret an einem Beispiel heißt das: Aus der These „Deutschland investiert im Kontext einer biointelligenten Wertschöpfung viel Geld in F&E“ ergibt sich die allgemeingültige Frage „Wie schätzen Sie den Umfang nationaler Forschungsförderung mit Bezug zu Biointelligenz ein?“. Die Beantwortung dieser Frage unterstützt bei der Bewertung von Indikatoren im Fokusthemenfeld „Zugang zu Finanzkapital“. Darauf aufbauend wurden 79 persönliche Interviews mit hochrangigen nationalen und internationalen Experten aus Forschung, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft in den zuvor identifizierten Leitländern durchgeführt. In den 60- bis 90-minütigen Interviews wurden entsprechend der jeweiligen Expertise ausgewählte Fokusthemenfelder diskutiert. Fokusthemenfelder, die in den durchgeführten Interviews unterrepräsentiert waren, wur-

den durch eine umfassende Analyse fachspezifischer Datenbanken mit relevanten Informationen angereichert. Anschließend wurden die Ergebnisse der Interviews ausgewertet und transformiert. Um sämtliche Einzelaussagen der befragten Personen für die nachfolgende Ergebnissynthese aufzubereiten, wurden alle qualitativen Ergebnisse der Interviews mittels einer Skala in einen quantitativen Wert umgewandelt. Dies ermöglichte eine Aggregation der Erkenntnisse unterschiedlicher Interviews zu länderspezifischen Einschätzungen je Frage.

Die in den Interviews gesammelten Einschätzungen ermöglichten es, den Status quo eines Leitlands aus Sicht der befragten Experten abzubilden. Die Synthese der Ergebnisse erfolgte in Form eines Biointelligenz-Werts zwischen 0 und 1. Der Wert beschreibt das Potenzial eines Landes, eine zukünftige Schlüsselrolle einzunehmen. Dazu wurden relevante Rahmenbedingungen, die Innovationsfähigkeit eines Landes sowie die derzeitige Umsetzung einer biointelligenten Wertschöpfung analysiert. Je höher der Wert, desto höher die Potenzial, dass das betreffende Land eine Schlüsselrolle im Kontext der biointelligenten Wertschöpfung einnehmen wird. Als Grundlage für die Bewertung je Leitland dienten die quantitativen Indikatoren je Fokusthemenfeld. Dabei erhielten die einem Fokusthemenfeld zugeordneten Indikatoren eine Gewichtung. Diese wurde mittels einer Umfrage im Industrie- und Expertenbeirat definiert. Die Summe aller Gewichtungen pro Fokusthemenfeld ergibt 1. Um die Aussagekraft der Ergebnisse je Land zu stärken, wurde ein Konfidenz-Niveau eingeführt. Es gibt das Verhältnis von Expertenaussagen und Datenbankinformationen an, die in die Ergebnisse eingeflossen sind.

# SZENARIOTECHNIK

Der durch den Benchmark dargelegte Status quo der biointelligenten Wertschöpfung ist eine fundierte Momentaufnahme. Es ist zu erwarten, dass die künftige Entwicklung von hoher Volatilität geprägt ist und von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängt. Fraglich ist daher, wie sich die biointelligente Wertschöpfung in Deutschland (mit Betrachtungen möglicher Einflüsse aus Europa und den Leitmärkten) bis 2040 entwickeln könnte. Für die Beantwortung dieser Frage wurde die Methodik der Szenariotechnik nach Gerschka und Reibnitz angewendet (40).

Entscheidend für die Methode ist vor allem eine Erkenntnis: Die Zukunft ist nicht vorhersehbar und daher multipel. Bildlich orientiert sich das Konzept der Szenariotechnik an einem Trichter (Abbildung 5). Für die nahe Zukunft sind Situationen noch gut einzuschätzen, bestimmte Einflussfaktoren können sich in überschaubare Richtungen entwickeln. Je weiter die Zukunft jedoch entfernt ist, umso mehr mögliche Entwicklungen sind denkbar – der Trichter öffnet sich. Dies bedeutet auch, dass Komplexität und Unsicherheit zunehmen. Die Szenarien liegen innerhalb des entstehenden Lösungsraums: Von den Extrempunkten (worst and best case) an den Seiten über die wahrscheinlicheren, in der Mitte liegenden Entwicklungen. Statt die Zukunft aus dieser Unsicherheit heraus zu prognostizieren, arbeitet die Szenariotechnik mit alternativen Zukunftsbildern, den Szenarien. Ziel ist es, die denkbaren Entwicklungen bis zu einem bestimmten Zeitpunkt (hier: 2040) möglichst umfassend abzubilden – und zwar unabhängig von ihrer derzeit denkbaren Wahrscheinlichkeit. Dabei hat keines der Szenarien den Anspruch, vollumfänglich zuzutreffen. Doch lassen sich Faktoren und Einflüsse erkennen, die in verschiedenen Szenarien relevant sind. Somit können wiederum Strategien und Leitlinien zum

Umgang mit der ungewissen Zukunft abgeleitet werden (41). Akteure einer biointelligenten Wertschöpfung können sich entsprechend ausrichten und handeln.

Die Szenarioanalyse beginnt mit der Identifikation von Einflussfaktoren. Für die hier dargestellte Erhebung zur biointelligenten Wertschöpfung war die Frage, welche Faktoren die (Entwicklung der) biointelligente Wertschöpfung in Deutschland (mit Einfluss durch Entwicklungen in Europa und anderen Leitländern) beeinflussen. Hierfür konnte auf die bereits identifizierten Fokusthemenfelder zurückgegriffen werden. Anschließend galt es, den Ist-Zustand als Ausgangsbild zu erfassen. Für diese Untersuchung mit ihrem Fokus auf Deutschland wurde je Einflussfaktor der derzeitige Stand der biointelligenten Wertschöpfung in Deutschland abgebildet. Die derzeitige Betrachtung für Deutschland wurde aus den Ergebnissen des Benchmarkings gewonnen. Um die denkbaren Entwicklungen bis 2040 für jeden Einflussfaktor abzubilden, wurden für jeden einzelnen Faktor trennscharfe und präzise Annahmen definiert, um eine spätere Differenzierung zu ermöglichen und die erfasste Vielfalt möglicher Zukünfte zu erhöhen. Die Frage ist demnach, wie sich der heute dargestellte Einflussfaktor X mit Blick auf eine biointelligente Wertschöpfung im Jahr 2040 entwickelt haben könnte. Kreativität und Praxisnähe sind hier besonders wichtig. Die Annahmen wurden daher durch Einbindung des Expertenbeirats und des Projektkonsortiums entwickelt. Unter der genannten Fragestellung wurden pro Einflussfaktor drei bis fünf Annahmen, die teilweise Bezüge zur EU oder anderen Leitländern aufwiesen, definiert.

In der Folge wurden die Einflussfaktoren auf ihre Trennschärfe und Nachvollziehbarkeit überprüft. Ab-

grenzungen wurden präzisiert und ggf. neue Annahmen ergänzt, um Betrachtungslücken zu schließen. Im Anschluss erfolgte eine Konsistenzanalyse. Mithilfe einer Matrix wurden sämtlichen Annahmen aller Einflussfaktoren einander gegenübergestellt und auf ihre Passfähigkeit überprüft. Die Frage war demnach, ob es vorstellbar ist, dass die jeweils betrachteten Annahmen gemeinsam auftreten können (40). Die

Annahmen einzelner Faktoren mit der größten Passfähigkeit wurden miteinander kombiniert – es bildeten sich die Szenarien. Diese Zukunftsbilder wurden anschließend vom Expertenbeirat nochmals auf ihre Praxistauglichkeit geprüft, gegebenenfalls angepasst und schriftlich finalisiert. Hierbei war es besonders wichtig, schlüssige und nachvollziehbare Zukunftsbilder zu zeichnen.

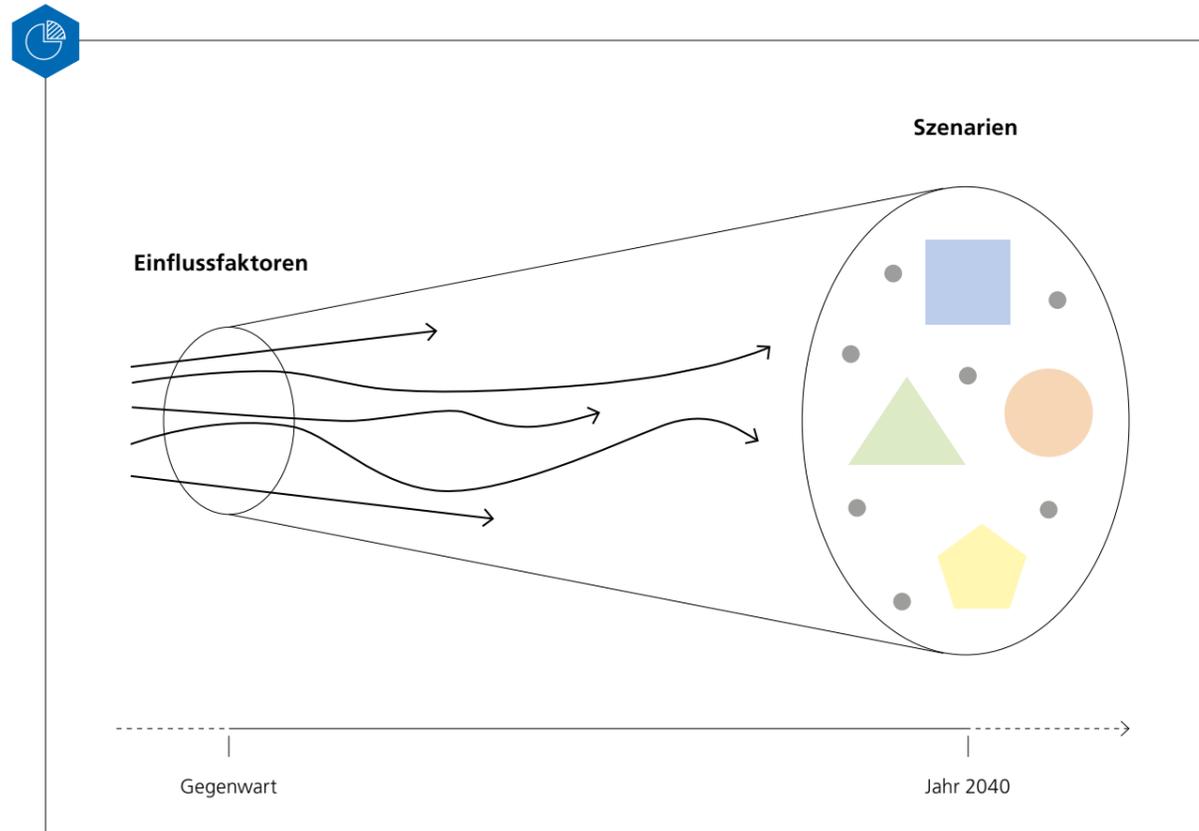


Abbildung 5: Methode der Szenariotechnik – von den Einflussfaktoren zu konsistenten Szenarien.

### 3. AKTUELLE TRENDS UND HERAUSFORDERUNGEN

# AKTUELLE TRENDS UND HERAUSFORDERUNGEN

Dieses Kapitel betrachtet aktuelle Trends und Herausforderungen innerhalb der fünf menschlichen Bedürfnisfelder Konsum, Energie, Wohnen, Gesundheit und Ernährung, die für die Biointelligenz von besonderer Relevanz sind.

Die biointelligente Wertschöpfung eröffnet große Potenziale für eine Transformation hin zu einer nachhaltigen, zirkulären Wirtschaftsweise. Jedoch ist es entscheidend zu verstehen, dass der technologische Fortschritt alleine nicht ausreicht, um die aktuellen globalen Herausforderungen zu lösen. Die Realität der massiven Umweltrisiken und die Dringlichkeit der sozialen Probleme verlangen wesentliche Veränderungen der vorherrschenden Produktions- und Konsummuster (42). Eine umfassende gesellschaftliche Transformation erfolgt daher entlang grundlegender Veränderungen in den zentralen menschlichen Bedürfnisfeldern. Diese Veränderungen betreffen die Art und Weise, wie wir produzieren und konsumieren, angefangen bei der Energienutzung über Bau und Wohnen bis hin zu Gesundheit, Ernährung und dem Konsum täglicher Gebrauchsgüter.

Die Veränderungen auf der gesamtgesellschaftlichen Ebene sind dabei mit denen auf der individuellen Ebene verknüpft. Gesetzliche Maßnahmen und gesellschaftliche Trends beeinflussen individuelle Entscheidungen. Bspw. führt die allgemein zunehmende Sorge um den Klimawandel zu einer verstärkten Nachfrage nach nachhaltigen und umweltfreundlichen Produkten. Gleichzeitig können individuelle Entscheidungen eine Verschiebung gesellschaftlicher Normen und letztendlich politische und wirtschaftliche Veränderungen anstoßen. So bringen z. B. die zunehmenden individuellen Präferenzen hinsichtlich Arbeitsplatzflexibilität, Maßnahmen, die Remote-Arbeit fördern und Veränderungen in Arbeitsstrukturen und -praktiken mit sich. Die Dynamik zwischen diesen Ebenen ist komplex und unterstreicht, dass sich Produktions- und Konsummuster im Laufe der Zeit formen und verändern. Daher bedarf es einer Betrachtung der

aktuellen Trends und Herausforderungen innerhalb der fünf Bedürfnisfelder. Die folgenden Abschnitte erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern führen diejenigen Trends und Herausforderungen auf, die neue Möglichkeiten für die Entstehung und Differenzierung biointelligenter Wertschöpfung eröffnen.

## Bedürfnisfeld Konsum

Das Bedürfnisfeld *Konsum* umfasst den Erwerb, die Nutzung und Entsorgung von Gütern und Dienstleistungen des täglichen Gebrauchs. Hierzu zählt bspw. der Konsum von Kleidung, Kosmetik oder elektronischen Geräten. Unsere heutige Konsumlandschaft ist von einem nicht nachhaltigen Verhalten geprägt, was oftmals mit dem Bild einer Wegwerfgesellschaft beschrieben wird. Dies geht mit einem hohen Ressourcenverbrauch einher und beschleunigt die Erschöpfung natürlicher Ressourcen wie Öle, Mineralien, Holz



oder Wasser. Insgesamt werden jährlich viel mehr nachwachsende Ressourcen verbraucht als die Erde innerhalb eines Jahres neu produziert. Der sogenannte Erdüberlastungstag wird dadurch immer früher im Jahr erreicht (43). Hierzu tragen auch die im Folgenden betrachteten Bedürfnisfelder bei. Entlang eines gesamten Produktlebenszyklus – von Produktion bis Entsorgung – kommt es zur Freisetzung von Emissionen und weiteren Umweltauswirkungen. Rund ein Viertel der Treibhausgasemissionen in Deutschland entsteht durch den Konsum in privaten Haushalten (44). Auch wenn sich in jüngster Zeit ein steigendes Bewusstsein für nachhaltigen Konsum beobachten lässt, führt dies aufgrund der Intentions-Verhaltens-Lücke nicht zwingend zu einem geringeren oder umweltbewussteren Konsum (45). Generell lässt sich beobachten, dass es Menschen in Bereichen, in denen Veränderungen ohne großen finanziellen Aufwand und Bemühungen möglich sind, leichter fällt, Kompromisse und Einschränkungen einzugehen (46). Die Anhäufung von Abfällen im Rahmen einer linearen Take-make-waste-Wirtschaft, bspw. durch die Entsorgung global entstandenen Verpackungsmülls, verursacht gravierende Umweltverschmutzungen und trägt so zusätzlich zur Erdbelastung bei (47).

Als vielversprechender Lösungsansatz wird in diesem Zusammenhang die Kreislaufwirtschaft diskutiert. Sie hat zum Ziel, Umweltbelastungen zu reduzieren, Klimaneutralität zu erreichen und eine nachhaltige Rohstoffversorgung sowie einen möglichst langen Erhalt natürlicher Ressourcen zu gewährleisten. Während eine Umsetzung in verschiedenen Maßstäben und Sektoren bereits erfolgt, bedarf es für eine großflächige Implementierung und geschlossene Kreisläufe neue Materialien, Produkte und Prozesse. Bspw. kann im Rahmen des Waste-to-X-Ansatzes Abfall, insbesondere organische Abfälle, in eine breite Palette von Produkten wie Chemikalien und Energieträger verwandelt werden (48). Digitale Zwillinge oder der von der europäischen Kommission forcierte digitale Produktpass können das Recycling erleichtern, indem sie Informationen zur Materialzusammensetzung und -wieder bzw. -wiederverwendung über den gesamten Lebenszyklus verfügbar machen. Durch On-Demand-Fertigung und der Verwendung von biobasierten Materialien ermöglicht der 3D-Druck flexiblere, schnelle

Produktionen mit geringem Materialbedarf und die Verwendung nachhaltiger Materialien.

Trotz zahlreicher technologischer Fortschritte ist die Etablierung einer umfassenden Zirkulärwirtschaft mit vielfältigen Herausforderungen verbunden, denn aktuelle Wirtschafts- und Wertschöpfungsstrukturen müssen sich grundlegend ändern. Die Globalisierung und heutigen Wirtschaftsstrukturen haben internationale Verflechtungen und Abhängigkeiten zur Folge, wie z. B. die Rohstoffabhängigkeit der EU von China. Geopolitische Ereignisse wie Pandemien, Kriege, Sanktionen und Handelsbeschränkungen können den Zugang zu Rohstoffen beeinträchtigen und zu steigenden Produktionskosten führen. Dies betont die Notwendigkeit eines diversifizierten Rohstoffbezugs und einer verbesserten Kreislaufwirtschaft (49). Die Auslagerung von Produktionsschritten in andere Länder führt außerdem zu weiten Transportwegen, undurchsichtigen Lieferketten, negativen Umweltauswirkungen sowie schlechten Arbeitsbedingungen und niedrigen Löhnen (50). Um diesen Herausforderungen entgegenzuwirken, wurde 2023 das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz (LkSG) eingeführt, das große Unternehmen mit mehr als 1.000 Mitarbeitenden dazu verpflichtet, Risiken in ihren Lieferketten zu identifizieren und zu minimieren, um Menschenrechte, Umweltschutz und fairen Wettbewerb zu gewährleisten (51). Aufgrund dieser globalen Entwicklungen werden hochkomplexe Lieferketten zunehmend unattraktiv.

## Bedürfnisfeld Energie

Die zentrale Herausforderung im Bedürfnisfeld *Energie* ist eine zuverlässige und nachhaltige Energieversorgung. Die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen birgt Risiken wie Preisvolatilität, geopolitische Konflikte und Umweltkontamination. Deshalb hat die Bundesregierung vor mehr als zwei Jahrzehnten die Energiewende angestoßen. Deutschland war damit lange ein Vorbild für andere Nationen für die Abkehr von der fossilen Energiegewinnung. Heute ist klar, dass das Energiewende-Projekt noch bei weitem nicht gelungen ist. Neben dem weiterhin großen Bedarf an Investitionen in Forschung und Entwicklung, um umweltfreundlichere und effizientere technologische Lösungen wie erneuerbare Energien, grünen Wasserstoff und nachhaltigere Energiespeicherung zu entwickeln, muss auch der Zu-



eine neuartige Verzahnung zwischen den klassischen Verbrauchssektoren (Haushalte, Gewerbe/Handel/Dienstleistung, Industrie und Verkehr) über Netzinfrastrukturen wie z. B. eine strombasierte Wärme- bzw. Kälteerzeugung (Power-to-Heat) oder die Umwandlung von Strom in synthetische Kraftstoffe (Power-to-Gas, Power-to-Liquid oder auch Power-to-X genannt) (57). Die zunehmende Vernetzung und Digitalisierung von Energieerzeugung, -verteilung, -speicherung und -nutzung (auch als Internet of Energy bezeichnet) soll die Energieeffizienz ebenfalls steigern, indem bspw. intelligente Messsysteme (Smart Meter) etabliert werden (58). Neue Technologien, wie Carbon Capture and Utilization/Storage (CCU/CCS), zielen darauf ab, Kohlenstoffemissionen zu reduzieren, indem CO<sub>2</sub> abgetrennt und wiederverwendet oder sicher gelagert wird. Hierbei spielen die möglichen Negativ-Emissions-Ansätze Bioenergy Carbon Capture and Storage (BECCS) und Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) eine entscheidende Rolle. BECCS umfasst die Nutzung von Biomasse zur Energieerzeugung, wobei das dabei entstehende CO<sub>2</sub> abgeschieden und im Untergrund gespeichert wird. Auf der anderen Seite fokussiert sich DACCS darauf, CO<sub>2</sub> aus der Umgebungsluft durch chemische Prozesse zu extrahieren (59).

Beim Ausbau und Umstieg auf erneuerbare Energien und alternative Energiequellen sind die öffentliche Akzeptanz und Regulierungen zentrale Erfolgsfaktoren. Erneuerbare Energien werden oft nicht nur von einzelnen, großen, zentralen Kraftwerken erzeugt, sondern von individuellen Haushalten und lokalen Gemeinschaften. Dezentrale Energieanlagen wie Photovoltaik-, Wind- oder Solarkraftanlagen speisen in das öffentliche Verteilnetz ein. Durch diese Dezentralisierung der Energieversorgung und -erzeugung, die bereits zu beobachten ist, können Privatpersonen aktiv am Energiemarkt partizipieren. Durch die hohe Anzahl an verschiedenen Energieerzeugern verändern sich die Anforderungen an das Energiemanagement, den Netzbetrieb sowie die Schutztechnik. Bspw. wird für Off-Shore-Anlagen im Norden Deutschlands ein Ausbau des Stromnetzes zwischen Nord- und Süddeutschland benötigt, um einen effizienten Stromtransport und einen zukünftigen Strommix mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien

gang einkommensschwacher Bevölkerungsgruppen zu bezahlbarer und zuverlässiger Energie ermöglicht werden, um Energiearmut zu reduzieren.

Der Energiesektor ist ein Hauptverursacher von Treibhausgasemissionen<sup>8</sup> – die Verwendung fossiler Brennstoffe verstärken den Klimawandel (52). Zusätzlich soll der weltweite Primärenergiebedarf bis 2040 um ein Drittel steigen (52). Die Defossilisierung und Dekarbonisierung<sup>9</sup> des Energiesektors sollen daher den Bedrohungen durch den Klimawandel entgegenwirken und dazu beitragen, das 1,5°C-Ziel der Vereinten Nationen zu erreichen. Für beide Ansätze bedarf es einer alternativen Energiegewinnung. Im Zusammenhang mit dem Umstieg auf erneuerbare Energien wird die Nutzung nachhaltiger Energiequellen wie Sonne, Wind und Wasser, Energiegewinnung aus biobasierten Rest- und Abfallstoffen, grüner Wasserstoff aus Biomasse und Biomass to Liquid (BtL) erforscht (54–56).

Die Kopplung von Stoff- und Energieströmen verschiedener Sektoren wird mit dem Ziel, die Energieeffizienz durch effizientere Energiequellen und Minimierung von Energieverlusten zu steigern und um Treibhausgasemissionen zu reduzieren, als Lösungsansatz diskutiert. Die Sektorkopplung umfasst

für ganz Deutschland sicherzustellen (60). Aufgrund des wachsenden Anteils erneuerbarer Energien im Strommix ist zudem eine bedarfs- und verbrauchsorientierte Verknüpfung von Erzeugung und Nachfrage entscheidend. Intelligente Netze, auch Smart Grids genannt, setzen auf Informations- und Kommunikationstechnologien, um die Überwachung und Optimierung der Stromnetze zu ermöglichen und so eine zuverlässige und effiziente Energieversorgung sicherzustellen (61).

Das Thema einer sicheren und zuverlässigen Energieversorgung in Deutschland hat angesichts der Abhängigkeit von Energieimporten und den ehrgeizigen Klimazielen stark an Bedeutung gewonnen. Um das 1,5°C-Ziel zu erreichen, sind sowohl fortschrittliche Energietechnologien als auch jährliche Negativemissionen von etwa 40 bis 100 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent ab 2045 in Deutschland erforderlich. Dies entspricht etwa fünf bis 14% der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2022. Das gesamte Potenzial für Negativemissionen in Deutschland wird auf etwa 110 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Jahr geschätzt, wobei 22% auf BECCS und neun Prozent auf Biokohle entfallen. Insgesamt steht ein breites Spektrum an Negativ-Emissions-Ansätze zur Verfügung. Diese beinhalten bspw. die Energieerzeugung durch photosynthetische Mikroorganismen (62).

### Bedürfnisfeld Wohnen

Das Bedürfnisfeld *Wohnen* gehört gemeinsam mit dem Mobilitäts- und Ernährungssektor zu den Konsumbereichen, in denen aufgrund von Flächen-, Wasser- und Energieverbrauch sowie Schadstoffausstoß und Abfall die deutlichsten Auswirkungen auf Umwelt und Klima beobachtet werden können (63). Durch die Agglomerationen in Städten und einen Anstieg bebauter Flächen entwickeln sich Großstädte außerdem zu Hitzeherden. Ursachen hierfür sind u. a. die Wärme, die Asphaltstraßen speichern, und eine enge Bebauung, die Luftzirkulation in Städten erschwert (64). Die Schaffung von klimagerechtem und bezahlbarem Wohnraum wird durch das hohe erwartete Bevölkerungswachstum, die zunehmende Urbanisierung (65) und der derzeitige hohe Anteil an Altbauten erschwert. Das weltweite prognostizierte Bevölkerungswachstum von zwei Milliarden Men-

schen bis 2050 entspricht der gesamten bebauten Welt von 1930 (66). Altbauten, insbesondere Gebäude, die vor 1979 errichtet wurden, weisen einen hohen Energieverbrauch auf. Dies zeigt: Neubau, Renovierungen und Modernisierungen sind erforderlich (67).

Während des Baus und der Nutzung von Gebäuden entstehen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Materialauswahl und Bauweise tragen zur Höhe der verursachten Emissionen bei. Ressourcenschonung in der Materialwahl wird einerseits durch Suffizienz und die Verwendung und Verwertung bestehenden Baumaterials (Upcycling) oder anfallenden Reststoffen aus anderen Prozessen erreicht. Bei der Wahl neuer Baumaterialien sind eine lange Lebensdauer, Kreislauffähigkeit, Rückbaufreundlichkeit und die Verwendung von lokal verfügbaren nachwachsenden Rohstoffen entscheidend. Die meisten Gebäude werden heute noch aus Stahlbeton oder Mauerwerk gebaut, was zu hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen führt. Die Zementindustrie verantwortet acht Prozent der weltweiten Treibhausgasemissionen und stellt damit den größten industriellen Einzelverursacher für den Klimawandel dar (68). Andererseits steigt die Nachfrage nach biobasierten Baustoffen und es wird an CO<sub>2</sub>-reduzierten Zementen und optimierten Betonrezepturen sowie an nachhaltigeren Alternativen geforscht, bspw. Hüttsand und Textilien, die bei Kontakt mit Wasser



aushärten, als Zementersatz erforscht (69, 70). Natürliche Pflanzenfasern, wie z. B. Bananen, Zuckerrohrbagasse oder Hanf, können zur Verstärkung von Beton genutzt werden und biobasierte Selbstheilung durch Bakterien kann die Langlebigkeit eines Fundaments unterstützen (68, 71).

Intelligente Stadtplanung, die Integration grüner Infrastruktur, nachhaltiger Wohnungsbau, optimierte Ressourcenplanung, serielle Holzbauweise, zirkuläre Praktiken, der gezielte Einsatz von Technologie sowie die Förderung einer lebendigen und integrativen Gemeinschaft stellen einige der Nachhaltigkeitstrends im Bauwesen dar (72, 73). Die konsumseitigen Wohnpräferenzen sind ebenfalls zunehmend von Nachhaltigkeitstrends sowie Flexibilitätsansprüchen geprägt. Eine aktuelle Studie verdeutlicht, dass sich ein Großteil der dort Befragten vorstellen kann, auf alternative Wohnkonzepte wie Öko- oder Mehrgenerationenhäuser, bzw. andere alternative Wohnkonzepte, wie Hausboote oder Tiny Houses (Kleinsthäuser), umzusteigen (74). Praktiken wie Urban Gardening (d. h. die Begrünung von Innenhöfen, Dächern und Fassaden mit blühenden Pflanzen, Obst und Gemüse) haben positive Effekte auf die Nachbarschaft, Umwelt und Lebensqualität in städtischen Gebieten (75). Die fortschreitende Digitalisierung und der Trend zu Smart Homes tragen zusätzlich zur Nachhaltigkeit bei, indem sie eine effiziente Steuerung und Überwachung von Energieverbrauch und Haushaltsgeräten ermöglichen.

### Bedürfnisfeld Gesundheit

Eine immer größere Herausforderung im Bereich der *Gesundheit* stellen Krankheiten dar, die durch einen ungesunden Lebensstil oder Umwelteinflüsse sowie den demografischen Wandel verursacht werden. Laut WHO stellen die nicht übertragbaren Erkrankungen die häufigste Todesursache weltweit dar, wobei Krebs, Diabetes, Herz-Kreislaufkrankungen und Atemwegserkrankungen 80 % der Todesfälle ausmachen. Die Risikofaktoren für diese Erkrankungen sind u. a. Rauchen, Alkoholkonsum, ungesunde Ernährung und zu wenig körperliche Aktivität. Durch entsprechende Präventionsmaßnahmen können die genannten Risikofaktoren reduziert werden (76). Die präventive Gesundheit wird zunehmend als Schlüssel zur Vermeidung langfristiger Gesundheitsprobleme betrachtet.

Veränderungen im Lebensstil, gesunde Ernährung, ausreichend Bewegung und regelmäßige Vorsorgeuntersuchungen spielen dabei eine entscheidende Rolle. Die wachsende Bedeutung einer pflanzlichen Ernährung spiegelt eine gesellschaftliche Veränderung hin zu einem allgemein gesünderen Lebensstil wider. Zahlreiche Studien betonen die Vorteile einer pflanzenbasierten Ernährung bei Stoffwechselstörungen, Typ-2 Diabetes mellitus und chronischen Entzündungen (77–79).

Verschiedene innovative Trends prägen die Zukunft einer effektiven und nachhaltigen Gesundheitsversorgung für eine wachsende und alternde Bevölkerung. Die personalisierte Medizin nutzt genetische und biomarkerbasierte Informationen, um individuelle Diagnosen, Behandlungspläne und Therapien zu erstellen (80, 81). Ein Beispiel hierfür sind Advanced Therapy Medicinal Products, kurz ATMPs. Dabei handelt es sich um eine relativ neue Produktkategorie, zu der Gentherapeutika, biotechnologisch bearbeitete Gewebeprodukte und somatische Zelltherapeutika zählen. Ziel der ATMPs ist die personalisierte Behandlung von derzeit unheilbaren, sehr seltenen und chronischen Krankheiten, insbesondere genetischen und metabolischen Erkrankungen sowie degenerativen neurologischen Erkrankungen, die mit herkömmlichen Medikamenten nicht behandelt werden können (80).



Digitale Medizin, Nanomedizin und der Einsatz von künstlicher Intelligenz versprechen Fortschritte in der Diagnose, Therapie und Prävention von Krankheiten (80). In der radiologischen Diagnostik sind Künstliche Intelligenz (KI)-Anwendungen bereits weit erforscht, sowohl für die Bildauswertung als auch zur Fehlervermeidung, Effizienzsteigerung und Qualitätsverbesserung. Dokumentationsunterstützung mittels künstlicher Intelligenz und digitaler Assessment-Tools ermöglicht dem medizinischen Fachpersonal eine verbesserte Einschätzung des individuellen Pflegebedarfs und die Auswahl geeigneter Pflegeinterventionen (83, 84). Insgesamt wird eine technologische Unterstützung der Diagnose- und Therapieverfahren vor dem Hintergrund des Fachkräftemangels, einer notwendigen kontinuierlichen Behandlung und Betreuung chronischer Krankheiten sowie dem demografischen Wandel und einer daraus resultierenden Versorgungslücke zunehmend relevant (85).

Neben den Auswirkungen des modernen Lebens auf die menschliche Gesundheit nimmt auch die Bedrohung durch den Klimawandel zu. Beispiele hierfür sind gesundheitsgefährdende Hitzewellen, die Verbreitung von Tropenkrankheiten, Pandemien sowie Mangelernährung aufgrund von extremwetterbedingten Ernteausfällen. Zoonotische Krankheiten, wie COVID-19, die im Jahr 2020 eine weltweite Pandemie auslöste, werden aufgrund anthropogener Umweltzerstörung wahrscheinlich immer häufiger auftreten. Während der COVID-19-Pandemie kam es zu der ersten breiten Anwendung von mRNA-Impfstoffen, die zur Eindämmung des SARS-CoV-2-Virus beitragen und ganz neue Möglichkeiten zur Bekämpfung von Infektionskrankheiten eröffnen (86). Die mRNA-Technologie birgt Potenziale für Proteinersatztherapien gegen Infektionserkrankungen wie AIDS. Die Anwendung in der Proteinersatztherapie und Krebsimmuntherapie ist besonders bedeutsam angesichts der aktuellen Unwirksamkeit von 75 % der Krebstherapien (87, 88).

### Bedürfnisfeld Ernährung

Die Herausforderungen im Bedürfnisfeld *Ernährung* sind äußerst facettenreich und werden nicht nur von Trends aus diesem Bereich beeinflusst, sondern auch durch Trends und Herausforderungen aus dem Ge-

sundheitssektor. Die zunehmende Präferenz für eine pflanzliche Ernährung generiert einen florierenden Markt für alternative Fleisch- und Milchprodukte. Der Verzicht auf tierische Produkte erfordert die ausreichende Verfügbarkeit alternativer Proteine, z. B. aus Pflanzen oder Pilzen. Zukunftsträchtige Technologien wie bspw. die Herstellung von In-vitro-Fleisch durch Zellkultivierung sowie die Fermentation von Pilzkulturen bieten vielversprechende Perspektiven für die Entwicklung nachhaltiger Fleischersatzprodukte (89).

Die hohe Lebensmittelverschwendung, die in Deutschland jährlich rund elf Millionen Tonnen erreicht und wovon 59 % auf private Haushalte entfallen, führt zu ethischen Herausforderungen und bringt u. a. aufgrund von Massentierhaltung und dem damit einhergehenden Ressourcenverbrauch umwelttechnische und klimatische Konsequenzen mit sich (90). Der Landwirtschaftssektor leistet einen maßgeblichen Beitrag zu den weltweiten Treibhausgasemissionen (91). In diesem Kontext manifestieren sich auch die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft.

Die Zunahme an Extremwetterereignisse erfordert neue Prozessketten und Anbaumethoden (92). Die Integration von KI-Technologien kann landwirtschaftliche Prozesse nachhaltiger und effizienter gestalten, indem bspw. Bodenwasserstände überwacht, Schädlingsbefall erkannt und spezifisch Handlungsanweisungen gegeben werden. Darüber hinaus kann mithilfe molekularbiologischer Methoden wie CRISPR-Cas9 (präzise Veränderungen im pflanzlichen Erbgut) die Widerstandsfähigkeit von Pflanzen gegenüber Krankheiten und Trockenheit erhöht werden (93). Die Integration innovativer Technologien kann so eine nachhaltigere und produktivere Landwirtschaft ermöglichen, und dazu beitragen, den Bedürfnissen der stetig wachsenden Weltbevölkerung gerecht zu werden. Das prognostizierte Bevölkerungswachstum<sup>10</sup> wird insbesondere in Entwicklungsländern erhebliche Auswirkungen auf die Nahrungsmittelknappheit haben. Somit besteht eine globale Herausforderung darin, der Bevölkerung weltweit einen zuverlässigen Zugang zu ausreichenden und nährstoffreichen Lebensmitteln zu gewährleisten. Angesichts begrenzter Flächenressourcen und des gegenwärtigen Konsumverhaltens der westlichen

Welt sind die Optimierung landwirtschaftlicher Prozesse für nachhaltigere Ernährungssysteme, die Reduzierung von Lebensmittelabfällen sowie eine effizientere Ressourcennutzung und Verteilung von essentieller Bedeutung für die Zukunft (94).

Konsumierende legen bei Lebensmitteleinkäufen bspw. zunehmend Wert auf Regionalität und Fair-Trade-Zertifizierungen (95). Der Einsatz von KI-basierter, personalisierter Ernährungsberatung und transparenter Herkunftskennzeichnungen auf Lebensmitteln kann dazu beitragen, diese Entwicklung zu verstärken. Im Bereich der Produktionstechnik zeichnet sich der Trend für eine verstärkte Anwendung der Fermentierung ab (96). Bekannte fermentierte Produkte sind Kefir, Joghurt, Tofu und Sauerkraut, aber auch bei der Herstellung von Käse und Brot spielt der Prozess eine Rolle. Bei der Fermentation werden Mikroorganismen u. a. zur Haltbarmachung von Lebensmitteln eingesetzt. Die probiotischen Bakterien unterstützen die Gesundheit der Darmflora und erhöhen zum Teil den Nährstoffgehalt der Lebensmittel (95–97). Zusätzlich eröffnen Fortschritte in der Enzymtechnik, einschließlich Proteindesign in der synthetischen Biologie sowie Genom-

Editing, neue Möglichkeiten für die Entwicklung von pflanzenbasierten Produkten, die als moderne, nachhaltigere Nahrungsquellen dienen (98). Gleichzeitig erfährt das Upcycling von Lebensmittelabfällen in der Wertschöpfungskette zunehmend Relevanz. Dieser Trend zielt darauf ab, aus Abfällen höherwertige und verzehrbare Produkte zu generieren oder diese für weitere Produktionsprozesse zu nutzen. Diesbezüglich können bspw. Lebensmittelabfälle in mikrobiologischen Produktionsverfahren als Energiequelle dienen (siehe auch Bedürfnisfeld Konsum).

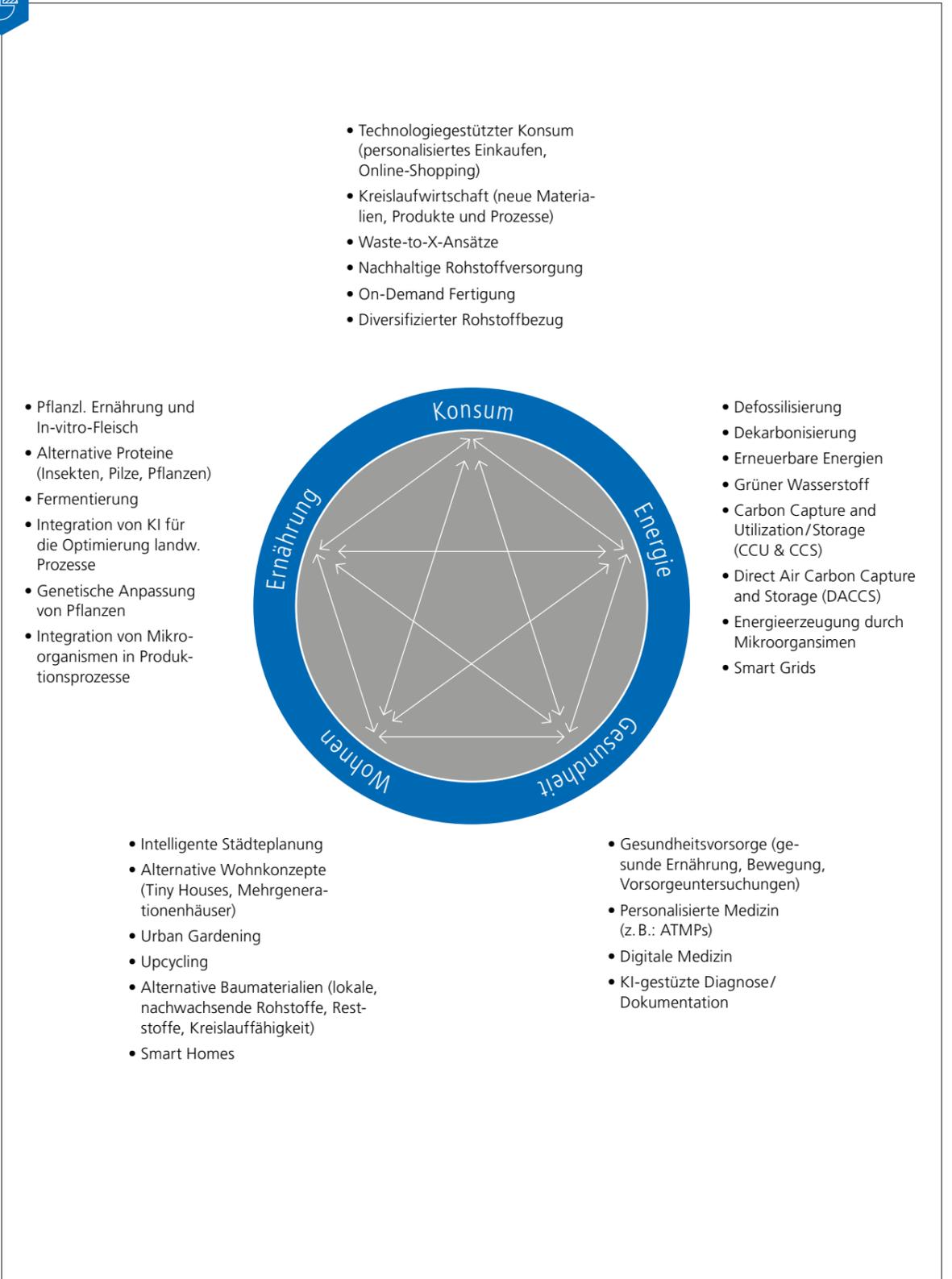


Abbildung 6: Übersicht aktueller Trends und Lösungsansätze in den Bedürfnisfeldern sowie deren Wechselwirkungen. Die Abbildung verdeutlicht die komplexen Beziehungen zwischen den fünf zentralen Bedürfnisfeldern: Wohnen, Energie, Gesundheit, Konsum und Ernährung. Sie trägt dazu bei, die Interdependenzen für eine nachhaltige Entwicklung besser zu verstehen.



Die Herausforderungen in den fünf zentralen Bedürfnisfeldern zeigen, dass unsere heutige Gesellschaft vor vielfältigen Problemen steht (*Abbildung 6*), die ein flächendeckendes Umdenken erfordern. Die Erderwärmung wird bis 2040 auf +1,5 °C und bis 2100 auf +3,5 °C prognostiziert. In den letzten 30 Jahren ist der Ressourcenverbrauch um knapp 120 % gestiegen und eine weitere Verdopplung wird bis 2050 erwartet (*2, 99*). Hochkomplexe Lieferketten, steigender Wettbewerb und internationale Abhängigkeiten schwächen die Resilienz von Unternehmen und Ländern. Zunehmende Handelshemmnisse und globale Regularien verstärken die Situation und machen komplexe globale Lieferketten unattraktiv. Darüber hinaus macht sich der Fachkräftemangel und ein zunehmender demographischer Wandel immer deutlicher bemerkbar (*1, 100–102*). Aufgrund komplexer Wirkungsbeziehungen wird eine Zunahme dieser Problematiken und akuter ökonomischer, ökologischer und gesellschaftlicher Krisen erwartet (*103*). Dem gegenüber steht der Wunsch einer nachhaltigen Transformation, der in konsum- und produktionsseitigen Veränderungen deutlich wird.

Trotz der vielversprechenden technologischen Neuerungen und Trends (*Abbildung 6*), die sich in den fünf Bedürfnisfeldern abzeichnen, zeigt die Realität, dass wir noch weit von einer nachhaltigen Wirtschafts- und Produktionsweise entfernt sind. Durch die Verwendung neuer Rohstoffe, Materialien, Produkte und Produktionsverfahren, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle bietet biointelligente Wertschöpfung zukunftssträchtige Gestaltungsoptionen, welche die positiven Entwicklungen in den wesentlichen Bedürfnisfeldern verstärken können. Die Etablierung dezentraler, selbst-regulierender Einheiten für eine bedarfsgerechte Herstellung hochwertiger, personalisierter, biobasierter Produkte erfordert neue Produktionstechnik (*104*). Die weltweiten Aktivitäten und technologischen Entwicklungen, die sich in Richtung einer biointelligenten Wertschöpfung beobachten lassen, werden im Folgenden mit einem Fokus auf die identifizierten Leitländer dargestellt.

<sup>8</sup> Laut BMZ hat der Energiesektor in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2021 die meisten Treibhausgasemissionen (ungefähr zwei Drittel aller Treibhausgasemissionen) verursacht (*52*).

<sup>9</sup> Defossilisierung bezieht sich auf das Ersetzen fossiler Energieträger durch erneuerbare Alternativen, während unter Dekarbonisierung die Reduktion von Treibhausgasemissionen verstanden wird.

<sup>10</sup> Das Wachstum der Weltbevölkerung ist bis 2050 auf 9,7 Milliarden Menschen prognostiziert (*66*).

## 4. ANALYSE DER WELTWEITEN AKTIVITÄTEN

# AKTEURE DER BIOINTELLIGENTEN WERTSCHÖPFUNG

Das Kapitel fasst die Aktivitäten in den betrachteten Leitländern zusammen und spiegelt damit den Status quo der relevanten Akteure wider. Betrachtet wurden Unternehmen, Universitäten und Forschungseinrichtungen sowie Netzwerke, die im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung aktiv sind.

In den Leitländern wurden 691 Akteure der biointelligenten Wertschöpfung identifiziert. Darunter finden sich 15 % Universitäten und Forschungseinrichtungen, 2 % Netzwerke und 83 % Unternehmen. 64 % aller Unternehmen, die zu einer biointelligenten Wertschöpfung beitragen, lassen sich den Kleinst- oder Kleinunternehmen zuordnen. Der Anteil an Mittel- (17 %) und Großunternehmen (19 %) scheint damit vergleichsweise gering. Kleinst-, Klein- und mittelgroße Unternehmen bis 249 Mitarbeiter (KMU) machen im Schnitt der OECD-Länder 99 % der gesamten Unternehmen aus. Der relative Anteil der Großunternehmen im Feld

der biointelligenten Wertschöpfung ist also überdurchschnittlich über alle Branchen (105). Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass kleine Unternehmen im Vergleich zu großen Technologiekonzernen nur wenig Eigenkapital und andere Ressourcen (Know-how, Netzwerk, Mitarbeiter, F&E Infrastruktur) (106). Der Anteil an Startups beträgt im Durchschnitt über alle Leitländer 12 %. Seit den 2000er Jahren ist ein sehr starker Anstieg an Unternehmen im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung zu verzeichnen. Dies veranschaulicht *Abbildung 7*. Die meisten Unternehmen wurden im Zeitraum von 2013 bis 2019 gegründet.

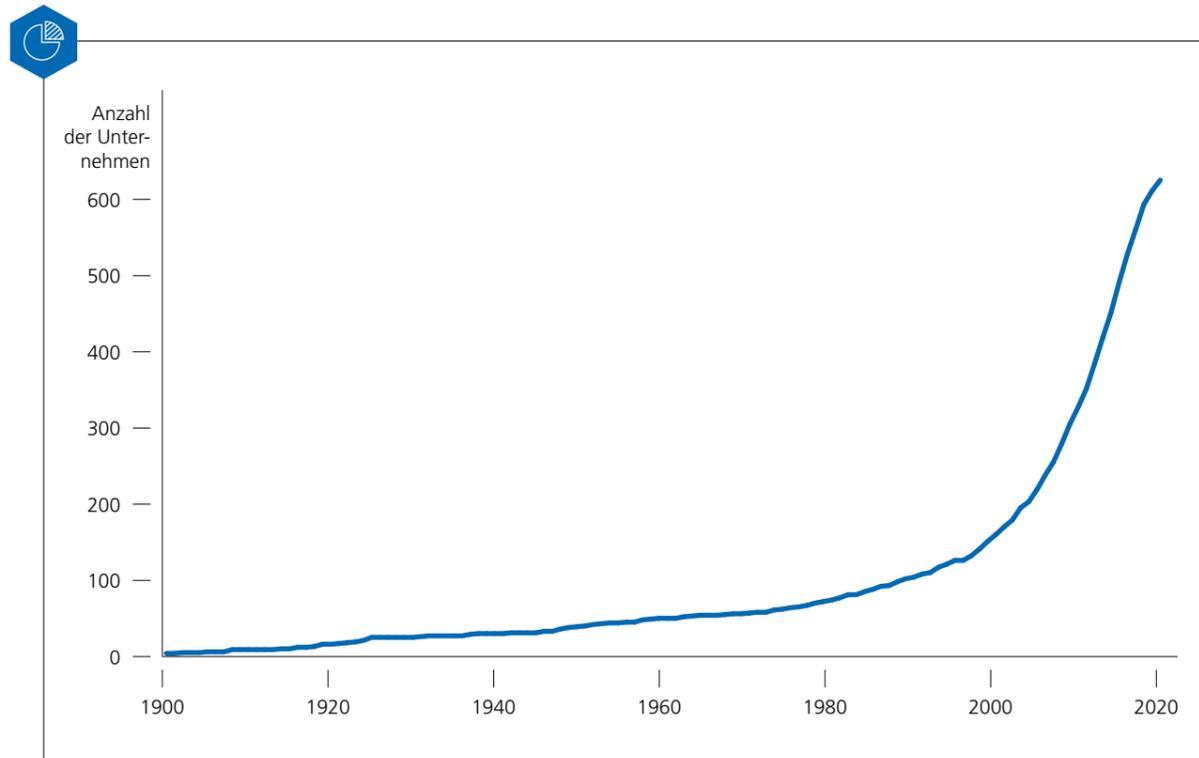


Abbildung 7: Gesamtzahl der Unternehmen im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung aufgetragen nach dem Jahr.

»This is the century of biology. It's going to change the world as much as information technology did in the last hundred years. We can't even predict what that's going to be.«

Steven Robinette, Atlas Venture<sup>11</sup>

Bei der Betrachtung der Zuordnung der Unternehmen zu den Bedürfnisfeldern zeigt sich, dass das Bedürfnisfeld Gesundheit im internationalen Durchschnitt mit über 60 % am stärksten vertreten ist. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass Gesundheit im Durchschnitt den höchsten subjektiven Stellenwert aller Lebensbereiche hat. Da die Menschen immer älter werden, ist davon auszugehen, dass der Bedarf und damit die Bereitschaft zu öffentlichen und privaten Ausgaben weiter steigen wird (107). Zum anderen ist die Finanzierung des Bereichs Gesundheit, insbesondere durch staatliches Kapital, signifikant höher als in anderen Bedürfnisfeldern, was zu mehr Investitionen sowie einer schnelleren und umfassenderen Entwicklung von biointelligenten Technologien führt (108). Der Bereich Gesundheit bietet somit zurzeit das größte Umsetzungspotenzial für die Entwicklung von biointelligenten Technologien, Produkten und Dienstleistungen.

An zweiter Stelle steht der Bereich Ernährung mit rund 27 % der Akteure. Auch hier ist der vergleichsweise hohe Stellenwert des Bedürfnisfelds, und damit einhergehend hohe Ausgaben von Haushalten und staatlichen Einrichtungen, der Grund für die verstärkte Präsenz von Akteuren. Außerdem gefährdet die steigende Weltbevölkerung die Versorgungssicherheit, was zu einem hohen Veränderungsdruck in diesem Sektor führt. Dem Feld Ernährung folgt der Bereich Konsum mit 23 %. Dagegen

haben die Energiebranche mit 17 % sowie der Sektor Bauen und Wohnen mit 11 % eher einen geringen Anteil. Dies ist insbesondere auf das vergleichsweise geringe Preisniveau von konventionellen Energieträgern und Baustoffen zurückzuführen, was den Markteintritt von biointelligenten Ansätzen hemmt (109). Im Folgenden wird die weltweite Verteilung der Akteure betrachtet. Hier zeigen sich deutliche Unterschiede. Über ein Drittel der identifizierten Akteure (38 %) haben ihren Hauptsitz in den USA. Danach folgen Deutschland mit 16 %, das Vereinig-

te Königreich / Irland mit 13 % sowie Israel und Kanada mit jeweils 8 %. Die weiteren sechs Leitländer (Norwegen, Schweden, Finnland, Niederlande, China und Australien) machen 18 % der Akteure aus. In *Abbildung 8* ist die prozentuale Verteilung der identifizierten Akteure in den Leitländern dargestellt, bezogen auf die Gesamtanzahl.

Nachfolgend werden die Kernergebnisse und länderspezifischen Highlights je Leitland im Detail vorgestellt. Dabei werden sowohl Kernregionen als auch Best-Practice-Akteure vorgestellt. Die Aktivitäten einzelner Akteure können mehreren Bedürfnisfeldern zugeordnet werden. Daher sind Summen über 100 % möglich.

»Die Fortschritte im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung waren in den letzten 5 bis 10 Jahren so schnell, dass aus meiner Sicht nicht genügend Zeit war, damit sich Produkte etablieren konnten. Aber das Potenzial ist gegeben. Es ist nur eine Frage der Zeit.«

Marcus Remmers, Novo Holdings



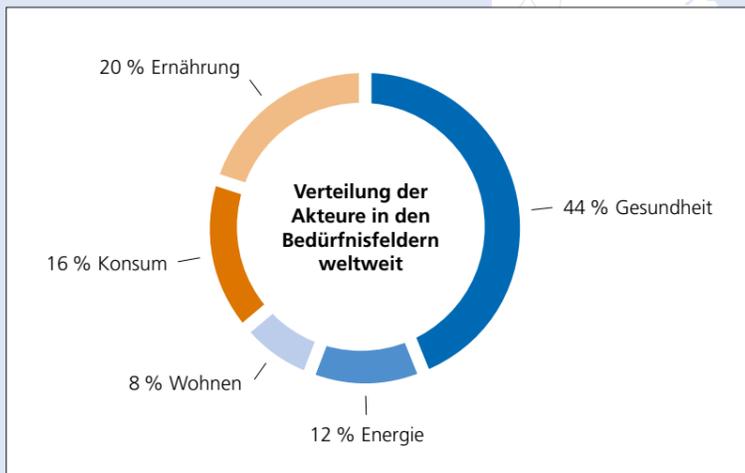
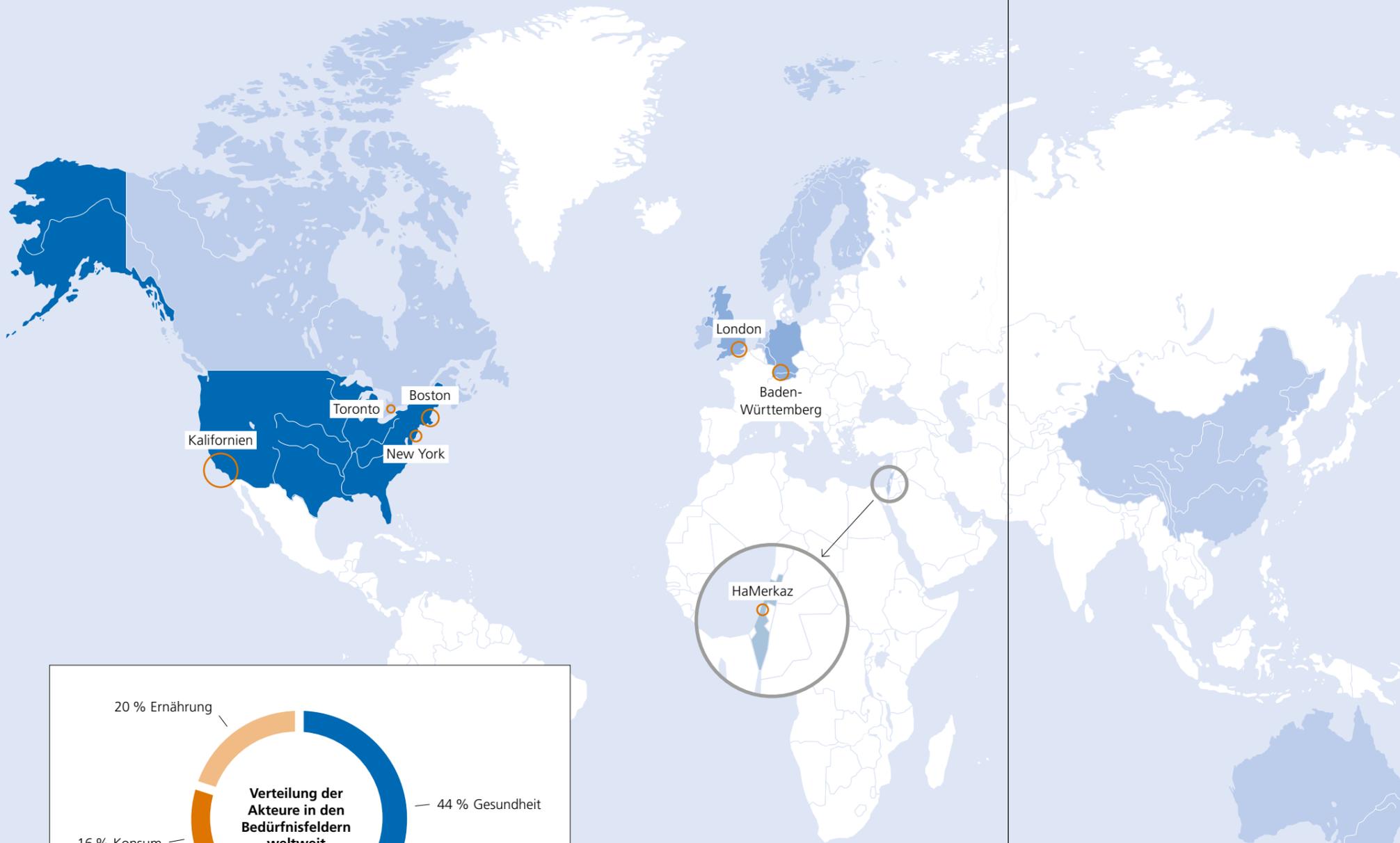
Abbildung 8: Gezeigt wird die Verteilung der Akteure im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung. Dargestellt ist der prozentuale Anteil der Akteure je Land bezogen auf die Gesamtzahl der Akteure aus der Akteursrecherche (691). Für die Länder in Weiß wurden keine Daten erhoben.

**Prozentuale Verteilung der Akteure pro Land**

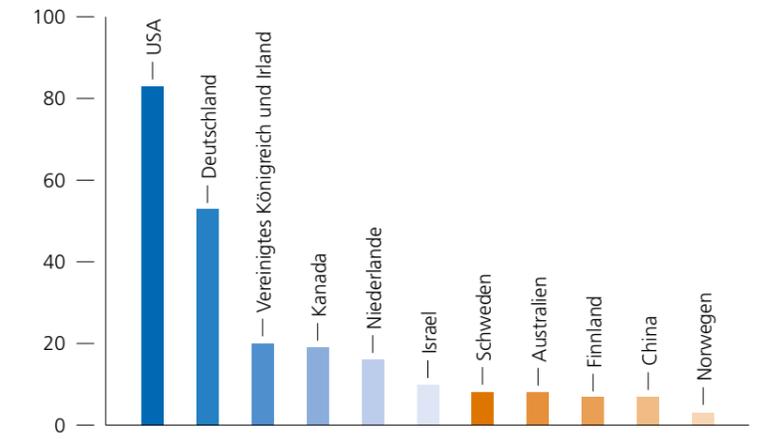


**Hotspot Regionen**

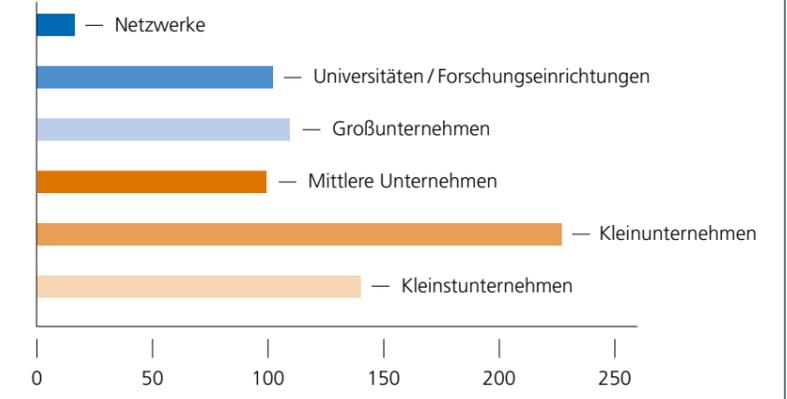
Zu den Hotspots zählen Regionen, in denen mindestens 3 % der Gesamtkteure ihren Hauptsitz haben.



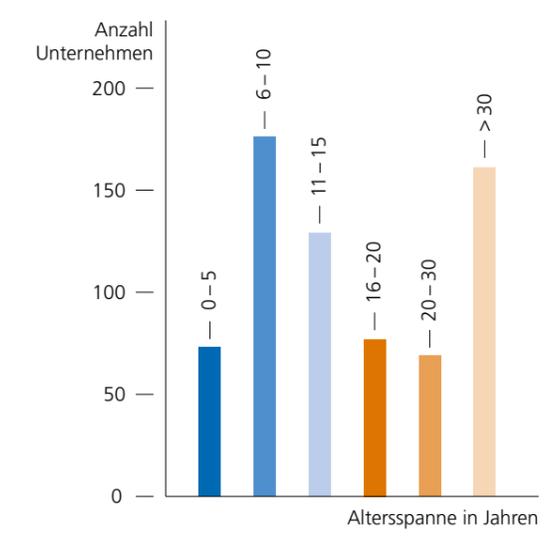
**Anzahl der Technologien pro Leitland**



**Anzahl der Akteure nach Kategorien**



**Unternehmensalter**





## Vereinigte Staaten von Amerika (USA)

In den USA haben 256 der identifizierten Akteure ihren Hauptsitz. Davon zählen mehr als die Hälfte zu den

Kleinst- oder Kleinunternehmen. Großunternehmen belaufen sich hingegen lediglich auf 20 %. Diese Zahlen entsprechen dem Durchschnitt der Leitländern. Das Durchschnittsalter der Unternehmen liegt bei 20 Jahren. Rund 35 % der identifizierten Unternehmen sind nicht älter als 10 Jahre und 22 % weisen ein Alter zwischen 10 und 15 Jahren auf. Mit einer Startup-Quote von 6 %, liegt die USA geringfügig unter dem Durchschnitt der Leitländer, obwohl 60 % des weltweiten Risikokapitals in die USA fließen (110). Dies könnte daran liegen, dass Markteintrittsbarrieren im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung sehr hoch sind, da Fachwissen, Labore, Reaktoren und anderes technisches Equipment ressourcenintensiv sind und zudem vornehmlich bei älteren und größeren Unternehmen liegen. Darüber hinaus ist zu beachten, dass weniger als 40 % der Neugründungen innerhalb von fünf Jahren über das Stadium des Kleinunternehmens hinaus kommen. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass viele von ihnen von größeren Unternehmen aufgekauft werden. In den letzten 20 Jahren wurde das Wachstum neuer Akteure vor allem dadurch erschwert, dass der amerikanische Markt durch die günstigen Standortfaktoren und die hohe Menge an verfügbarem Kapital übersättigt und der Wettbewerb entsprechend hoch war. Insbesondere Technologiemonopole hemmen das Wachstum aufkommender Startups (111). Der Anteil der Universitäten und Forschungseinrichtungen im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung fällt mit

12% etwas geringer aus als der Durchschnittswert im leitländerspezifischen Vergleich, obwohl die Qualität der Einrichtungen im internationalen Vergleich hervorstechen. Biointelligenz-Netzwerke machen nur rund 1 % der Akteure aus.

Mehr als 80 % der Akteure in den USA sind u. a. im Bedürfnisfeld Gesundheit tätig. Diese überdurchschnittliche Repräsentanz erklärt die vergleichsweise geringeren Anteile in den Bereichen Ernährung (20 %), Konsum (18 %), Energie (14 %) und Wohnen (8 %). Bezogen auf die Bundesstaaten haben die meisten Unternehmen ihren Hauptsitz an der Westküste in Kalifornien sowie an der Ostküste in New York und Massachusetts.

In Kalifornien, mit rund 28 % aller US-Akteure, liegt das Silicon Valley, einer der wirtschaftlich bedeutendsten Standorte der IT- und High-Tech-Industrie (112), der sich in den letzten Jahrzehnten aufgrund günstiger Standortfaktoren (geringe Steuern, mildes Klima, anerkannte Bildungseinrichtungen, Militär als Auftraggeber) entwickelt hat. Gleichzeitig ist es der größte Startup-Standort weltweit (110). 31 % aller US-Startups im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung sind hier zu verorten. Gleichzeitig verfügt das Silicon Valley über 20 % des Risikokapitals in den USA. Ein Grund für diese hohe Quote ist, dass Risikokapitalgeber oft Gründer, Aktionäre oder Manager von großen Technologieunternehmen sind, welche heute vorzugsweise ihr Umfeld finanzieren. Dies sorgt, neben anderen Faktoren, auch für eine ausgeprägte Gründerkultur, die ein Treiber der Startup-Szene in den USA ist (110). So vereint das Silicon Valley eine hohe Expertise für Tech-

nologien und Geschäftsmodelle. Mit der University of California, der Stanford-University und dem California Institute of Technology ist der Standort außerdem von hochklassigen Bildungseinrichtungen umgeben, welche einerseits grundlegende Forschungsarbeit leisten und andererseits potenzielle Fachkräfte und Gründer ausbilden. So gibt es gleich mehrere Studiengänge und Forschungsbereiche, die weite Teile der biointelligenten Wertschöpfung abdecken (113). Letztlich ist die räumliche Nähe zu den vielen Hochtechnologie-Unternehmen und die Qualität der Infrastruktur im Silicon Valley ein wichtiger Faktor für eine Cluster-Bildung, der die Zusammenarbeit zwischen der Entwicklung und dem Vertrieb biointelligenter Konzepte vereinfacht (112).

Mit größerem Abstand ist Massachusetts der zweitgrößte Empfänger von Risikokapital weltweit (110). Die Region gilt ebenfalls als Hotspot für Biotechnologie-Akteure, welche in diesem Zusammenhang eine wesentliche Säule der biointelligenten Wertschöpfung darstellen, in den USA (15 % der US-Akteure). Insbesondere die ausgeprägte Gründerkultur mit vielen Biotechnologie-Startups (23 % aller US-Startups im Bereich biointelligente Wertschöpfung) ist hier hervorzuheben und wird auch von den interviewten Experten bestätigt. Auch hier sind die Standortfaktoren Bildung und Forschung wichtige Treiber: Mit der Harvard University und dem Massachusetts Institute of Technology (MIT) kann die Region noch höher gerankte Einrichtungen vorweisen als Kalifornien. Beide

haben sich in den vergangenen Jahren zudem auf Biotechnologie, eine der drei Säulen der Biointelligenz, spezialisiert. Weiterhin verfügt die Region über eine Vielzahl an Fachkräften, die grundlegende Ansätze der biointelligenten Wertschöpfung in Forschungseinrichtungen und Unternehmen vorantreiben (114). Gerade in Massachusetts ist zudem die Förderung von Unternehmen und anderen Einrichtungen durch staatliche Programme stark ausgeprägt, so z. B. mit den millionenschweren Investitionsprogrammen des Massachusetts Technology Collaborative. All diese Faktoren führen dazu, dass der Standort Massachusetts eine exzellente Reputation hat, die selbstverstärkend wiederum neue Akteure anlockt.

Für den Standort New York mit 10 % aller US-Akteure können ähnlich positive Standortfaktoren benannt werden. Im wichtigsten Finanzzentrum der Welt sind etablierte Unternehmen, Startups und Forschungseinrichtungen mit Finanzkapital, insbesondere Risikokapital, ausgestattet (115, 116). Auch von Seiten der Bildungseinrichtungen ist New York mit der Columbia University, der Cornell University und der New York University bestens aufgestellt. Die hohe Einwohnerzahl und -dichte in Kombination mit den sehr guten Bildungseinrichtungen sorgt für ein hohes Potenzial an Mitarbeitenden, Gründenden und Forschenden (117). Dennoch sind lediglich 8 % der US-Startups im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung zuhause.



Das Unternehmen **SolarBiotech** bietet unter dem Namen BioNodes maßgeschneiderte modulare Anlagenarchitekturen an. Ziel ist es, Produkte der synthetischen Biologie, etwa biondesignte Kosmetika oder funktionale Lebensmittelzusätze, im großen Maßstab und mit niedrigen Betriebskosten herstellen zu können. Die BioNodes werden außerdem nachhaltig betrieben, unter Einsatz von Solarenergie, Kreislaufführung von Wasser und einer bioabsorbierenden CO<sub>2</sub>-Technologie.





## Deutschland

Auf Deutschland (DE) als zweitgrößten Hotspot fallen 16 % der identifizierten Akteure. Insbesondere in Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen (NRW), Bayern und Berlin konnten Biointelligenz-Zentren ausgemacht werden.

Insgesamt verteilen sich die Akteure in Deutschland auf 33 % Kleinst- und Kleinunternehmen, 36 % mittelgroße und Großunternehmen und 26 % Forschungseinrichtungen sowie 6 % Netzwerke. Damit ist der Anteil an kleineren Unternehmen bedeutend kleiner als in den anderen Ländern. Dies verwundert, da Deutschland für seine innovativen KMU bekannt ist. Auffällig ist der hohe Anteil an Forschungseinrichtungen in Relation

zum Länderdurchschnitt. Das zeigt, dass sich viele Universitäten der biointelligenten Wertschöpfung angenommen haben. Die Startup-Quote unter den Akteuren beträgt in Deutschland 19 % und ist damit höher als in den USA und UK/IE, aber geringer als in Israel. Etwa 36 % der Startups sind in den ersten fünf Jahren über die Klasse der Kleinstunternehmen hinausgewachsen. Damit ist das Wachstum der Unternehmen in Deutschland ähnlich wie in den USA. Mit der biointelligenten Wertschöpfung befassen sich in Deutschland vor allem Unternehmen, die älter als 30 Jahre sind. Sie machen 42 % aus. Das durchschnittliche Unternehmensalter liegt bei 37 Jahren. Insgesamt ist für Europa festzustellen, dass die Startup-Szene der biointelligenten Wertschöpfung in Wachstumsbranchen hinter der in anderen Regionen zurückfällt. Auch in den Interviews führen Experten dies auf die vergleichsweise hohen bürokratischen und finanziellen Hürden, aber auch auf den geringeren gesellschaftlichen Stellenwert von Gründung zurück (110). Die Akteure der biointelligenten Wertschöpfung in Deutschland sind häufig in mehreren Bedürfnisfeldern aktiv. Von ihnen sind 52 % im Bedürfnisfeld Gesundheit und 25 % im Bedürfnisfeld Ernährung

tätig. Beide Werte liegen leicht unter dem Durchschnitt der anderen Länder. Über dem Durchschnitt liegen dagegen die Bedürfnisfelder Konsum (31 %), Energie (25 %) und Wohnen (18 %). Dies ist darauf zurückzuführen, dass das verarbeitende Gewerbe und das Baugewerbe in Deutschland eine vergleichsweise höhere Bedeutung haben als in anderen Ländern.

In Baden-Württemberg sind 33 % aller deutschen Akteure der biointelligenten Wertschöpfung zuhause. Sie finden sich vor allem in der Region Stuttgart und der Rhein-Neckar-Region rund um Mannheim und Heidelberg. Etwa 16 % der Startups sind in Baden-Württemberg angesiedelt, womit die Startup-Quote hier eher gering ist. Durch den Hauptsitz des Kompetenzzentrum Biointelligenz e. V. (KBI) in Stuttgart hat das

»Das goldene Startup-Umfeld für Biointelligenz ist in keinem Land der Welt zu finden, zu breit sind Anforderungen von Infrastruktur bis Regulatorik. Aber die Bedingungen in Deutschland liegen im guten oberen Mittelfeld: Wir punkten mit regionaler und technologischer Diversität, exportstarkem Mittelstand und exzellenten Produktionstechnik-Netzwerken.«

Dr. Eric Maiser, VDMA

Thema einen hohen Stellenwert in der Region. Diese Einrichtung hat sich besonders auf die Forcierung der Biointelligenz auf mehreren Ebenen spezialisiert. Der KBI befasst sich mit der nachhaltigen Transformation der Industrie in Deutschland und Europa im



Das Food-Tech Unternehmen **Bluu Seafood** aus Deutschland strebt an, nachhaltige Alternativen für tierisches Protein zu entwickeln. 2022 präsentierte das Unternehmen verzehrfertige Produkte aus kultiviertem Fisch und ist somit europaweit Vorreiter. Die Form beschränkt sich noch auf Fischstäbchen und Fischbällchen. Außerdem ist die regulatorische Zulassung in Deutschland noch in Arbeit. International, z. B. in den Ländern Singapur und Israel, stößt das Thema zelluläre Lebensmittelproduktion bereits auf großes Interesse. Dort bestehen für andere kultivierte Fisch- und Fleischprodukte bereits Zulassung und es existieren erste Testrestaurants.

Rahmen einer biointelligenten Wertschöpfung. Dafür versammelt die Organisation Experten aus Deutschland und Europa aus den Bereichen Biologie, Informatik und Ingenieurwissenschaften und schafft damit gute Rahmenbedingungen für Unternehmen, die zur biointelligenten Wertschöpfung beitragen. Die Region Stuttgart ist Heimat zahlreicher Automobil-, Maschinenbau- und High-Tech-Unternehmen und gehört zu den innovativsten Regionen der Welt (gemessen an den Patentanmeldungen). Mit den Universitäten Stuttgart, Tübingen und Hohenheim sowie zahlreichen Fraunhofer-Instituten, dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt und verschiedenen Max-Planck-Instituten sowie Clustern wie dem Cyber Valley ist die Region enorm forschungsstark. Baden-Württemberg ist mit dem Karlsruher Institut für Technologie, sowie den Universitäten Heidelberg, Konstanz und Tübingen zudem Standort von vier Exzellenzuniversitäten (118).

In Nordrhein-Westfalen (NRW) lassen sich 13 % der deutschen Akteure der biointelligenten Wertschöpfung finden, ohne dass sich eine der Städte im Besonderen hervorhebt. Auch hier sind 16 % der deutschen Startups verortet. NRW ist einer der führenden Biotechnologie-Standorte Europas, aus dem sich ein großes Potenzial für die biointelligente Wertschöpfung ableiten lässt. In den dicht besiedelten Räumen des Rheinlands und des Ruhrgebiets, aber auch in weiteren Städten, finden sich über 500 Unternehmen und 56 Universitäten, Hochschulen und Forschungseinrichtungen im Bereich der Lebenswissenschaften. Das Bundesland hat das dichteste Forschungsnetz Europas. Im inter-

nationalen Hochschulranking erscheinen insbesondere die Universität Bonn und die RWTH Aachen (119). Durch die Standorte einiger global agierender und renommierter pharmazeutischen und chemischen Unternehmen, wie z. B. dem Biotechnologie- und Biomedizin-Unternehmen Miltenyi Biotec in Bergisch Gladbach und dem Chemie- und Pharmakonzern Bayer in Leverkusen, herrscht in dem Bundesland ein besonderes Interesse an biotechnologischen Verfahren, die nicht nur Basis der Industrie sind, sondern auch Entwicklungsmöglichkeiten für neue Materialien bieten. Insgesamt wurden 22 Technologie- und Gründerzentren identifiziert, die insbesondere für Startups und den Transfer von wissenschaftlichem Know-how eine Rolle spielen. Dabei profitiert NRW auch von der vorhandenen Infrastruktur. Die UNESCO Kulturregion besitzt Deutschlands dichtestes Schienennetzwerk, sechs internationale Flughäfen und den weltgrößten inländischen Hafen in Duisburg (120). Nicht nur dadurch trägt das Bundesland zu rund einem Fünftel des deutschen Bruttoinlandsprodukts bei und ist sowohl eine der wichtigsten Kulturregionen Europas als auch eine der wirtschaftlich stärksten.

In Bayern sind 12 % der in Deutschland ansässigen Akteure vertreten. Die Startup-Quote im Feld der biointelligenten Wertschöpfung beträgt etwa 11 %. Mit etwa der Hälfte der bayrischen Akteure ist München in ganz Deutschland der führende Standort für einen der drei wesentlichen Teilbereiche der Biointelligenz, der Biotechnologie. Eine Spitzenposition belegt die Stadt ebenfalls in Europa, vor allem in der Medizintechnik. Dabei

punktet sie durch die Elite-Universitäten Ludwig-Maximilians-Universität und Technische Universität München sowie einige Forschungszentren und -institute, darunter Max-Planck-, Helmholtz- und Fraunhofer-Institute. Hervorzuheben ist zudem das Biotech-Cluster München mit über 450 Life-Science-Unternehmen. Startups und junge Unternehmen können über verschiedene Gründerzentren von hochmodernen Labor- und Büroräumen sowie einem großen Netzwerk in dem Cluster profitieren. Die Kombination von staatlichen Universitäten und Instituten aber auch wirtschaftlichen Top-Unternehmen bildet einen optimalen Nährboden im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung (121).

In Berlin sind ebenfalls 12 % der untersuchten Akteure angesiedelt. Mit mehr als 21 % aller deutschen Biointelligenz-Startups wird Berlin seinem Ruf als Gründerzentrum gerecht (122). Einer der größeren Akteure ist InFarm. Das Unternehmen konzeptioniert und baut modulare Indoor-Farmen zum Anbau von Nahrungsmitteln und setzt dabei auf smarte Steuerung, umfassende Datenerfassung/-steuerung und den Einsatz von KI. Im Bereich der Medizintechnik bietet Berlin ein inspirierendes Umfeld für Innovation, Forschung und Entwicklung. Hier ist die Charité zu nennen, eine der größten Universitätskliniken Europas und Arbeitsort der Hälfte aller deutschen Nobelpreisträger für Medizin und Physiologie (123). Ein Beitrag zur Entwicklung dieses Sektors ist das Unternehmen TissUse, deren Technologieplattform die Nachbildung von menschlichen Geweben und Organen in einer Laborumgebung für die Durchführung von Arzneimitteltests und toxikologischen Studien ermöglicht. Berlin verfügt mit seinen Forschungseinrichtungen über eine ausgeprägte Forschungslandschaft, zu der die Gemeinschaften Leibniz und Helmholtz sowie die Gesellschaften Max-Planck und Fraunhofer gehören.



#### Vereinigtes Königreich und Irland

Im Vereinigten Königreich und Irland (UK/IE) haben 13 % aller Akteure ihren Hauptsitz. Mit 60 % Kleinst- oder Kleinunternehmen verzeichnet UK/IE im Vergleich zu den anderen Ländern einen signifikant höheren Anteil von Kleinst- und Kleinunternehmen unter den identifizierten Akteuren. Lediglich 25 % gehören zu

den mittelgroßen und Großunternehmen. Das Durchschnittsalter der Unternehmen liegt bei 15 Jahren. 43 % der Unternehmen sind nicht älter als 10 Jahre und 26 % haben ein Alter zwischen 10 und 15 Jahren. Das zeigt, dass sich relativ junge Unternehmen mit dem Thema biointelligente Wertschöpfung beschäftigen. Jedoch zeigt es auch, dass UK/IE nicht direkt zu den Vorreitern dieses Themas zählt. Auffällig ist auch hier die sehr geringe Quote an Startups von lediglich 8 %. Allerdings ist festzuhalten, dass 67 % der Startups in den ersten fünf Jahren über das Stadium eines Kleinstunternehmens hinauswachsen, deutlich mehr als in den USA und im internationalen Durchschnitt. Dies spricht für größere Erfolgchancen von Startups. Der Anteil der Universitäten und Forschungseinrichtungen im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung liegt bei 14 %, während sich der Anteil der Netzwerke auf 1 % beläuft.

Bezüglich der Bedürfnisfelder ist zu erkennen, dass 66 % der britischen Akteure im Bereich Gesundheit tätig sind. Dies entspricht etwas mehr als dem internationalen Schnitt. Bei Ernährung ist mit 31 % ein ähnliches Bild zu erkennen. Auch die anderen Bereiche Konsum (27 %), Energie (18 %) und Wohnen (15 %) sind leicht überdurchschnittlich. Dies lässt darauf schließen, dass in UK/IE verstärkt Unternehmen ansässig sind, die in mehreren Bedürfnisfeldern arbeiten.

Bei der Verteilung der Akteure fallen insbesondere die Regionen London, Cambridgeshire und Oxfordshire ins Gewicht. In London sind 40 % der UK/IE-Akteure verortet. London ist das zweitwichtigste Finanzzentrum der Welt, was diesen hohen Wert begünstigt (115). Die Nähe von hochqualifizierten Bildungseinrichtungen wie das London Imperial College, das University College oder das King's College ist entscheidend für die Attraktivität der Region bei Akteuren der biointelligenten Wertschöpfung. Insbesondere der Einsatz in der Arzneimittelentwicklung und in der Diagnostik ist vielversprechend und weit fortgeschritten. Aber auch Workflow-Optimierung von Kliniken und anderen medizinischen Einrichtungen stehen im Mittelpunkt der Entwicklungsarbeit (125).

In Cambridgeshire sind 18 % aller UK/IE-Akteure ansässig. Ein wichtiger Standortfaktor ist die Cambridge University, welche zu den Top-drei Bildungseinrich-



**Faber Futures.** Die multidisziplinäre Agentur mit Sitz in London arbeitet an der Schnittstelle von Natur und Technologie. Ziel ist es, alternative Materialien und Produktionsmodelle zu etablieren. Gemeinsam mit Gingko Bioworks wurde das Projekt Scale, Void, Assemblage 001 gestartet. Hier wurde ein Ansatz für eine neue ressourceneffiziente Biofabrikationsmethode zur Herstellung, Färbung und Musterung komplexer Textilprodukte entwickelt (126).

tungen der Welt gehört (126). Auch im für die biointelligente Wertschöpfung wesentlichen Teilbereich Biotechnologie ist die Universität aktiv. Gemeinsam mit dem John Innes Centre soll ein britisches Zentrum für synthetische Biologie errichtet werden. Die Forschungsinitiative hat das Ziel, neue Technologien und mögliche Modelle für nachhaltige Landwirtschaft, Landnutzung und Bioproduktion zu erforschen (127). Mit 33 % der UK/IE-Startups sind hier vergleichsweise viele junge Unternehmen angesiedelt. In Oxfordshire sind weitere 9 % aller UK/IE-Akteure verortet. Auch

hier ist die University of Oxford ausschlaggebend, die momentan weltweit den ersten Rang unter allen Bildungseinrichtungen einnimmt (119). Die Quote der UK/IE-Startups in Oxfordshire beträgt 17 %. Ein Beispiel für Akteure aus der Region Oxfordshire ist das Unternehmen Green Biologics Ltd. Es nutzt Bioreaktoren, um wichtige Grundstoffe der Chemie für alltägliche Konsumprodukte auf eine alternative und nachhaltige Art herzustellen. Darunter fällt z. B. die Synthese von n-Butanol und Aceton durch mikrobiologische Fermentation.



**BioIndustry Association** ist ein Netzwerk-Akteur zur Förderung des Wachstums- und Innovationspotenzials des Biotechnologiesektors. Durch die Etablierung von Kooperationen mit Unternehmen, Wissenschaftsakteuren sowie staatlichen Institutionen soll eine Umgebung geschaffen werden, die die Forschung, Entwicklung und die Vermarktung von biopharmazeutischen, medizinischen und anderen biotechnologischen Produkten unterstützt.



#### Israel

In Israel (IL) sind 8 % aller identifizierter Akteure verortet. Davon sind 88 % Kleinst- oder Kleinunternehmen, womit die Quote bedeutend höher ist als im internationalen Vergleich. Mittelgroße und Großunternehmen machen lediglich 10 % aus. Der Anteil an Forschungseinrichtungen ist mit 2 % auffällig gering. Netzwerke der biointelligenten Wertschöpfung wurden nicht gefunden. Daraus lässt sich ableiten, dass Entwicklungsarbeit und Forschung in

Israel eher in den Unternehmen selbst vorgenommen wird. Dies könnte darin seinen Ursprung haben, dass in Israel eine ausgeprägte Kultur der Unternehmensentwicklung und Innovation herrscht, wodurch viele Studierende bereits während ihres Studiums dazu angeregt werden, eigene Unternehmen zu gründen (128). Die Startup-Quote liegt bei 30 % und damit deutlich über dem internationalen Schnitt der betrachteten Länder. Das durchschnittliche Unternehmensalter liegt bei lediglich 9 Jahren. 76 % der Unternehmen sind nicht älter als 10 Jahre und 12 % weisen ein Alter

zwischen 10 und 15 Jahren auf. In Summe sind in Israel also deutlich jüngere und kleinere Unternehmen im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung tätig. Neben dem insgesamt jungen Alter des Landes könnte ein Grund dafür die Unterstützung der Israel Innovation Authority (IIA) sein. Als Regierungsagentur treibt sie Innovationen und Technologieentwicklungen voran, um durch die Zusammenarbeit von Unternehmen, Startups und Forschungseinrichtungen die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit des Landes zu stärken. Die IIA unterstützt innovative Projekte und Technologien in verschiedenen Branchen, wie bspw. High-Tech, Biowissenschaften oder Agrartechnologie und bietet finanzielle Unterstützung bei der Entwicklung neuer Produkte und Lösungen. Das kann ein Grund dafür sein, dass 67 % der Startups in den ersten fünf Jahren über den Status eines Kleinstunternehmens hinauswachsen. Durch die Innovationskultur sowie den großen Talentpool, der durch ein geringes Alter, hohe Motivation sowie Praxiserfahrung und sehr gute Ausbildung hervorsteht, zählt Israel zu einem der global führenden High-Tech- und Innovationshubs. Dies macht das Land für Direktinvestitionen sehr attraktiv und ist der Grund dafür, dass Israel weltweit das höchste Risikokapital pro Kopf besitzt (129). Diese Investitionen kommen meist aus dem Ausland oder von privaten Geldgebern, während geringere Summen durch lokale Institutionen beigesteuert werden (130). Ein weiterer Grund für die hohe Startup-Quote ist die exzellente Ausstattung mit Risikokapital, welche relativ gesehen sogar höher als in den USA ist (0,3 % vs. 0,2 % des BIP). Israel ist zudem sehr gut an den US-Risikokapitalmarkt angebunden. Gleichzeitig unterstützt das Land die Szene mit niedrigen Steuern und staatlichen Förderprogrammen. Ferner existiert in Israel eine spezielle risikofreudige Gründerkultur, die das Entstehen von Startups fördert (110).

Das Bedürfnisfeld Gesundheit wird in Israel lediglich von 43 % der Akteure abgedeckt, was im internationalen Vergleich gering ist. Dahingegen sind 39 % im Bereich Ernährung tätig. In den Feldern Konsum (18 %), Wohnen (6 %) und Energie (4 %) sind die Werte wiederum deutlich unter dem Schnitt. Es ist erkennbar, dass sich die Akteure der biointelligenten Wertschöpfung in Israel vergleichsweise stärker auf Ernährung fokussieren. Dies könnte darauf zurückzuführen

sein, dass die ausreichende Versorgung mit Nahrung im Allgemeinen bzw. mit spezifischen Nährstoffen in Israel bzw. dem Nahen Osten eine größere Herausforderung darstellt als in Europa und Nordamerika (110).

Innerhalb des Landes bilden insbesondere die Regionen HaMerkez, Tel Aviv und HaZafon Hotspots für biointelligente Wertschöpfung. In der Region HaMerkez – auch bekannt als Central District – finden sich 50 % der israelischen Akteure. Diese Region zeichnet sich mit 73 % der Startups als das absolute Gründerzentrum Israels aus. Als Mittelpunkt kann hier Rehovot genannt werden. Im Norden der Stadt befindet sich der Tamar Science Park, in dem vor allem Unternehmen aus dem High-Tech-Sektor angesiedelt sind. Im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung hat dort z. B. das Weizmann-Institut für Wissenschaft seinen Sitz, welches sich mit der Grundlagenforschung im Bereich der Naturwissenschaften und Künstlicher Intelligenz beschäftigt. Interessante Beispiele sind das Center for Artificial Intelligence, das Azrieli Institute for Systems Biology oder das Nancy and Stephen Grand Research Center for Sensors and Security. Durch die breitgefächerten Forschungsbereiche kann das Institut als wichtiger Forschungsakteur für die biointelligente Wertschöpfung angesehen werden. In Tel Aviv sind nur 17 % der israelischen Akteure zu finden. Darunter lediglich 7 % der Startups, obwohl die Stadt für seine Gründerszene bekannt ist (110). Tel Aviv hat den höchsten Lebensstandard in Israel, was sich in den Mietpreisen, Lebensmittelkosten und anderen Ausgaben niederschlägt. Dies kann für Startups und junge Unternehmen eine finanzielle Belastung darstellen (131). In der Region HaZafon – auch als Nordbezirk bekannt – sind 12 % der israelischen-Akteure verortet. Hier sind lediglich 7 % der Startups zu finden. Der Nordbezirk gilt als qualifizierte Entwicklungszone, was im Rahmen des Steueranreizprogramms für neue Unternehmen bis zu zehn Jahre lang den Erlass der Körperschaftssteuer bedeutet. Jedoch ist dieses Programm meistens unterfinanziert (132). Die Region HaZafon verfügt über eine vielfältige Wirtschaftsstruktur, die verschiedene Branchen wie Hochtechnologie, Landwirtschaft, Maschinenbau und Chemie umfasst. Dies bietet Unternehmen die Möglichkeit, in verschiedenen Sektoren tätig zu sein und von Synergien zwischen diesen zu profitieren. In der Region Haifa

»Israeli startups rely on expanding into other markets, as the local market is too small to generate revenue levels which are attractive for Venture Capital investors. Consequently, the startup ecosystem is globally interconnected and familiar with expanding into other countries.«

Maayan Schreiber, Ourcrowd<sup>12</sup>

sind 10 % der Akteure ansässig. 13 % der israelischen Startups haben hier ihren Sitz. Die Region beherbergt renommierte Hochschulen und Forschungseinrichtungen, darunter die Universität Haifa und das Technion – Israel Institute of Technology. Das Technion ist ein Anziehungspunkt für Studierende der Natur- und Ingenieurwissenschaften, die sich für praktische technische Forschung und Entwicklung interessieren. Die Akteure haben somit Zugang zu relevanten Forschungs- und Entwicklungsressourcen sowie zu talentierten Absolventen.



#### Kanada

In Kanada sind, wie in Israel, 8 % aller in der Untersuchung identifizierten Akteure ansässig. Auch hier ist der Anteil der Kleinst- oder Kleinunternehmen mit 76 % hoch. Mittelgroße und Großunternehmen machen nur einen Anteil von 24 % aus. Das Durchschnittsalter der Unternehmen liegt bei zwölf Jahren. 50 % der Unternehmen sind jünger als zehn Jahre und 24 % haben ein Unternehmensalter zwischen zehn und 15 Jahren. Das zeigt, dass relativ junge Unternehmen im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung tätig sind. Zudem ist hier die sehr geringe Quote an Startups von lediglich 7 % auffällig. Allerdings ist festzuhalten, dass alle identifizierten Start-

ups in den ersten fünf Jahren über das Stadium eines Kleinstunternehmens hinausgewachsen sind, was einem deutlich höheren Wert entspricht als in den USA, Deutschland und dem internationalen Durchschnitt. Der Anteil der Forschungseinrichtungen liegt bei 13 %. Netzwerke für eine biointelligente Wertschöpfung konnten nicht identifiziert werden. Bezüglich der Bedürfnisfelder ist zu erkennen, dass 74 % der Akteure im Bereich Gesundheit tätig sind, was sich u. a. auf die Spitzenforschung der kanadischen Forschungseinrichtungen in diesem Bereich, aber auch durch die alternde Bevölkerung erklären lässt. In den letzten Jahren hat sich zudem das Bewusstsein für gesunde Ernährung und Lebensmittelqualität in Kanada

erhöht. Dies spiegelt sich, auch in der Entwicklung biointelligenter Technologien und Produkte im Ernährungsbereich wider. In diesem Bereich sind 33 % der Akteure tätig. Auch die weiteren Bereiche Konsum (22 %), Energie (15 %) und Wohnen (11 %) sind leicht überdurchschnittlich vertreten.

Betrachtet man die Verteilung der Akteure im Land, so finden sie sich hauptsächlich in Ontario und Québec sowie in British Columbia. In Ontario haben 37 % der kanadischen Akteure ihren Hauptsitz. Durch das vielseitige Industrieumfeld mit Sektoren wie Fertigung, Technologie, Finanzdienstleistungen, Gesundheitswesen oder Bildung bietet der Bundesstaat Unternehmen die Möglichkeit, von verschiedenen Märkten und Ressourcen zu profitieren. Dort befindet sich z. B. die University of Toronto, die auf der Weltrangliste Platz 22 belegt (133). Außerdem werden durch die unmittelbare Nähe zu den USA der Handel und die Logistik für Unternehmen erleichtert.

In Québec, der flächenmäßig größten Provinz Kanadas, sind 27 % der Akteure verortet. Auf Seiten der Netzwerke ist hier insbesondere BIOQuébec hervorzuheben. Deren Ziel ist es, den Standort Québec als internationalen Leitanbieter für Biotechnologie und Lebenswissenschaften, also zwei der drei Teilbereiche der



Das Unternehmen **pondtech** kultiviert Algen in großen Bioreaktoren, die so konstruiert sind, dass sie die Zufuhr von CO<sub>2</sub> oder Nährstoffen automatisch regulieren und so den Bedarf an manueller Überwachung reduzieren. Die automatische Steuerung von Beleuchtung durch weitere Sensorik ermöglicht die Einstellung optimaler Wachstumsbedingungen. Bereits nach wenigen Tagen sind die Algen erntereif und können wie jede andere Pflanze zu marktfähigen Produkten verarbeitet werden. Ein weiterer Vorteil des Systems ist die Möglichkeit der Integration in bestehende Industrieanlagen sowie die erhebliche Bindung von CO<sub>2</sub>-Emissionen.

biointelligenten Wertschöpfung, zu etablieren. Dabei unterstützt das Netzwerk seine 172 Mitglieder u. a. mit verschiedenen Veranstaltungsformaten und der Vertretung in der Politik. Québecs Unternehmen fokussieren sich vor allem auf Biopharmazeutika (134). Über 30 Hersteller haben hier ihren Sitz, u. a. Galderma, GlaxoSmithKline, Merck, Pfizer oder Sandoz. Viele dieser Unternehmen setzen vor allem auf Kooperationen mit weltweit führenden Unternehmen. So bestehen Partnerschaften der Unternehmen Alexion und Enobia, Bayer AG und EndoCeutics, GlaxoSmithKline und Angiochem oder Mitsubishi und Medicago. Zudem prägen die umfangreichen Ressourcen die Wirtschaft. Insbesondere die Holz- und Energieindustrie sind aufgrund der vielen Seen, Flüsse und Wälder stark vertreten (135). Die üppige Bewaldung birgt zudem weitere Potenziale bei der energetischen Verwertung von Biomasse. Der Ressourcenreichtum spiegelt sich auch in den angesprochenen Bedürfnisfeldern der biointelligenten Technologien wider: Hier sind hauptsächlich Wohnen, Energie sowie Gesundheit vertreten. In jüngster Zeit hat Québec selbst einen Strategieplan für Life Sciences von 2022 bis 2025 aufgelegt (136). Während dieser hauptsächlich darauf ausgerichtet ist, den Gesundheitssektor für Herausforderungen vorzubereiten und international zu stärken, sind als wichtige Schritte u. a. die Entwicklung biologischer Produkte und die Anwendung von KI vorgesehen. Dementsprechend existieren für die Etablierung von Unternehmen verschiedene Förderprogramme, z. B. das BioMes Propulsion Programm (137). Dies kommt den Unternehmen der biointelligenten Wertschöpfung in Québec

zugute. Kanadas zweitgrößtes Gebiet beherbergt zudem 18 Hochschulen bzw. Universitäten, die international bekannt sind, unter ihnen z. B. die Universität Montreal, die Concordia University, Université du Québec á Montréal und die McGill. Die Verbindung zwischen Anwendung und Forschung in der Biotechnologie schafft z. B. BIOTECH CITY. Das Zentrum für Biotechnologie und Biowissenschaften in Montreal besteht aus biopharmazeutischen Unternehmen und Forschungsinstituten und fördert die interuniversitäre Zusammenarbeit und wissenschaftliche Kooperation.

In British Columbia haben 23% der kanadischen Akteure ihren Hauptsitz. Die Wirtschaft vor Ort ist vielfältig, jedoch hauptsächlich durch den Dienstleistungssektor geprägt. Ähnlich wie Québec liegt der wirtschaftliche Schwerpunkt auf der Rohstoffgewinnung insbesondere auf Holzschlag, Landwirtschaft und Bergbau. Die Provinz ist Standort von 1.150 Unternehmen, die in der Biotechnologie und dem Life-Science-Sektor involviert sind und beschäftigt 17.000 Menschen (138). Fokuspunkt ist die Stadt Vancouver, die Vertreter wie AbCellera Technologies und STEM-CELL Technologies beheimatet. British Columbia hat zudem mehrere Universitäten, darunter die University of British Columbia, die mehrere interdisziplinäre Studiengänge in Teilbereichen der biointelligenten Wertschöpfung anbietet.



## China

China hat in den letzten Jahrzehnten eine der schnellsten Wirtschaftswachstumsraten weltweit erlebt. Dieses Wachstum wurde von einer umfangreichen Industrialisierung und Urbanisierung angetrieben. Verstärkt wurde in Technologie und Innovation investiert, was das Land zur Heimat vieler führender Technologieunternehmen machte. Im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung lassen sich in China 3% der Akteure weltweit mit englischsprachigem Internetauftritt finden. Die meisten Akteure finden sich in den Regionen Shanghai und Guangdong. Shenzhen in der Provinz Guangdong ist ein wichtiger Technologie- und Elektronikherstellungsstandort. Die Stadt wird oft als „Silicon Valley von China“ bezeichnet. Shanghai ist u. a. Heimat des Zhangjiang Hi-Tech Park, einem wichtigen Standort für Technologie und Innovation. Der Park fördert Forschung und Entwicklung in Bereichen wie Biotechnologie, Halbleiter, KI und innovative Fertigungstechnologien. Bei den Akteuren finden sich zu einem Drittel Forschungseinrichtungen. Die anderen Akteure sind Unternehmen, die sich homogen in Kleinunternehmen, Großunternehmen und mittlere Unternehmen aufteilen. In China ist vor allem die Gesundheitsbranche im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung stark vertreten – rund 68% der Akteure sind hier tätig.

Insgesamt fällt auf, dass China in den betrachteten Kriterien und bezogen auf die Bevölkerungszahl nicht auf dem gleichen Niveau wie Nordamerika und Europa agiert. Dies ist zum Teil darauf zurückzuführen, dass China in den Ergebnissen der Untersuchung unterrepräsentiert ist. Ein signifikanter Einflussfaktor für die Unterrepräsentation Chinas ist der protektionistische Charakter der chinesischen Informationspolitik. Restriktive Regelungen und die beschränkte Bereitschaft zur Offenlegung von Daten erschweren den Zugang ausländischer Forschenden zu relevanten chinesischen Quellen, wodurch eine latente Wissensklüft entsteht. Der Protektionismus erstreckt sich auch auf neue Technologien und Anwendungen. So

»China likes planning. We have a long-term plan to 2050 and we also have 5-year plans. In these plans the government already specified the areas in which investments are intended.«

Zhichong Wang, CAU<sup>13</sup>

versucht China zunehmend, den eigenen Binnenmarkt zu stärken und weniger hochtechnologische Anwendungen zu exportieren (139, 140). Vor diesem Hintergrund wurden in den letzten Jahren internationale Kooperationen eingeschränkt, so dass insgesamt weniger Wissen über die Aktivitäten Chinas in der Forschungs- und Entwicklungslandschaft vorhanden ist. Die Sprachbarriere stellt einen weiteren maßgeblichen Grund dar. Die chinesische Sprache wirkt nicht nur als Hindernis für ausländische Forschende, auch die Verpflichtung, Forschungsergebnisse in Chinesisch zu veröffentlichen, verstärkt diese Barriere und mindert die internationale Sichtbarkeit chinesischer Forschungsergebnisse. Nach einer neuen Regelung im Jahr 2020 fokussiert sich die Forschungslandschaft in China zunehmend auf chinesische Journals, welche zwar in hoher Qualität, aber in chinesischer Sprache publizieren (141).

Auch nach Einbezug der Unterrepräsentation Chinas in den Ergebnissen dieser Untersuchung, bleibt eine Lücke zu westlichen Staaten. Generell kann konstatiert werden, dass China (noch) nicht dieselben Forschungskapazitäten und -qualitäten wie Europa und Nordamerika aufweisen kann. Es besteht eine Abhängigkeit von westlicher Grundlagenforschung (142). Insbesondere bei der Anwendung von Technologien bestehen Herausforderungen, wie sie bei der Entwicklung der chinesischen COVID19-Impfstoffe deutlich wurden. Neben mangelnder Grundlagenforschung und Erfahrung fehlt es an Risikobereitschaft, innovative Wege zu verfolgen (143). Gleichzeitig ist der Transfer von Wissen zwischen Universitäten und der

Wirtschaft in China wenig ausgeprägt. Häufig werden in China noch westliche Produkte und Technologien nachgeahmt und kostengünstiger oder sogar qualitativ besser produziert (z. B. „me-too drugs“). Dies liegt nicht zuletzt am Fachkräftemangel, der in China seit Jahren besteht und auf Probleme im Bildungssystem zurückzuführen ist. Trotz der genannten Mängel und Hindernisse ist zu erkennen, dass es China Stück für Stück gelingt, die Lücke zu westlichen Nationen zu schließen. Das Land hat dabei massive Anstrengungen unternommen, welche auf ein weiteres Wachstum, insbesondere in der Biotechnologie, ein Teilbereich der Biointelligenz, schließen lassen. China hat den aufkommenden Fachkräftemangel früh erkannt und Gegenmaßnahmen eingeleitet, um das chinesische Bildungs- und Berufsausbildungssystem (teilweise nach dem deutschen dualen System) zu reformieren (140).

Die zentralen Pfeiler des erwarteten Wachstums in China, bezogen auf die biointelligente Wertschöpfung, sind die Fünf-Jahres-Pläne und die Made-in-China-2025-Strategie. Diese zielen darauf ab, die chinesische Wirtschaft in zehn Schlüsselsektoren (darunter Biotechnologie) durch massive Förderung und Erleichterungen zum Markt- und Innovationsführer zu entwickeln (142, 144). In der zweiten Phase dieser Strategie will China bis 2035 führend in allen zehn Feldern sein. Der Fünf-Jahres-Plan konzentriert sich auf die Bereiche Biomedizin, Biolandbau, Bioenergie und Bioproduktion sowie Biosicherheit (145). Der Bereich Biomedizin befasst sich zentral mit der Pharmazeutika-Forschung, fortgeschrittenen diagnostischen und therapeutischen Technologien und Geräten sowie biomedizinischen Materialien. In der Biomedizin wird ein First- oder Best-in-Class-Ansatz verfolgt, der die Risikobereitschaft und die Zahl innovativer Zulassungen deutlich erhöht hat. Der Forschungsschwerpunkt ökologische Landwirtschaft hat zum Ziel, die Ernährung in China zu diversifizieren. Im Kontext der Bioenergie und Bioproduktion liegt der Fokus auf der Erforschung von biobasierten Materialien, der Entwicklung neuer Fermentationsprodukte, der Nutzung von Biomasse-Energie und dem Aufbau eines technologischen Systems für das Recycling von Biomasse. Diese Bemühungen zielen darauf ab, die Produktion und Anwendung im großen Maßstab zu beschleunigen und den Einsatz von Biotechnologie in

Branchen wie Chemie und Pharmazie zu fördern bzw. allgemein die Innovationskapazität Chinas in all diesen Bereichen erheblich zu steigern. Zudem soll durch den Fünf-Jahres-Plan das öffentliche Bewusstsein für Biotechnologie (die Grundsäule für eine biointelligente Wertschöpfung) gestärkt werden.

Allgemein ist der angestrebte hohe Grad an Kooperation zwischen High-Tech-Unternehmen innerhalb des Landes, die verschiedene Technologien zusammenführen und Synergien nutzen, besonders interessant. Diese Entwicklung hat sich in den letzten Jahren deutlich verstärkt (145). In diesem Zusammenhang ist die örtliche Zusammenfassung von Industrien in Inkubatoren-Clustern hervorzuheben, bspw. gibt es für den Bereich Biomedizin sieben Städte, in welchen ein Großteil der Unternehmen angesiedelt ist. Auch in anderen Bereichen der Biotechnologien gibt es Forschungs- und Entwicklungszentren bzw. Innovationscluster, die den jeweiligen Untersektor vorantreiben sollen (148). Hervorzuheben sind in diesem Kontext das Chongqing Research Institute of Biointelligent Manufacturing sowie das AI Industry Research Institute der Tsinghua University. Ziel des Chongqing Research Institute ist die Nutzung einer intelligenten und vernetzten Herstellung zum Schutz von Leben und Gesundheit, mit Fokus auf biomedizinische Materialien, biomedizinische intelligente Geräte, klinische implantierbare Produkte und Bioprinting-Technologie, wobei der Schwerpunkt auf den Schlüssel- und Kerntechnologien und Produktionssystemen der biomedizinischen Fertigung und neuen medizinischen Geräten liegt. Das AI Industry Research Institute fokussiert sich ebenso auf biomedizinische Forschung in den Bereichen personalisierte Medizin, Proteinstrukturanalyse und -vorhersage sowie Automation in Bioproduktionslaboren. Zudem wurde eine generative KI „BioMedGPT“ entwickelt (146), welche bei der biomedizinischen Forschung unterstützen soll.

Die laufende Transformation der chinesischen Wirtschaft zeigt bereits erste Erfolge der neuen Strategie. Im Biopharmasektor haben sich die Umsätze in den letzten Jahren vervielfacht. Die High-Tech-Sektoren an der Schnittstelle von Bio-, Ingenieur-, und Informationswissenschaften wachsen deutlich stärker als die chinesische Gesamtwirtschaft (140, 143, 147). Ein maßgebli-

cher Baustein für die Transformation der chinesischen Wirtschaft ist das dazu notwendige Kapital. Seit 2015 haben Investoren knapp 220 Mrd. USD in die chinesischen Biotechnologiesektoren investiert (143). Zuletzt konnte durch mehr Kapital als in den USA akquiriert

werden (151). Die Regierung selbst investierte zuletzt 4 Mrd. USD in Biotechnologie (145). Darüber hinaus werden Produkte und Technologien zum Teil stark subventioniert, was zu erheblichen Vorteilen auf dem Binnenmarkt und den Exportmärkten führt.



Das **Dutch Biorefinery Cluster** in Eerbeek hat sich auf die effiziente Nutzung und Verarbeitung biobasierter Ressourcen spezialisiert. Die Koalition aus Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Regierungsstellen hat das Hauptziel, biologische Rohstoffe wie Pflanzen, Algen und Abfallprodukte in Produkte und Energieträger umzuwandeln. Dazu zählen z. B. Biokraftstoffe, Chemikalien und Nahrungsmittel. Mit dem Cluster sollen Innovationen gefördert und nachhaltige Lösungen entwickelt werden, um so zur Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks und zur Förderung der Kreislaufwirtschaft beizutragen.



#### Weitere Leitländer

In den anderen sechs untersuchten Leitländern sind insgesamt 18 % der Akteure ansässig. Etwa 5 % davon haben ihren Hauptsitz in den **Nieder-**

**landen**. Rund 53 % der niederländischen Unternehmen gehören zu den Kleinst- oder Kleinunternehmen, 36 % machen mittelgroße und Großunternehmen aus. Das Durchschnittsalter der Unternehmen liegt bei 26 Jahren. Universitäten und Forschungseinrichtungen sowie Netzwerke machen jeweils einen Anteil von 6 % aus. Vor allem die Region Nordholland mit 41 % der niederländischen Akteure kristallisiert sich als Zentrum für die biointelligente Wertschöpfung heraus. Diese Provinz gilt als wirtschaftlich stark und besitzt das höchste BIP der Niederlande (149). Außerdem befinden sich dort die Häfen Rotterdam und Amsterdam sowie der fünftgrößte Frachtflughafen Europas. Zu den wichtigsten Sektoren der Wirtschaft zählt u. a. die Landwirtschaft (150). Das spiegelt sich auch im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung wider: 41 % der Akteure befassen sich mit dem Thema Ernährung, 53 % der Akteure können der Gesundheitsbranche zugeordnet werden, 32 % der Branche Konsum, 21 % sind im Energiesektor tätig und 12 % im Bereich des Wohnens.



In **Australien** beschäftigen sich 4 % der Akteure weltweit mit der Entwicklung biointelligenter Technologien und Produkte. Insgesamt sind 64 % aller Akteure in Australien Kleinst-

oder Kleinunternehmen, Mittelgroße und Großunternehmen machen lediglich 16 % aus. Der Anteil an Universitäten und Forschungseinrichtungen liegt mit 20 % im Vergleich zu den weiteren Leitländern über dem Durchschnitt. Forschungs- oder Unternehmensnetzwerke für eine biointelligente Wertschöpfung bestehen noch nicht. Bei der Analyse der Gründungsjahre der australischen Akteure fällt auf, dass diese mit einem durchschnittlichen Alter von zwölf Jahren jung sind. Außerdem sind 57 % der Startups bereits in den ersten fünf Jahren aus der Kategorie der Kleinstunternehmen erwachsen. Die Hotspots der australischen Akteure liegen in den Metropolen Sydney, Brisbane und Melbourne. Diese Verteilung der Akteure lässt sich auch auf die Verteilung der ansässigen Forschungseinrichtungen zurückführen, die die Potenziale für eine biointelligente Wertschöpfung unterstützen. Auch die Geographie des Landes spielt eine Rolle bei der Verteilung: Der Großteil der Bevölkerung Australiens lebt in den östlichen Bundestaaten New South Wales, Queensland und Vic-

toria (151). Zudem ist Australien eines der am stärksten urbanisierten Länder. Über 80 % der Bevölkerung lebt in Städten, davon 40 % in Sydney und Melbourne (151, 152). Die Mehrheit der australischen Akteure lässt sich dem Gesundheits- und dem Lebensmittelsektor zuordnen. Konkret beschäftigen sich 64 % mit der Entwicklung von Technologien im Gesundheitsbereich und 52 % mit der Entwicklung von Technologien im Lebensmittelbereich. Vor allem der hohe Anteil im Bereich Ernährung lässt sich dadurch erklären, dass die Landwirtschaft in Australien ein wichtiger Wirtschaftssektor ist und ca. 3 % des BIP ausmacht (153).



In **Finnland** finden sich hauptsächlich etablierte Akteure, deren Gründung mindestens zehn Jahre zurückliegt. Entsprechend gibt es dort wenige Startups im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung. Rund 33 % der Akteure lassen sich dem Bereich Konsum zuordnen. Der Konsum in Finnland spiegelt die Lebensweise der finnischen Bevölkerung wider, die stark im Einklang mit der Natur ist. Nachhaltiger Konsum gewinnt in Finnland an Bedeutung, und viele Verbraucher achten bei ihren Einkäufen auf Umweltfreundlichkeit und ethische Aspekte (154, 155). 17 % der Akteure beschäftigen sich mit der biointelligenten Wertschöpfung im Bereich der Ernährung. Entsprechend wird in Finnland viel Wert auf hochwertige Lebensmittel gelegt, die oft auch aus lokalem Anbau stammen. Zudem ist die Gesundheitsbranche mit 25 % der Akteure in Finnland vertreten. Hier ist auffällig, dass dieser Prozentsatz im Vergleich zu den weiteren Leitländern wesentlich geringer ist. Dies lässt sich mit dem weit verbreiteten Gesundheitsbewusstsein in Finnland erklären, was sich im verstärkten Konsum von Gesundheits- und Wellnessprodukten sowie Biolebensmitteln und Sportausrüstung zeigt. Akteure der biointelligenten Wertschöpfung lassen sich in Finnland fast ausschließlich in Espoo und Helsinki finden, was

durch die ungleiche Verteilung der Bevölkerung im Land zustande kommt. In der Provinz Südfinnland leben 40 % der Bevölkerung. Auch die nennenswerten Forschungsinstitute und Universitäten finden sich im Süden des Landes.

»In a small country as Finland, the strong ties between industries, universities, and research centers foster a co-creation culture. This collaboration, mandated by research funders' policies, necessitates the presence of companies in projects touching on practical applications alongside academic research.«

Jussi Manninen, VTT<sup>14</sup>



**Schweden** setzt ebenfalls auf eine nachhaltige und umweltfreundliche Energieerzeugung und ist führend in der Nutzung erneuerbarer Energien (24). Das Land nutzt zahlreiche Flüsse und Wasserfälle zur Energiegewinnung, womit Wasserkraft die größte Stromquelle des Landes ist. Insgesamt produziert Schweden mehr Energie als es verbrauchen kann und exportiert deshalb grüne Energie in die Nachbarländer, z. B. nach Deutschland. Dies spiegelt sich auch in der Recherche von Akteuren im Land wider: 29 % der 23 identifizierten Akteure sind im Energiesektor angesiedelt, 25 % befassen sich mit Entwicklungen in der Gesundheitsbranche und weitere 25 % mit Themen aus dem Ernährungssektor. 18 % der Akteure lassen sich der Branche Konsum zuordnen und nur 8 % dem Wohnen. Bei fünf der insgesamt 23 Akteure handelt es sich um Forschungsein-



**BICO Group** ist ein führender Anbieter für Life-Science-Lösungen und Laborautomatisierung. Das Unternehmen mit Hauptsitz in Schweden wurde 2016 gegründet und beschäftigt mehr als 1.000 Mitarbeiter weltweit und hat einen jährlichen Umsatz von 115 Millionen USD. Das Unternehmen ist in den Geschäftsfeldern Bioprinting, Biosciences und Bioautomation aktiv. Unter anderem stellt die BICO Group Biodrucker her, die bereits Einsatz in Forschungsprojekten gefunden haben, in denen z. B. In-vitro-Vollhautmodelle aus menschlichen Zellen hergestellt werden.

richtungen und Universitäten. Darunter sind bspw. die Swedish University of Agriculture Science in Uppsala, welche sich mit Agrarwissenschaften, Forstwissenschaften und Umweltwissenschaften befasst, sowie die Forschungsorganisation Energiforsk mit Sitz in Stockholm mit Schwerpunkten in der Forschung und Entwicklung im Bereich Energie. Entsprechend der hauptsächlich Konzentration der Bevölkerung im Süden des Landes findet sich hier auch ein Großteil der Akteure, insbesondere in den Regionen Göteborg, Stockholm und Lund. Aufgrund ihrer Küstenlagen haben alle Zugang zum Meer und dessen Handelsverbindung.

In **Norwegen** gibt es acht Akteure, die der biointelligenten Wertschöpfung zugeordnet werden können. Bei drei von ihnen handelt es sich um Forschungseinrichtungen, u. a. die Norwegian University of Life

Sciences, welche für ihre Forschung im Bereich Landwirtschaft, Umwelt und nachhaltiges Ressourcenmanagement bekannt ist. Das Land erzeugt einen Großteil seines Stroms aus erneuerbaren Energiequellen wie Wasserkraft und exportiert überschüssige Energie in andere europäische Länder. Dies spiegelt sich auch in der Verteilung der Akteure auf die Branchen wider: 33 % der Akteure in Norwegen sind im Energiesektor tätig. Auch an der Entwicklung medizinischer Innovationen ist Norwegen aktiv beteiligt. So sind 33 % der Akteure in der Gesundheitsbranche tätig. Jeweils 17 % der Akteure lassen sich dem Sektor Konsum und Ernährung zuordnen. Ein Hotspot in Norwegen ist Trondheim, das für seine Innovationskraft bekannt ist. Es ist ein Zentrum für Technologieunternehmen, Startups und Forschungseinrichtungen, die sich auf Bereiche wie Energie, Technologie und Medizin konzentrieren.



**NCE Heidner Biocluster** wurde 2012 in Norwegen zur nachhaltigen Lebensmittelproduktion gegründet. Es hat das Ziel, die Wettbewerbsfähigkeit der norwegischen Bioökonomie auf nationaler und internationaler Ebene zu stärken. Im Cluster beteiligen sich Institutionen der Bioökonomie und Interessensorganisationen der norwegischen Landwirtschaft. Die Mitglieder befassen sich mit Genetik und Biotechnologie im Bereich der Tier- und Pflanzenzucht, nachhaltigen Rohstoffen und der Nutzung von Produktionsnebenströmen sowie Recycling.

## Aufstrebende Länder der biointelligenten Wertschöpfung

Im Rahmen der Untersuchung haben sich neben den definierten Leitländern weitere Nationen als wichtige Akteure herauskristallisiert, da sie in mindestens einer der drei Säulen der Biointelligenz, meist der Biotechnologie, stark sind. Damit haben diese Länder ebenso das Potenzial, in Zukunft ein führendes Land in der biointelligenten Wertschöpfung zu werden, da sie wesentliche Grundvoraussetzungen erfüllen. Dazu gehören Indien, Südkorea, Saudi-Arabien, Singapur, Japan, Italien und Südafrika. Neben den Einschätzungen der Experten zeigt auch die quantitative Analyse, insbesondere im Bereich der wissenschaftlichen Publikationen und Patentanmeldungen, die signifikante Rolle dieser Länder. Im Folgenden werden die wichtigsten Informationen zu Wirtschaft, Technologieentwicklung und Entwicklung zusammengefasst.

**Indien** gilt als aufstrebende Wirtschaftsmacht mit einer starken Entwicklung in verschiedenen Sektoren. Im Bereich der Informationstechnologie hat sich Indien als weltweit führender Outsourcing-Hub etabliert. Die aufstrebende Software- und IT-Branche trägt maßgeblich zur Wirtschaft des Landes bei. Indien investiert erheblich in die Forschung und Entwicklung, insbesondere im Gesundheitswesen und in der Biotechnologie (156, 157). Damit gilt Indien in der Biotechnologie als aufstrebend. Das Land hat sich auf die Entwicklung von Biopharmazeutika, Pflanzenbiotechnologie und Genomforschung konzentriert. Mit einer großen Zahl hochqualifizierter Fachkräfte und steigenden Investitionen in Forschungseinrichtungen wie dem Biotechnology Industry Research Assistance Council setzt Indien auf innovative biotechnologische Lösungen, um seine Position in diesem Sektor zu stärken. Die Förderung von Startups und die Schaffung eines günstigen Umfelds für Biotechnologieunternehmen tragen dazu bei, dass Indien in diesem Sektor weiter an Bedeutung gewinnt und einen wichtigen Beitrag zur weltweiten biotechnologischen Forschung und Entwicklung leistet (158). In diesem Zusammenhang ist damit zu rechnen, dass Indien in Zukunft ebenso ein Leitland für die Umsetzung der biointelligenten Wertschöpfung werden kann. Dies belegen die zahlreichen Publikationen und Forschungsaktivitäten in sechs der 17 BTF.

**Südkorea** hat sich in den letzten Jahrzehnten zu einer führenden Wirtschaftsnation entwickelt und zeichnet sich insbesondere durch seine starke Präsenz in den Bereichen Elektronik, Automobil und Halbleiter aus. Das Land setzt stark auf Forschung und Entwicklung in den Bereichen KI, Big Data und 5G-Technologie (159, 160). Die Regierung unterstützt diese Bemühungen aktiv, indem sie Anreize für Innovationen schafft und Investitionen in diese Schlüsselbereiche fördert. Darunter fällt z. B. das Tech Incubator Program for Startups Korea, bei dem der Fokus auf Forschung, Entwicklung und Kommerzialisierung liegt. Das Förderprogramm besteht seit 2013, soll weiter ausgebaut und durch einen zusätzlichen Fokus auf Deep-Tech ergänzt werden. Auch im Bereich der Biotechnologie investiert Südkorea zunehmend. Die Regierung hat Initiativen gestartet, um den Biotechnologiesektor zu stärken. Bis 2030 soll das Budget für grüne Biotechnologie verdreifacht werden, außerdem soll ein Green Bio Venture Campus ins Leben gerufen werden, der Biotech-Startups Forschungseinrichtungen, Ausrüstungen und Vernetzungsmöglichkeiten bereitstellt (161).

**Saudi-Arabien** befindet sich derzeit in einer Phase der wirtschaftlichen Diversifizierung und Modernisierung, um die Abhängigkeit von der Rohölförderung zu verringern. Der Entwicklungsplan Vision 2030 zielt darauf ab, die Wirtschaft zu diversifizieren und insbesondere den Technologiesektor, einschließlich KI und Biotechnologie (als zwei Säulen der biointelligenten Wertschöpfung), zu stärken. Im Bereich der Technologieentwicklung investiert Saudi-Arabien in digitale Innovationen, KI und das Internet der Dinge (IoT) (162). Die Schaffung von Innovationszentren, wie dem King Abdullah Financial District in Riad, unterstreichen das Bestreben, sich als Technologiehub zu positionieren. Saudi-Arabien verstärkt seine Präsenz im Bereich Biotechnologie durch gezielte Investitionen, um Biotechnologieunternehmen anzuziehen und Forschungsaktivitäten in den Bereichen Medizin und Landwirtschaft zu fördern. Das Land strebt aktiv danach, seine globale Position im Biotechnologiesektor zu festigen und innovative Ansätze zur Bewältigung vielfältiger Herausforderungen zu entwickeln (163).

**Singapur** ist eine der wohlhabendsten Nationen in Südostasien mit einer starken Wirtschaft, die von

Branchen wie Finanzdienstleistungen, Logistik und der High-Tech-Produktion getragen wird (168, 169). Zusätzlich fördert das Land aktiv den Ausbau von Forschung und Entwicklung in verschiedenen Sektoren und hat sich als attraktiver Standort für Deep-Tech Unternehmen etabliert (166). In Bezug auf Biotechnologie liegt in Singapur ein besonderer Fokus auf dem Bereich der Biomedizin. Das Land investiert aktiv in hochmoderne Forschungseinrichtungen sowie in Biotechnologieunternehmen. Die Biopolis, ein Biotechnologie-Forschungskomplex in Singapur, ist ein Beispiel für die Förderung des Landes. Singapur positioniert sich als regionales Zentrum für Life Sciences und Biotechnologie und zieht sowohl lokale als auch internationale Unternehmen an, die in diesen fortschrittlichen Technologiebereichen tätig sind (167). Neben der Biomedizin stellt das Bedürfnisfeld Ernährung einen Schwerpunkt in der Forschungs- und Entwicklungslandschaft von biointelligenter Wertschöpfung in Singapur dar. Ziel des „30 by 30“-Plans ist es, bis 2030 30 % der Nahrungsmittel nachhaltig, autark und lokal in der Metropole zu erzeugen (168). Die Stadt fungiert als Zentrum für lebensmittelzentrierte Risikokapitalgeber und beheimatet acht führende Entwicklungsprogramme für Startups im Bereich „agrifood“. Die Regierung steuerte bis heute insgesamt 230 Mio. USD zur Erforschung und Entwicklung von agrifood in Singapur bei. Darüber hinaus ist das 2019 gegründete Singapore Institute of Food and Biotechnology Innovation zu nennen, welches bis 2025 weitere 20 Mio. USD in den Sektor und lokale Startups investieren möchte (173). Bis heute ist Singapur das einzige Land, welches kultiviertes, im Labor erzeugtes Fleisch zum Verkauf und Verzehr zugelassen hat (170). Durch die liberale Ausgestaltung der Nahrungsmittel-Regulation sind genetisch modifizierte Lebensmittel und Inhaltsstoffe erlaubt (171).

**Japan** ist eine etablierte Wirtschaftsnation, die sich durch ihre Innovationskraft und Technologieführerschaft auszeichnet. Das Land hat eine lange Tradition der technologischen Entwicklung und ist international bekannt für seine hochentwickelte Elektronikindustrie, Automobilproduktion, Robotik und Soft-Robotik (172, 173). Im Bereich der Technologieentwicklung investiert Japan intensiv in Forschung und Entwicklung, insbesondere in Bereichen wie KI, Robotik, erneuer-

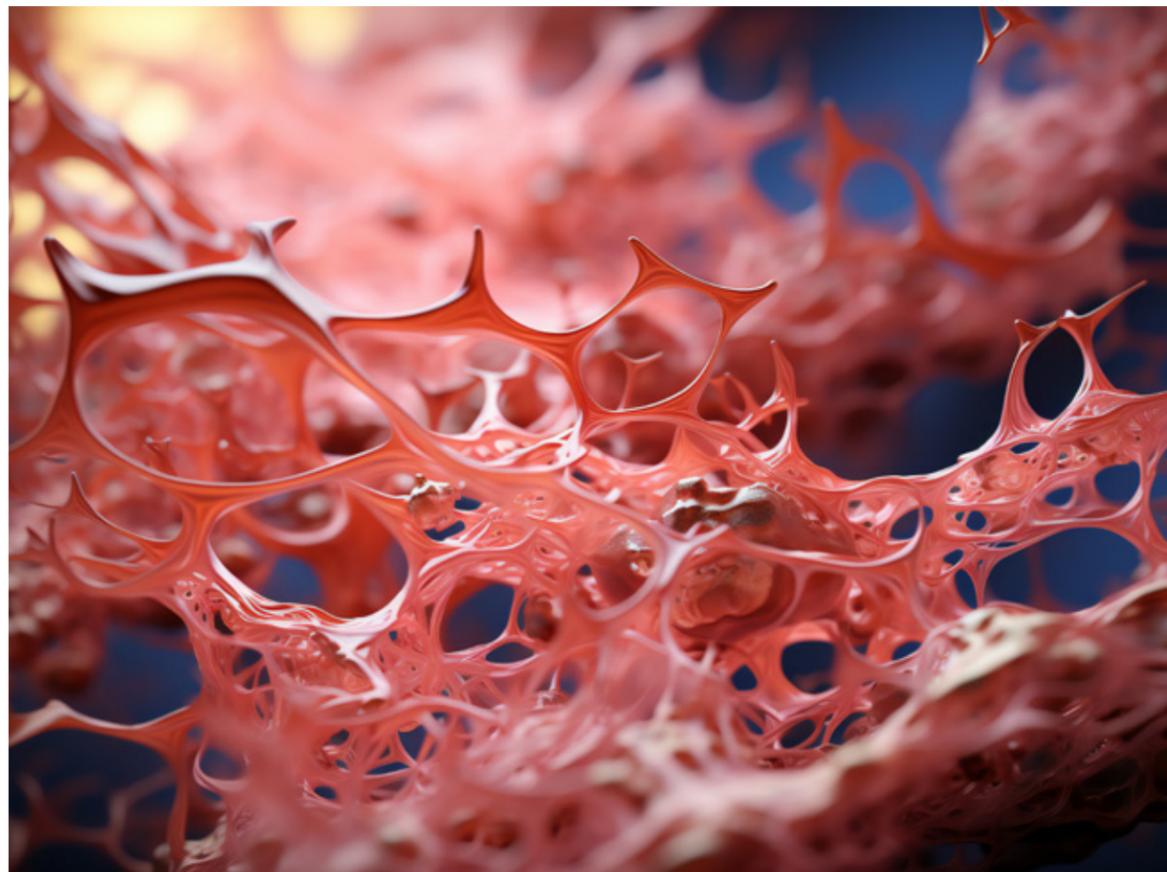
bare Energien und Fertigungstechnologien (174). In Bezug auf Biotechnologie widmet sich Japan der biomedizinischen Forschung, Stammzellforschung und Genomik. Die Regierung Japans verfolgt eine Bioökonomie-Strategie, um den Sektor bis 2030 auf 837 Milliarden US-Dollar zu entwickeln, mit Schwerpunkt auf Hochleistungs-Biomaterialien, nachhaltigen Produktionssystemen und medizinischen Technologien. Die Strategie umfasst auch Investitionen in Dateninfrastruktur, Politikentwicklung und globale Zusammenarbeit, um Forschungsumgebungen zu stärken (175). Im Jahr 2019 investierte die japanische Regierung etwa 6,2 Milliarden Yen (56 Millionen US-Dollar) für die Förderung von Biotechnologien (176).

**Südafrika** ist eine der stärksten Wirtschaftsnationen und der am weitesten entwickelte Industriestandort auf dem afrikanischen Kontinent. Nach der Biotechnologie-Strategie im Jahr 2001 wurde bereits 2008 für die Bioökonomie des Landes ein Entwicklungsplan aufgesetzt, dem mittlerweile eine Strategie folgte. Ziel ist es, durch den stärkeren Einsatz von Biotechnologie eine ganzheitliche Wertschöpfungskette zu schaffen, die am Bedarf des Landes und der Bevölkerung ausgerichtet ist, aber auch die internationale Wettbewerbsfähigkeit steigert. Als besonders relevant wurden die Branchen Gesundheit, Landwirtschaft und – erstmalig – auch die Industrie im Allgemeinen identifiziert (177). Während die Regierung seit der Strategieverabschiedung einige Innovationszentren gegründet und Initiativen für internationale Partnerschaften für Biotechnologie ergriffen hat, fehlt es südafrikanischen Forschern, u. a. infolge teurer ausländischer Patente, an einer unternehmerischen Kultur. Doch obwohl die Entwicklung des Privatsektors noch nicht weit fortgeschritten ist, gründen sich bereits Startups (178). Schwerpunkte im Biotechnologiesektor sind biomedizinischen Produkten sowie Umwelt- und Agrarbiotechnologie, um Herausforderungen in Gesundheit und Landwirtschaft zu lösen (179). Als etablierter Industrievertreter sei das Mineral und Metallurgie Unternehmen Mintek genannt, welches sich seit längerer Zeit mit Biometallurgie beschäftigt – einem Zweig der Metallgewinnung, bei dem mithilfe biologischer Prozesse Mikroorganismen und metallhaltige Mineralien zusammenwirken, um Metalle aus Erzen, Konzentraten und einer Reihe von Abfallstoffen zu gewinnen. Die Regierung inves-

tiert in Forschung und Entwicklung, besonders im Gesundheitswesen und der Biotechnologie. Hier sind Fortschritte in der Informationstechnologie und Digitalisierung zu betonen. Zudem ist aufgrund hoher Importkosten, schwieriger Verfügbarkeiten und einer hohen Krankheitsbelastung das Interesse der Regierung an einem eigenen resilienten biopharmazeutischen Sektor stark (178).

**Italien** zählt zu den führenden europäischen Ländern im Bereich der Biotechnologie, insbesondere im Gesundheitssektor. Hier setzen Unternehmen moderne biotechnologische Methoden ein, um Produkte für die Diagnose, Behandlung und Prävention von Krankheiten zu erforschen, zu entwickeln und herzustellen. Dies umfasst Arzneimittel, neue Therapien, Impfstoffe, Diagnostika sowie molekulare Pharming-Anwendungen. Innerhalb der „omic“-Disziplinen wie Genomik, Proteomik und Transkriptomik werden moderne biotechnologische Methoden angewendet, darunter Bioinformatik, Systembiologie, Biochips und

Biosensoren. In den Bereichen Industrie und Umwelt setzt Italien moderne biotechnologische Verfahren ein, um konventionelle Produktionsprozesse umzugestalten, erneuerbare Biomasse in bioerneuerbare Produkte und Energie umzuwandeln sowie Anwendungen in den Bereichen Lebensmittel, Kosmetik, Umweltdiagnostik und Sanierungssysteme zu entwickeln. Auch in der Landwirtschaft und Zootechnologie werden moderne biotechnologische Methoden genutzt, um Tier- und Pflanzenproduktion zu verbessern, die Produktivität und Qualität zu steigern sowie umweltfreundliche Produkte für den Pflanzen- und Tierschutz zu entwickeln. In den letzten Jahren wurden erhebliche Investitionen in wissenschaftliche Forschung getätigt, wobei Exzellenz-Zentren wie das Human Tecnopole in Mailand, der University Biomedical Campus in Rom, das Tecnomed Puglia (Technopole für Präzisionsmedizin) unter der Aufsicht der nationalen Behörde für Forschungs- und Entwicklungsarbeit und das Molecular Biotechnology Center der Universität Turin hervorstechen.



Die Anzahl an Akteuren im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung ist seit dem Jahr 2000 stark gestiegen. Die meisten Unternehmen sind Großunternehmen. Ein wesentlicher Teil der Innovation in diesem Bereich scheint demnach aus etablierten Konzernen zu stammen, welche genügend Kapital, Wissen und Ressourcen aufbringen können. Aber auch die ermittelte Startup-Quote liegt in den meisten Leitländern über dem jeweiligen Landesdurchschnitt. Demzufolge ist die starke Entwicklung von biointelligenten Technologien auch darauf zurückzuführen. Mehr als die Hälfte der Akteure bewegt sich im Bedürfnisfeld Gesundheit. Die USA sind mit über einem Drittel klarer Vorreiter, wobei sich Zentren der biointelligenten Wertschöpfung im Silicon Valley, in Massachusetts und in New York gebildet haben. Deutschland kann die zweitmeisten Akteure aufweisen, wobei dort ein überdurchschnittlicher Anteil an Forschungseinrichtungen identifiziert wurde. UK / IE, Israel und Kanada folgen mit einigem Abstand. Aus den restlichen Leitländern stammen nur wenige Akteure. Neben den im Detail analysierten Leitländern sind auch weitere Länder wie Italien, Singapur oder Südkorea mit ersten Ansätzen für die Umsetzung einer biointelligenten Wertschöpfung Aktiv.

<sup>11</sup> „Dies ist das Jahrhundert der Biologie. Sie wird die Welt genauso verändern wie die Informationstechnologie in den letzten hundert Jahren.“ (Steven Robinette, Atlas Venture)

<sup>12</sup> „Israelische Start-ups sind auf die Expansion in andere Märkte angewiesen, da der lokale Markt zu klein ist, um für Risikokapitalgeber attraktive Umsätze zu erzielen. Folglich ist das Ökosystem der Startups global vernetzt und mit der Expansion in andere Länder vertraut.“ (Maayan Schreiber, Ourcrowd)

<sup>13</sup> „China plant gerne. Wir haben einen langfristigen Plan bis 2050 und wir haben auch Fünf-Jahres-Pläne. In diesen Plänen hat die Regierung bereits die Bereiche festgelegt, in die investiert werden soll.“ (Zhichong Wang, CAU)

<sup>14</sup> „In einem kleinen Land wie Finnland fördern die engen Verbindungen zwischen Industrie, Universitäten und Forschungszentren eine Kultur der gemeinsamen Schaffung. Diese Zusammenarbeit, die durch die Politik der Forschungsförderer vorgeschrieben ist, erfordert die Präsenz von Unternehmen in Projekten, die sich neben der akademischen Forschung mit praktischen Anwendungen befassen.“ (Jussi Manninen, VTT)

# BEFÄHIGERTECHNOLOGIEN FÜR DIE BIOINTELLIGENTE WERTSCHÖPFUNG

Dieses Kapitel analysiert den gegenwärtigen Forschungsstand und die Anwendungspraxis der biointelligenten Wertschöpfung in den verschiedenen Befähigertechnologiefeldern.

Die Konvergenz der Lebens-, Ingenieur- und Informationswissenschaften eröffnet einen Innovationsraum, in welchem Technologien, Produkte, Dienstleistungen und Produktionsprozesse weiterentwickelt bzw. neu geschaffen werden. Innovative Technologien können hierbei zu alternativen Wertschöpfungskonzepten und -systemen, Geschäftsmodellen und Arbeitsweisen führen. In diesem Kontext ist der Einbezug verschiedener Perspektiven notwendig, welche bei einem Paradigmenwechsel zur biointelligenten Wertschöpfung mitgedacht werden müssen. Eine dieser Perspektiven ist die Dynamik in Wertschöpfungssystemen, welche sich an biologischen Prinzipien durch Inspiration, Integration und Interaktion ausrichtet. Bedeutend ist hierbei auch der Faktor Mensch, da sich Praktiken und Methoden durch eine biointelligente Wertschöpfung maßgeblich ändern können (z. B. durch Mensch-KI-Interaktion). Dies erfordert eine neue Ausrichtung von notwendigen Kompetenzen und deren Aufbau bzw. Übertragung auf Arbeitskräfte und weiteren Teilnehmern (z. B. Konsumenten/Privat Haushalte, nichtspezialisierte Produzenten/Anwender) (184). Hinsichtlich des Nutzerversprechens ist zu beachten, dass Produkte der biointelligenten Wertschöpfung teilweise alternative Geschäftsmodelle erfordern (z. B. Plattformökonomie). Aus Perspektive der Ressourcennutzung ist es elementar, dass Stoffkreisläufe und nachhaltige Materialalternativen in das Design von Produkten, Technologien und Dienstleistungen einbezogen werden. Hierunter fallen auch neuartige Konzepte, wie der Materialpass oder Ansätze der weißen Biotechnologie. Vernetzung und

Kollaboration stehen für die Flexibilisierung von Ökosystemstrukturen und den Einsatz von Konzepten der Systemmodellierung und Schwarmintelligenz. Zuletzt sind soziotechnische und methodische Innovationen zu nennen, welche die Art und Weise von Entwicklungs- und Produktionsprozesse transformieren und andere Anforderungen an die Mensch-Technik-Interaktion und Arbeitsergonomie stellen.

In diesem Zusammenhang wurden in dieser Untersuchung 17 Befähigertechnologiefelder definiert. Ein BTF umfasst einen für die identifizierten Einzeltechnologien kritischen Kernaspekt, der wesentlich zur Realisierung von biointelligenten Anwendungen beiträgt. *Abbildung 9* illustriert die 17 grundlegenden Felder der biointelligenten Wertschöpfung. Ergänzend werden die Anwendungskontexte hinsichtlich der Entwicklung, Herstellung und dem Einsatz je BTF beschrieben.

»To navigate the future, merging bio-economy and biotechnology competencies with digitalization and artificial intelligence is essential. As we embrace the fourth Industrial Revolution, the Bioeconomy, combining these elements, emerges as a key player.«

Jukka Kantola, WorldBioeconomyForum<sup>16</sup>

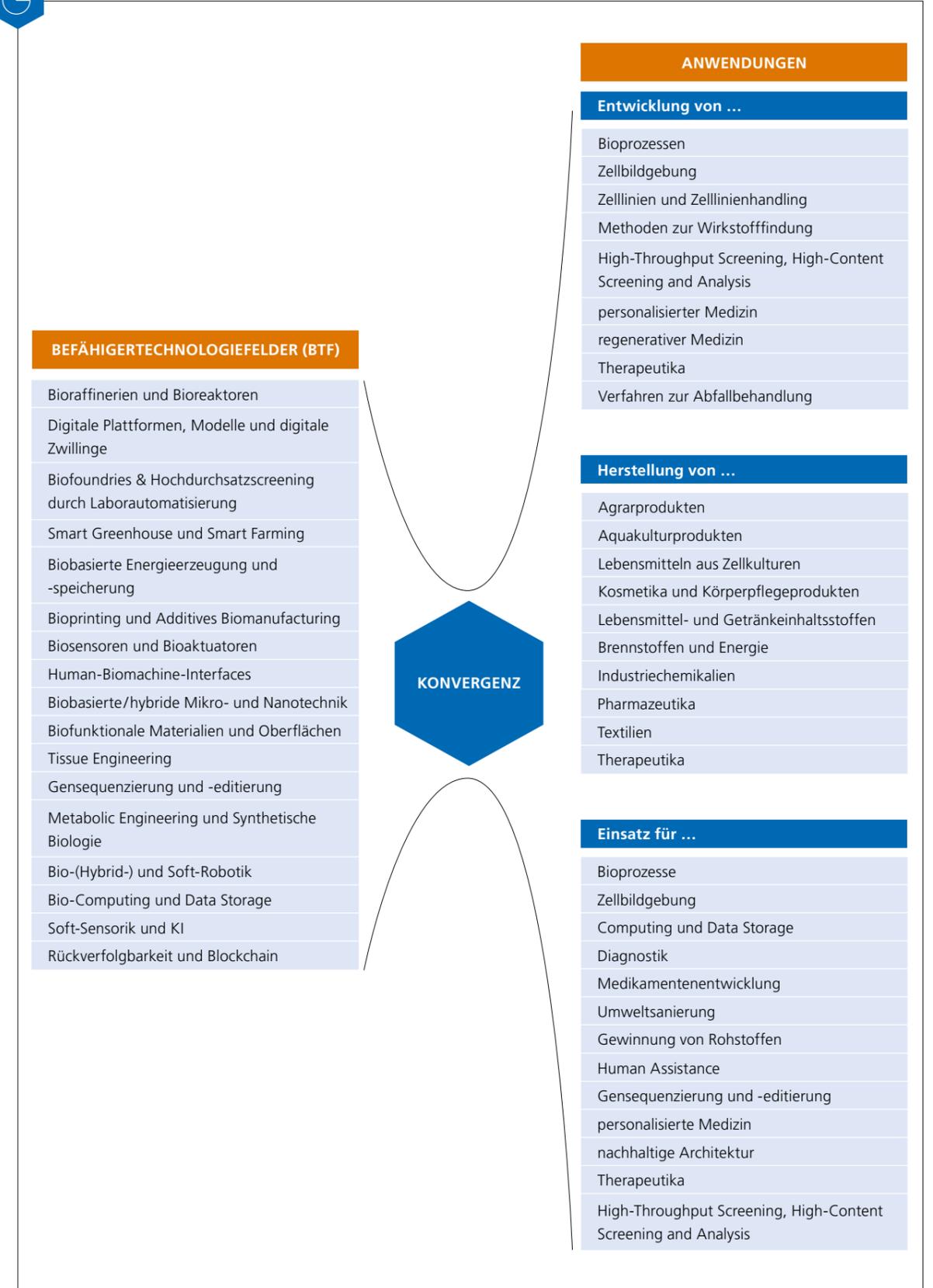


Abbildung 9: Ordnungsrahmen der biointelligenten Wertschöpfung.

Zur Bestimmung der Produktionsnähe und der Einschätzung zum aktuellen Biointelligenzgrad werden fortlaufend die einzelnen Technologien, Dienstleistungen und Produkte anhand einer Biointelligenzskala sowie eines Produktionsgrades bewertet. Ansätze der Stufe 3, 4 und 5 auf der Biointelligenzskala sowie einem Produktionsgrad ab Ebene 2 werden in dem folgenden Kapitel detailliert beleuchtet.

In den Leitländern wurden insgesamt 414 Technologien, Produkte und Dienstleistungen der biointelligenten Wertschöpfung identifiziert. 259 davon können entweder bereits als biointelligent eingestuft werden (Biointelligenzskala 4 und 5) oder befinden sich an der Schwelle hierzu (Biointelligenzskala 3). Die Ansätze verteilen sich zu 64% auf das Bedürfnisfeld Gesundheit, zu 37% auf Konsum, zu 33% auf Ernährung, zu 15% auf Wohnen und zu 14% auf Energie. Die Fülle an Technologien, Produkten und Dienstleistungen

im Gesundheitssektor resultiert vor allem aus der enormen Bedeutung, die der Gesundheitsbranche zukommt. Aufgrund der Größe dieses Marktes und der beträchtlichen finanziellen Mittel, die in den Bereich der Gesundheitsversorgung investiert werden, erleben technologische Innovationen hier eine beispiellose Dynamik. In der Regel steht hier bereits in der Forschung mehr Kapital zur Verfügung als in anderen Bereichen. Der Bereich Konsum ist hinsichtlich möglicher Anwendungen sehr breit gefasst, weswegen hier ein Schwerpunkt auf Geschäftsmodellen oder Produkten der biointelligenten Wertschöpfung liegt. Die identifizierten Ansätze können in unterschiedliche Bedürfnisfelder, Ebenen der Biointelligenz- und Produktionsskala und variierende Technologiereifegrade unterteilt werden. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die Verteilung der 259 Technologien. Zum Teil sind Doppelzuordnungen enthalten, so dass die Summe größer als 259 ist. Dies gilt auch für alle weiteren prozentualen Verteilungen.

	Ausprägung	Anzahl Technologien, Produkte und Dienstleistungen [Anzahl]	Prozentuale Verteilung [%]
<b>Bedürfnisfeld</b>	Energie	37	14
	Ernährung	86	33
	Gesundheit	165	64
	Konsum	95	37
	Wohnen	40	15
<b>Biointelligenzskala</b>	Stufe 3	104	40
	Stufe 4	95	37
	Stufe 5	60	23
<b>Produktionsskala</b>	Ebene 1	160	62
	Ebene 2	99	38
<b>Technologiereifegrad</b>	≥ 6	205	79
	< 6	54	21

Tabelle 2: Übersicht der identifizierten Technologien je Bedürfnisfeld, Biointelligenzskala, Produktionsskala und Technologiereifegrad bezogen auf Technologien der Stufe 3 bis 5 auf der Biointelligenzskala und größer 2 auf der Produktionsskala.

Das Land mit den meisten identifizierten Technologien und Dienstleistungen ist die USA mit einem Anteil von 34%. Insbesondere in den BTF Human-Biomachine-Interfaces, Biofoundries und Hochdurchsatzscreening durch Laborautomatisierung und Biosensoren

und Bioaktuatoren ist das Land mit einem Anteil von 50% der identifizierten Technologien führend. Hinter den USA folgt Deutschland mit 21% der Technologien. Vor allem die Bedürfnisfelder Gesundheit, Energie und Konsum werden von deutschen Akteuren be-

trachtet. Im Bereich der biobasierten Energieerzeugung und -speicherung führt Deutschland mit einem Anteil von 75%. In den BTF Bioraffinerien und Bioreaktoren sowie bei Smart Greenhouse und Smart Farming liegt Deutschland mit 33% und 27% an erster Stelle. Die restlichen Technologien verteilen sich auf Kanada mit 10%, UK/IE mit 9%, Niederland mit 7%, Israel mit 5%, Finnland und Australien mit jeweils 4%, Schweden mit 3% und China sowie Norwegen mit jeweils 2%. Hierbei ist zu beachten, dass viele Publikationen aus internationalen Kooperationen entstanden sind und deshalb mehreren Ländern zugeordnet wurden.

Die drei wichtigsten BTF für alle identifizierten biointelligenten Konzepte sind Bioraffinerien und Bioreaktoren (36%), Digitale Plattformen und Modelle (30%) sowie Biofoundries (15%). Es ist zu beachten, dass einige biointelligente Technologien, Produkte und Dienstleistungen mehreren BTF zugeordnet werden können. Auf der Anwendungsseite dominieren die Produktion von Therapeutika (8%), die Herstellung von Lebensmittel- und Getränkezutaten (8%) sowie Anwendungen (165) in der Arzneimittelforschung (7%). Dies bestätigt nochmals, dass ein Großteil der Anwendungen im Bedürfnisfeld Gesundheit zum Einsatz kommen. Das Bedürfnisfeld Ernährung nimmt zwar lediglich den dritten Platz ein, liegt aber mit 86 Technologien, Produkten und Dienstleistungen der biointelligenten Wertschöpfung nicht weit hinter dem zweiten Platz, dem Konsum mit 95 Technologien, Produkten und Dienstleistungen der biointelligenten Wertschöpfung. Rund 62% aller Technologien sind produktionsorientiert, während 38% eher dienstleistungsorientiert oder produktionsunterstützend sind. Allerdings können einige der dienstleistungsorientierten Technologien zukünftig auch im Produktionskontext eingesetzt werden.

Etwa 60% d. h. 155 der gefundenen Technologien reihen sich per Definition in den Bereich der biointelligenten Wertschöpfung ein, während sich die restlichen 40% an der Schwelle befinden und das Potenzial besitzen, in naher Zukunft biointelligent zu werden. Etwa 79% der Technologien besitzen einen Technologiereifegrad von ≥6. Dies bedeutet, dass mehr als drei von vier der gefundenen Technologien zumindest bereits in einer Produktionsumgebung eingesetzt werden können.

Wissenschaftliche Forschung bildet die Grundlage für die Entstehung neuer, innovativer Technologien. Neben der Identifikation relevanter Akteure wurde daher eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, um die aktuellen Entwicklungen im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung zu verfolgen und ein umfassenderes Bild zu erhalten. Im Rahmen der Literaturrecherche konnten insgesamt 15.229 Publikationen zu allen BTF in den Leitländern identifiziert werden (weltweit ca. 19.904). Ein Drittel davon ist dem Bereich Gensequenzierung und -editierung zuzuordnen. Bioinformatik und Datenspeicherung sowie Human-Biomachine-Interfaces folgen mit jeweils über 2.000 Publikationen. Für einige BTF liegen Veröffentlichungen bereits vor dem Jahr 2000 vor. Dies betrifft die Bereiche Bioraffinerien und Bioreaktoren, Soft-Sensorik und KI, Biosensoren und Bioaktuatoren, Bio-(Hybrid)- und Soft-Robotik, Bio-Computing und Data Storage sowie Biofoundries und Hochdurchsatzscreening durch Laborautomatisierung. Die Mehrzahl der identifizierten Technologien kann also als neu oder neu definiert betrachtet werden.

Der Vergleich der gesamten Anzahl an Publikationen in der Literaturdatenbank *Web of Science* mit den Veröffentlichungen zu biointelligenten Technologien, ist interessant. Die Gesamtzahl an Publikationen wächst seit den 60er Jahren exponentiell. Veröffentlichungen im Jahr 2020. Publikationen zu biointelligenten Technologien wachsen erst seit dem Jahr 2017 exponentiell, doch dieses Wachstum ist im Vergleich signifikant stärker. Der relative Anteil von Veröffentlichungen zu biointelligenten Technologien ist seit 2017 von 0,03% auf rund 0,1% gestiegen. Insgesamt wurden im Jahr 2020 knapp 5.000 Publikationen zu diesen Themen veröffentlicht. Der exponentielle Anstieg lässt sich nicht auf alle BTF übertragen. In den Feldern Bio-(Hybrid-) und Soft-Robotik, Bio-Computing und Data Storage und Biofoundries und Hochdurchsatzscreening durch Laborautomatisierung ist (noch) kein exponentielles Wachstum erkennbar. In allen anderen Feldern ist die Zunahme an Publikationen hingegen exponentiell. Besonders stark ist das Wachstum in den Feldern biobasierte Energieerzeugung und -speicherung, digitale Plattformen, Modelle und Zwillinge sowie Metabolic Engineering und synthetische Biologie. Darüber hinaus steigen bei biobasierter / hybrider Mikro- und Na-

notechnologie, biofunktionale Materialien und Oberflächen und Tissue Engineering sowie Bioprinting und additivem Biomanufacturing die Veröffentlichungen stark an. Die genannten Felder sind demnach jene mit der höchsten Dynamik. Einschränkend ist anzumerken, dass die Anzahl der Publikationen in den Bereichen Bioprinting und Additive Biomanufacturing sowie Biofunktionale Materialien und Oberflächen und Tissue Engineering insgesamt noch unter 100 Publikationen liegt. Dementsprechend ist das starke Wachstum bereits mit wenigen Publikationen erreichbar.

Der Anteil der Publikationen mit strenger Fokussierung auf die Anwendung von Ansätzen in der Produktionstechnologie liegt im Durchschnitt bei 14%. Darüber hinaus kann allerdings ein Großteil der restlichen Veröffentlichungen auf die Produktion bezogen oder angewendet werden. Bei den streng produktionstechnologienahen Publikationen liegen die Felder biobasierte Energieerzeugung und -speicherung mit 563, Smart Greenhouse und Smart Farming mit 510, Bioaffinerien und Bioreaktoren mit 339, Gensequenzierung und -editierung mit 233 sowie Bioinformatik und

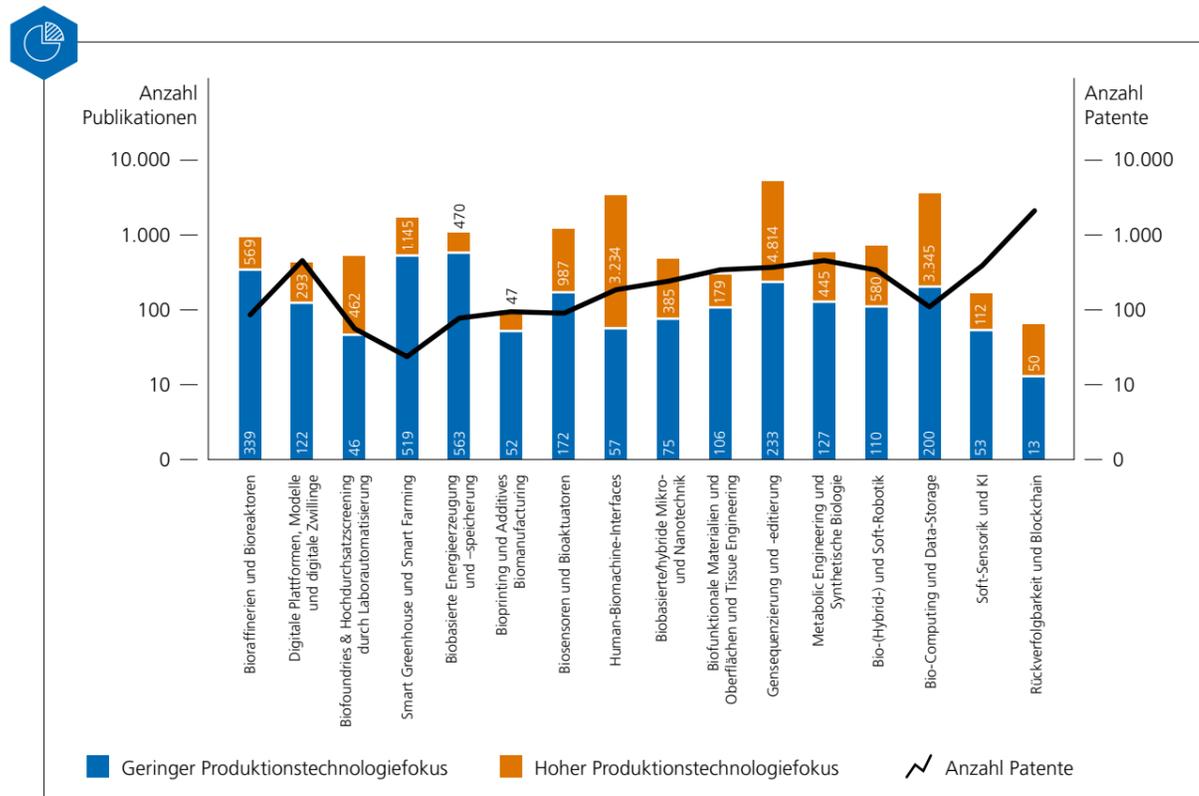


Abbildung 10: Aufteilung der Veröffentlichungen mit hohem und geringen Produktionstechnologiefokus sowie Patente nach Befähigungstechnologiefeld. Die vertikale Achse ist logarithmisch skaliert.

Datenspeicherung mit 200 Veröffentlichungen vorne. Es ist zu vermuten, dass ein großer Teil der Forschung an biointelligenten Ansätzen innerhalb von Unternehmen stattfindet und somit tendenziell seltener veröffentlicht wird (z. B. aus Geheimhaltungsgründen). *Abbildung 10* fasst die wichtigsten Ergebnisse der Literatur- und Patentanalyse nach BTF zusammen. Die vertikale Achse ist logarithmisch skaliert.

Rund 37% der Publikationen stammen aus den USA und 24% aus China. UK/IE steuern zusammen 10% bei, während Deutschland mit 8% eher abgeschlagen ist. Ein noch geringerer Anteil kommt aus Kanada und Australien mit 6% bzw. 5%. Dagegen werden in Schweden, Norwegen, Finnland, Israel und in den Niederlanden kaum Publikationen zu biointelligenten Technologien veröffentlicht. Wird die Häufigkeit, mit

»In many majors, the most fascinating challenges aren't confined to one field; they're found at the intersections. As you delve deeper scientifically in one area, you naturally lean toward problems at the interface with the direction you're heading as you advance.«

Prof. Brian F. Pfleger, University of Wisconsin<sup>17</sup>

der die führenden Länder in den einzelnen Technologiekategorien unter den Top-drei zu finden sind betrachtet, so liegen die USA mit 15 an der Spitze. China folgt mit elf Platzierungen auf Platz zwei, bevor UK/IE und Indien sich mit jeweils sechs Top-drei-Plätzen den dritten Platz teilen. Deutschland liegt mit fünf Platzierungen dicht hinter UK/IE und Indien. Auffällig ist zudem, dass Italien mit drei Plätzen unter den Top-drei ebenfalls eine starke Entwicklung hinsichtlich Veröffentlichungen zu biointelligenten Technologien aufweist. Auch bei der Analyse der produktionsorientierten Publikationen fällt auf, dass weiterhin die USA, China und UK/IE unter den Top-drei der führenden Länder zu finden sind. Die Publikationsanzahl von Forschenden in China liegt vermutlich deutlich höher als hier angenommen. Bezüglich der Forschung und Veröffentlichung von Publikationen richtet sich China verstärkt auf eine „autarke“ Forschungsstrategie aus. Konkret will sich das Land nicht auf Forschungen anderer Länder verlassen und mögliche Restriktionen aus diesen riskieren, sondern möglichst alle Bereiche durch eigene Arbeiten abdecken. Das Hauptziel ist es, Technologien möglichst schnell in die Anwendungsbereitschaft zu bringen, wobei auch hier wieder Biotechnologie explizit genannt wird (140, 181). Trotz der partiellen Abschottung setzt China weiter auf internationale Kollaborationen, so z. B. im Bereich der Bio-

chemie (182). Eine Analyse von Veröffentlichung auf Chinesisch zeigt etwa weitere 5.000 Publikationen mit Fokus auf Bioengineering, Industrialisierung der Biotechnologie oder Biotechnologie in der Landwirtschaft.

Durch eine Patentrecherche konnten insgesamt 5.360 Patenterteilungen in den Leitländern identifiziert werden. Hier ist China mit einem Anteil von 56% führend, gefolgt von den USA mit 38%. Auf Rang drei und vier liegen weit abgeschlagen UK/IE und Deutschland mit jeweils 2%. Die Konzentration auf die Länder China und USA ist hier demnach noch stärker als bei den wissenschaftlichen Veröffentlichungen. Die meisten Patente entfallen mit 38% auf das Feld Bio-(Hybrid-) und Soft-

Robotik. Hier ist die Besonderheit, dass China 99% der Patente hält und damit ein starker Ausreißer in diesem BTF ist. Werden diese in die Berechnung mit einbezogen, ergibt sich ein anderes Bild, in welchem die USA in Summe mehr als doppelt so viele Patentanmeldungen (60 vs. 29%) aufweisen kann als China. Neben Bio-(Hybrid-) und Soft-Robotik gibt es in den Feldern Bioaffinerien und Bioreaktoren (9%) sowie Biosensoren und Bioaktuatoren (8%) einen hohen Anteil an Patenterteilungen. Am anderen Ende der Skala wurden in Bioprinting und additivem Biomanufacturing sowie Bio-Computing und Data Storage lediglich je 1% der Patente erteilt. Im Feld Soft-Sensorik und KI gab es lediglich 24 Erteilungen. Die meisten weltweiten Patentanmeldungen gibt es bei den Technologien der Bioaffinerien und Bioreaktoren (12.955), biobasierter Energieerzeugung und -speicherung (8.531) sowie Metabolic Engineering und synthetische Biologie (7.939). Die wenigsten Anmeldung gibt es in Verbindung mit den Technologiekategorien Soft-Sensorik und KI (89), Rückverfolgbarkeit und Blockchain (277) sowie Human-Biomachine-Interfaces (963).

Wird die Verteilung der Technologien, Publikationen und Patenterteilungen über alle Länder betrachtet, so zeigen sich einige Auffälligkeiten. Zunächst lässt sich feststellen, dass kein Zusammenhang zwischen einer

hohen Anzahl identifizierter Technologien und der Menge an Publikationen und Patenten besteht. Insbesondere für die Leitländer Deutschland und China trifft dies zu. In Deutschland konnten viele Technologien identifiziert werden und die Grundlagen zur Umsetzung einer biointelligenten Wertschöpfung scheinen bereits weitgehend vorhanden zu sein. Auf der anderen Seite gibt es verhältnismäßig wenig wissenschaftliche Publikationen zu den einzelnen BTF. Eine Ausnahme bildet der Bereich digitale Plattformen, Modelle und Zwillinge, in dem fast ein Viertel der Publikationen aus Deutschland stammt. Auch bei Smart Greenhouse und Smart Farming, Bio-(Hybrid-) und Soft-Robotik sowie Biofoundries und Hochdurchsatzscreening durch Laborautomatisierung liegt der Anteil an den Veröffentlichungen bei über 10%. Insbesondere bei biobasierter Energieerzeugung und -speicherung, Metabolic Engineering und synthetische Biologie sowie biofunktionalen Materialien und Oberflächen und Tissue Engineering sind jedoch im Vergleich zu anderen Ländern nur wenige Publikationen aus Deutschland. In China verhält es sich umgekehrt. Hier lassen sich nur vereinzelte Technologien verorten, doch insbesondere bei der Patenterteilung ist das Land führend. Hinsichtlich der Publikationen werden hier zentrale Bemühungen auf die Felder Soft-Sensorik und

KI, Rückverfolgbarkeit und Blockchain sowie Human-Biomachine-Interfaces gelegt. Zu Bio-(Hybrid-) und Soft-Robotik gibt es im Vergleich zu anderen Ländern weniger Publikationen. In den USA ist die Verteilung der drei Kennzahlen gleich. Über alle BTF hinweg stammen circa ein Drittel der Technologien, der Publikationen und der Patenterteilungen aus den USA. Für die anderen Leitländer lassen sich keine generellen Zusammenhänge ableiten, da die relativen Werte der drei Kennzahlen je nach Feld teilweise stark voneinander abweichen oder sehr gering sind. In manchen Bereichen wird generell nur wenig veröffentlicht, es werden aber dennoch Patente angemeldet.

Die BTF lassen sich anhand der Verteilung von Patentanmeldungen und -erteilungen sowie Publikationen in zwei Gruppen einteilen. Die applikationsorientierten BTF finden bereits heute verstärkt Anwendung in der Praxis. Ein Beispiel hierfür ist Bio-(Hybrid-) und Soft-Robotik. In *Abbildung 11* ist der zeitliche Verlauf von Patentanmeldungen, -erteilungen und Publikationen in zwei der 17 BTF veranschaulicht. Es ist zu erkennen, dass die Patentanmeldungen und -erteilungen deutlich die Anzahl an Publikationen übersteigen. Auch das Wachstum der Patente ist signifikant höher als jenes der Veröffentlichungen.

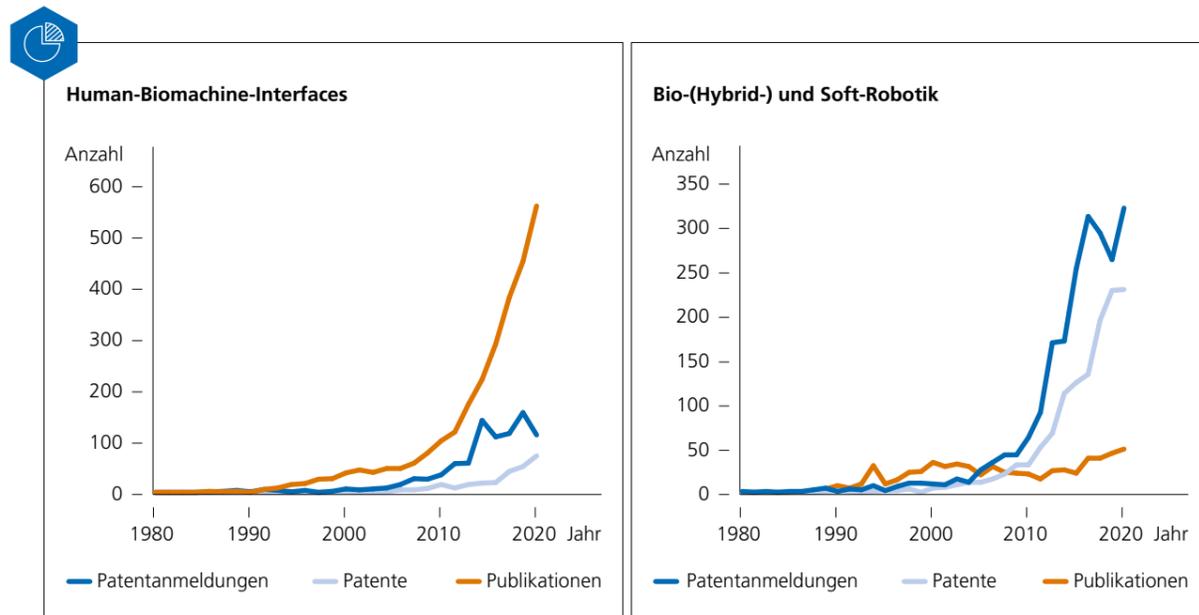


Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf von Publikationen, Patenten und Patentanmeldungen am Beispiel von den BTF Bio-(Hybrid-) und Soft-Robotik sowie Human-Biomachine Interfaces.

Ähnlich verhält es sich mit den BTF biobasierte Energieerzeugung und -speicherung, biobasierte Mikro- und Nanotechnologie, Biofoundries und Hochdurchsatzscreening durch Laborautomatisierung, Bioprinting und additives Biomanufacturing, biofunktionale Materialien und Oberflächen und Tissue Engineering, Bioreaktoren und Bioraffinerien, digitale Plattformen, Modelle und Zwillinge, Metabolic Engineering und synthetische Biologie sowie Rückverfolgbarkeit und Blockchain.

»Um Forschungsergebnisse in die Industrie zu übertragen bedarf es Technologiezentren, die es ermöglichen, Laborentwicklungen zu testen, ohne hohen Ressourcenaufwand und finanzielles Risiko.«

Tatjana Krampitz, GEA Group

Bei den Feldern Human-Biomachine-Interfaces, Bio-Computing und Data Storage und Gensequenzierung und -editierung verhält es sich umgekehrt. Der Vergleich im Zeitverlauf zeigt, dass deutlich mehr Publikationen veröffentlicht als Patente angemeldet und erteilt wurden. Gleichzeitig ist die Wachstumsrate der Publikationen deutlich höher. Demnach können diese Felder als forschungsorientiert bezeichnet werden. Bei Soft-Sensorik und KI sowie Smart Greenhouse und Smart Farming konnte keine eindeutige Zuordnung in applikations- oder forschungsorientiert vorgenommen werden. Die zeitliche Verteilung von Technologien Publikationen und Patenten zeigt, dass es in konkreten Anwendungsfällen zunächst zu einer Häufung von Patentanmeldungen und -erteilungen kommt, bevor die Zahl der Publikationen steigt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Forschenden zunächst ihr geistiges Eigentum schützen wollen und müssen, bevor die Ergebnisse in wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht werden. Dem Anstieg der Publikationen folgt schließlich die Entwicklung konkreter Technologien, die typischerweise zuletzt ansteigen. Aufgrund der Vielzahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Patenterteilungen in China und den USA ist zu vermuten, dass es in den folgenden Jahren zu einem signifikanten Anstieg an konkreten Technologien dort kommen wird. Für Deutschland bedeutet dies, dass Investitionen in die Erforschung und Entwicklung von patentfähigen Produkten, Technologien und Prozessen notwendig sind, um die Partizipation des Landes an zukünftigen Märkten sicherzustellen.

Für die meisten der 17 BTF ist der Zuwachs an Veröffentlichungen zwischen den Zeiträumen 2015–2018 und 2019–2022 sehr hoch. Im Durchschnitt liegt die Zunahme in diesen beiden Perioden bei knapp 300%. Im Feld digitale Plattformen, Modelle und Zwillinge beträgt das Wachstum sogar mehr als das 26-Fache. Neben den führenden Ländern sind insbesondere Indien und Italien mehrfach in den Top-drei vertreten. Indien zeichnet sich in den Bereichen biobasierte Energieerzeugung und -speicherung, Human-Biomachine-Interfaces, Bioraffinerien und Bioreaktoren, Biosensoren und Bioaktoren sowie Soft-Sensorik und KI aus. Italien hingegen führt bei den Publikationen in den Technologiebereichen Bio-(Hybrid-) und Soft-Robotik, Smart Greenhouse und Smart Farming sowie Rückverfolgbarkeit und Blockchain. Dies könnte als erstes Anzeichen dafür gewertet werden, dass sich sowohl Indien sowie Italien in Zukunft als führende Länder für biointelligente Wertschöpfung herauskristalisieren könnten. Japan (Bioinformatik und Datenspeicherung) und Singapur (Bioprinting und additives Biomanufacturing) sind ebenfalls unter den Top-drei.

Nachfolgend werden die Kennzahlen auf Ebene der BTF im Detail analysiert, wobei jeweils auch auf die konkrete Anwendung, Produkte, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle von einzelnen Technologien in den Leitländern eingegangen wird. Die Entwicklung und Zusammensetzung der Komponenten werden beschrieben und es wird erläutert, welcher Einfluss auf Nachhaltigkeit vorliegen kann.

## Biologische Schätze nutzen: Bioraffinerien und Bioreaktoren ebnen den Weg zu einer nachhaltigen Zukunft

Bioraffinerien und Bioreaktoren sind industrielle Anlagen, die der Umwandlung biologischer Rohstoffe in Produkte und Wertstoffe dienen. Dafür kultivieren sie Mikroorganismen in einer kontrollierten Umgebung. Bioreaktoren sind geschlossene Systeme zur Durchführung biologischer Reaktionen und Prozesse. Bioraffinerien sind Anlagen zur Umwandlung von biologischem Material in Produkte. Bioreaktoren sind demnach oftmals Bestandteil einer Bioraffinerie. Die Technologien, Produkte und Dienstleistungen des BTF unterteilen sich in viele verschiedene Anwendungsrichtungen. Eine Reihe von Ansätzen konzentriert sich auf biopharmazeutische Prozesse. In manchen Fällen werden Mikroalgen in Reaktoren eingesetzt, um eine große Bandbreite von Kraftstoffen und Werkstoffen zu produzieren. Neben Fermentationsprozessen kommen häufig Pyrolyse-Verfahren zum Einsatz, die meist Biomasse als Grundstoff nutzen. Die Art der Biomasse ist hierbei je nach Anwendungsfall unterschiedlich und kann sich auf Abfallströme (z. B. Klärschlamm, Bioabfälle, Lebensmittelabfälle) oder nachwachsende Ressourcen (z. B. Holz, Lignozellulose, Energiepflanzen) beziehen. Enzyme und Bakterien sind ebenfalls häufig die Grundlage für Herstellungsprozesse in Bio-

raffinerien und Bioreaktoren. Einige der Technologien nutzen abgeschiedenes CO<sub>2</sub> zur Kultivierung von Organismen in Reaktoren. Bezüglich der Hardware sind neben den Reaktoren meist eine ganze Reihe an Instrumenten, Computern, Sensoren und Laborausstattung notwendig. Diese werden softwareseitig durch digitale Zwillinge, Automatisierungsapplikationen, KI und Steuerungssoftware ergänzt. Vereinzelt kommt KI auch beim Design der Produkte oder Hilfsstoffe (z. B. Enzym-Design) zum Einsatz. Biobasierte und bioabbaubare Materialien fördern in der Regel die Kreislauffähigkeit von Produkten. Durch Verwendung oder Abscheidung von Treibhausgasen können diese Technologien zur CO<sub>2</sub>-Negativität beitragen.

Mit 94 Ansätzen ist das BTF Bioraffinerien und Bioreaktoren eines der größten. Hervorzuheben ist hier, dass Deutschland mit 31 Ansätzen führend ist, während in den USA 19 und in den Niederlanden zehn Technologien oder Produkte identifiziert wurden. Auch Finnland gehört mit jeweils acht Anwendungen noch zu den Vorreiterländern. Der TRL liegt bei einem Wert von sieben und die Biointelligenzskala bei 3,7, wobei 30 Technologien den Höchstwert von fünf erreicht haben. Mit 80 % direkter Anwendung in der Produktion ist das BTF generell äußerst produktionsnah.



**Liquid3**, auch als **Liquid Trees** bekannt, ist ein innovatives Produkt für Energie-Photobioreaktoren, das vom Institut für Multidisziplinäre Forschung an der Universität Belgrad, Serbien, entwickelt wurde. Ziel ist es, die Funktion von Bäumen in stark verschmutzten städtischen Gebieten zu ersetzen, in denen herkömmliches Grün nicht gedeihen kann. Das System wurde als eine der elf besten innovativen Lösungen im Rahmen des Projekts „Climate Smart Urban Development“ des Entwicklungsprogramms der Vereinten Nationen und des serbischen Umweltministeriums ausgezeichnet. Der Photobioreaktor verwendet Mikroalgen in einem Glasbehälter, um durch Photosynthese Sauerstoff zu erzeugen und gleichzeitig Luftschadstoffe zu filtern. Der Einsatz von Liquid3 bietet Vorteile in dicht besiedelten städtischen Gebieten und weist eine höhere Effizienz in der Photosynthese als Bäume auf.

Auch bei den wissenschaftlichen Veröffentlichungen ist ein hoher Produktionsfokus von 37 % aus 432 Publikationen erkennbar. China ist hier mit rund 31 % führend, vor den USA mit 28 %. In UK/IE sind 12 % und in Deutschland 8 % der Veröffentlichungen verortet. Auffällig ist, dass der Anstieg der Veröffentlichungen in den Zeiträumen 2015–2018 und 2019–2022 mit 118 % trotz der weiteren Verbreitung geringer ausfällt als in anderen BTF. Getrieben wird der Zuwachs vor allem durch China, USA, UK/IE und – abseits der Leitländer – auch Indien. Im direkten Vergleich mit den Patenten ist erkennbar, dass die Veröffentlichungsrate ungewöhnlich niedrig ist. Hintergrund ist, dass das BTF bereits relativ weit fortgeschritten ist, sodass weniger Fokus auf die Forschung gelegt wird. Von 458 erteilten Patenten aus den Leitländern stammen 70 % aus den USA, 17 % aus China und 5 % aus Deutschland. In Deutschland gibt es somit eine Vielzahl an Ansätzen im Zusammenhang mit Bioraffinerien und Reaktoren, aber kaum Veröffentlichungen und Patenterteilungen. In China verhält es sich genau umgekehrt. Es fällt zudem auf, dass in den USA viele Patente erteilt werden, aber im Verhältnis wenige Publikationen entstehen.

### Virtuelle Doppelgänger: Digitale Plattformen, Modelle und Zwillinge für biointelligente Wertschöpfung

Digitale Plattformen, Modelle und Zwillinge spielen eine entscheidende Rolle für die biointelligente Wertschöpfung, indem sie notwendige Infrastrukturen schaffen, die eine virtuelle Darstellung physischer Objekte, Systeme oder Prozesse ermöglichen. Dies umfasst bspw. die Nutzung von digitalen Zwillingen und Datenplattformen für die Echtzeitüberwachung und -optimierung von Prozessen in der biointelligenten Produktion. Alle drei Ansätze basieren auf der Nutzung digitaler Technologien in Kombination mit Daten, um verschiedene Aspekte der realen Welt abzubilden, zu steuern und zu optimieren. Generell hat der Bereich der digitalen Plattformen, Modelle und Zwillinge ein hohes Potenzial, in den kommenden Jahren weiter zu wachsen und die biointelligente Wertschöpfung in diesem Bereich durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse und die Entwicklung innovativer Technologien oder Konzepte voranzutreiben. Das BTF bildet eine wichtige Basis für die Integration biologischer Komponenten. Der Einsatz von digitalen



Zwillingen kann dabei unterstützen, biologische Prozesse besser abzubilden und zu analysieren und so die Produkt- und Prozessqualität konstant zu halten. Bei den identifizierten Ansätzen fokussieren sich die Anwendungen vor allem auf den medizinischen Bereich. Dabei werden z. B. Computermodelle entwickelt, die mithilfe von KI und maschinellem Lernen Proteine mit bestimmten Strukturen und Funktionen erzeugen. Solche Technologien können produktionsunterstützend eingesetzt werden, um Prozesse auf bestimmte Anforderungen anzupassen. Festzuhalten ist in diesem Kontext, dass insbesondere das Konzept des digitalen Zwillingen in den für die Biointelligenz relevanten Disziplinen bislang unterschiedlich konnotiert ist. Wird der Begriff in den Lebenswissenschaften häufig als Synonym für ein digitales Modell verwendet, ist er in den Produktionswissenschaften eine eigenständige Entität, die durch einen bilateralen Informationsfluss (zumeist in einer Regelstrecke) gekennzeichnet ist.

Insgesamt konnten 79 biointelligente Technologien, Produkte und Konzepte im Feld digitale Plattformen, Modelle und digitale Zwillinge in den Leitländern identifiziert werden. Insbesondere die USA mit 35 % und Deutschland mit 24 % der Ansätze sind in diesem Bereich zurzeit führend. Der durchschnittliche TRL liegt bei 7,3. Etwa ein Drittel der Technologien erreicht auf der Biointelligenzskala den Wert 5 und 42 % hat einen hohen Produktionstechnologiefokus.

In Summe wurden in den Leitländern zu diesem BTF 336 wissenschaftliche Publikationen veröffentlicht. Aus den USA stammen 27 % der Publikationen, aus Deutschland 23 % und aus UK/IE 15 %. Norwegen ist mit einem Anteil von unter 1 % deutlich abgeschlagen. Zwischen 2015–2018 und 2019–2022 stieg die Anzahl der Veröffentlichungen um das 26-Fache, wodurch es im Vergleich zu den anderen Feldern das stärkste Wachstum verzeichnet. Auffällig ist, dass erst ab 2018 die Veröffentlichung der wissenschaftlichen Literatur unter diesem Begriff begann. Im Gegensatz dazu gibt es seit 2007 Patentanmeldungen. Die 96 Patentanmeldungen verteilen sich zu 50 % auf die USA und 45 % China. Obwohl in Deutschland viele Publikationen zu diesem Thema veröffentlicht wurden, konnten keine Patentanmeldungen identifiziert werden.

#### Labor der Zukunft: Biofoundries und Hochdurchsatzscreening durch Laborautomatisierung

Biofoundries und Hochdurchsatzscreening-Einheiten sind automatisierte und standardisierte Einrichtungen in der biointelligenten Wertschöpfung. Diese dienen der Herstellung biobasierter Produkte sowie der schnellen und effizienten Untersuchung und Testung einer großen Anzahl von Substanzen auf bestimmte Funktionen. Biointelligente Technologien, Produkte und Dienstleistungen in diesem Kontext unterstützen die Konstruktion und Optimierung biologischer Prozesse. Bspw. kann die Hochdurchsatz-DNA-Sequenzierung als produktionsunterstützende Technologie eingesetzt werden. Sie ermöglicht es, große Mengen genetischer Informationen schnell zu generieren und zu analysieren. Außerdem kann durch den Einsatz automatisierter Systeme in Biofoundries der Entwicklungsprozess biologischer Systeme beschleunigt werden, indem Prozesse wie DNA-Konstruktion oder Klonierung automatisiert werden. Die Kombination von Biofoundries und Laborautomatisierung mit digitalen Modellen ist in vielen Ansätzen unabdingbar, da entsprechende Technologien aufgrund der hohen Datenmengen ohne Echtzeitüberwachung und automatisierte Datenauswertung nicht umsetzbar sind.

Im BTF Biofoundries und Hochdurchsatzscreening wurden insgesamt 39 biointelligente Ansätze identifiziert. 19 stammen aus den USA, sechs aus Kanada

und vier aus Deutschland. Der durchschnittliche TRL von 7,1 lässt darauf schließen, dass ein Großteil der identifizierten Technologien und Produkte entweder einen funktionierenden Prototyp vorweisen oder bereits die Marktreife erreicht haben. Acht der Technologien befinden sich noch im Entwicklungsstadium. Auf der Biointelligenzskala wird ein Wert von 3,8 erreicht, wobei zwölf Technologien mit dem Höchstwert von fünf bewertet werden. Fast 75 % der Technologien, Konzepte und Produkte haben direkte Anwendung in der Produktion.

Insgesamt wurden 428 wissenschaftliche Veröffentlichungen im BTF identifiziert. 40 % stammen aus den USA, 15 % aus China und 14 % aus UK/IE. Deutschland folgt mit 11 %. Insgesamt stieg die Anzahl der Veröffentlichungen zwischen 2015–2018 und 2019–2022 um 187 %, womit Biofoundries und Hochdurchsatzscreening durch Laborautomatisierung zu den BTF zählt, die ein geringeres Wachstum verzeichnen. Dies könnte daran liegen, dass das Feld im Vergleich mit den anderen Bereichen bereits relativ reif ist. Der Verlauf der Patentanmeldungen sieht daher so aus: Zwischen 2001 und 2005 sowie zwischen 2012 und 2016 wurden die meisten Anmeldungen durchgeführt. Demgegenüber konnten in diesen Zeiträumen nur wenige wissenschaftliche Publikationen identifiziert werden. Ein direkter Zusammenhang ist nicht erkennbar. Von 87 Patentanmeldungen kamen 72 % aus den USA. Innerhalb der USA gehört das Feld zu den BTF mit den geringsten Patentanmeldungen. Im Gegensatz dazu gehört es aber zu den Top-drei BTF mit den meisten Technologien in den USA.

#### Von der Farm zum Datenzentrum: Wie Smart Greenhouse und Smart Farming die Landwirtschaft neugestalten

Das BTF Smart Greenhouse und Smart Farming bezieht sich auf spezialisierte, automatisierte Anlagen und Techniken in der Landwirtschaft. Ihr Ziel ist es, hohe Ressourceneffizienz, Produktivität und Nachhaltigkeit zu erreichen. Die Ansätze in diesem Feld setzen vornehmlich auf die Züchtung und Kultivierung von Pflanzen in kontrollierten Umgebungen. Neben Futter- und Lebensmittelpflanzen sind Nutzpflanzen wie Algen oder Energiepflanzen zu nennen. Einige Technologien fokussieren darüber hinaus auf die Zucht und

Haltung von Tieren oder Insekten, wie am Beispiel von smarten Milchfarmen oder Insektenfarmen zu erkennen ist. Grüne und selbstreinigende Fassaden gehören ebenfalls zum Anwendungsspektrum des BTF und können in Städten oder Gebäuden für schadstoffärmere Luft und besseres Klima sorgen. Bezüglich der Infrastruktur sind vor allem vernetzte (teilweise vertikale) Gewächshäuser, Pflanzenkübel, Sensoren, Computer, Beleuchtungs- und Bewässerungskonzepte zu nennen. Unterstützt wird dies durch voll funktionsfähige Automatisierungslösungen, dem IoT und Datenverarbeitungssoftware. KI kommt in einigen Fällen ebenfalls zum Einsatz, bspw. bei der Überwachung der Pflanzengesundheit. Die meisten Technologien wirken sich direkt auf eine Erhöhung der Produktivität der Lebensmittel- und Futterproduktion aus. Durch die kontrollierte Umgebung kann die Ressourcennutzung (Wasser, Dünger, Energie) signifikant reduziert werden.

Im BTF Smart Greenhouse und Smart Farming konnten 34 Technologien, Konzepte, Produkte und Dienstleistungen identifiziert werden. Elf davon sind in den USA verortet und neun stammen aus Deutschland. Die restlichen Technologien sind auf die anderen Leitländer verteilt. Der durchschnittliche TRL von sieben



und eine Biointelligenzskala von vier lassen vermuten, dass das Feld fortgeschritten ist. Bereits 40 % der Technologien und Produkte sind in der höchsten Stufe für biointelligente Wertschöpfung klassifiziert. Ebenfalls 40 % haben eine direkte Beteiligung an Produktionsprozessen, während der Rest eher unterstützend eingesetzt werden kann.

Von 667 Veröffentlichungen stammen 25 % aus den USA und 14 % jeweils aus Deutschland und UK/IE. In der Forschung ist Deutschland damit eines der Vorreiterländer in diesem BTF. Darüber hinaus fällt auf, dass Australien mit 11 % der Veröffentlichungen gut in diesem Thema vertreten ist. Der Produktionsfokus der Publikationen ist mit 31 % vergleichsweise hoch. Beim Zuwachs der Veröffentlichungen zwischen 2015–2018 und 2019–2022 um 485 % sind die USA, China, Deutschland und außerhalb der Leitländer Indien und Italien treibende Kräfte. Insgesamt stieg die Anzahl der Veröffentlichungen in diesen Zeiträumen um ca. das Fünffache, wobei auch die Patenterteilungen ein großes Wachstum erfahren haben. Von 381 Patenten stammen 50 % aus China, 39 % aus den USA und 6 % aus Australien. Deutschland spielt eine vergleichsweise geringfügige Rolle in diesem Zusammenhang. Erneut ist auffällig, dass China große Bemühungen bei der Patentierung unternimmt, aber bisher keine Technologien bzw. konkrete Anwendungen oder Produkte dort identifiziert werden konnten. Es ist davon auszugehen, dass in den kommenden Jahren aus den Patenten auch Technologien, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle entstehen werden und sich das Verhältnis zwischen den Ländern entsprechend verschieben könnte.



Das **Donald Danforth Plant Science Center** ist ein Forschungsinstitut mit Sitz in St. Louis, Missouri, das sich auf Pflanzenwissenschaften spezialisiert hat. Die Forschungseinrichtung konzentriert sich darauf, innovative Lösungen für Herausforderungen in der Landwirtschaft und Ernährungssicherheit zu entwickeln. Mit modernen biotechnologischen Ansätzen erforscht das Zentrum genetische, biochemische und physiologische Aspekte von Pflanzen, um Erträge zu verbessern und nachhaltige landwirtschaftliche Praktiken zu fördern. Dadurch spielt das Center eine wichtige Rolle bei der Integration innovativer Konzepte, Systeme oder Technologien zur Förderung der weltweiten Ernährungssicherheit.

### Die Biologie als Vorbild: Biobasierte Energieerzeugung und -speicherung

Biobasierte Energieerzeugung und -speicherung bezieht sich auf die industrielle Nutzung von biologischen Materialien sowie Prozessen zur Erzeugung und Speicherung von Energie. Für die biobasierte Energieerzeugung und -speicherung werden meist Biogasanlagen oder verwandte Technologien im Produktionsumfeld eingesetzt. Die meisten Anwendungsfälle finden sich bei der Nutzung von Biomasse und Rest- und Abfallströmen, wie z. B. aus Forst- und Landwirtschaft, zur Wärme- und Stromerzeugung. Aber auch die Erzeugung von grünem Wasserstoff wird derzeit im unteren TRL-Bereich erforscht. Durch Abscheidung und -speicherung von dabei entstehendem biogenem CO<sub>2</sub>, kann sogar ein negativer Treibhaus-Fußabdruck erreicht werden. Solche CO<sub>2</sub>-Senken sind notwendig für das Erreichen der globalen Klimaziele. Ein vielversprechender Ansatz ist zudem die Anwendung von Mikroalgenreaktoren (teilw. an Hausfassaden) zur Wärmeerzeugung und CO<sub>2</sub>-Bindung. Im Kontext einer biointelligenten Wertschöpfung sind Ansätze zur dezentralen Energieerzeugung besonders hervorzuheben. Für die biobasierte Energiespeicherung kommen, neben der Produktion von Biogas, Biowasserstoff und Biotreibstoffen, auch biotechnische Batteriespeichersysteme in Frage, welche auf Mikroorganismen basieren. Bei der Entwicklung von Bioenergieanlagen markiert die Implementierung einer Prozessautomatisierung einen bedeutenden Schritt in Richtung biointelligenter Produktion. Diese fortschrittlichen Systeme ermöglichen eine umfas-

sende Anlagenübersicht durch Echtzeitüberwachung. Hierdurch wird eine schnelle Reaktion auf potenzielle Probleme und Störungen ermöglicht. Durch eine optimierte Anlagen- und Prozessführung, die mit Hilfe der Prozessautomatisierung möglich wird, können nicht nur große Mengen an Energie erzeugt, sondern auch Wasser und Einsatzstoffe effizienter genutzt werden. Dies trägt zur Nachhaltigkeit und einer erheblichen Kosteneinsparung der Bioenergieproduktion bei.

Insgesamt konnten 16 konkrete biobasierte Energieerzeugungs- und -speichersysteme in den Leitländern nach den beschriebenen Kriterien identifiziert werden. Insbesondere Deutschland ist in diesem Bereich derzeit führend. Mit einem durchschnittlichen TRL von sieben, einem Wert von 3,7 auf der Biointelligenzskala sowie einem klaren Fokus auf die Produktion (im Sinne der Herstellung von Technologien für die Energieerzeugung und der Produktion von Energie selbst) ist hier das Potenzial und die Umsetzung einer biointelligenten Wertschöpfung bereits deutlich vorangeschritten. Sechs der 17 Technologien, Produkte und Anwendungen haben den Höchstwert der Biointelligenzskala von fünf erreicht. Fast 80 % der Ansätze kommen direkt in der Produktion zum Einsatz, womit der Produktionsfokus sehr hoch ist.

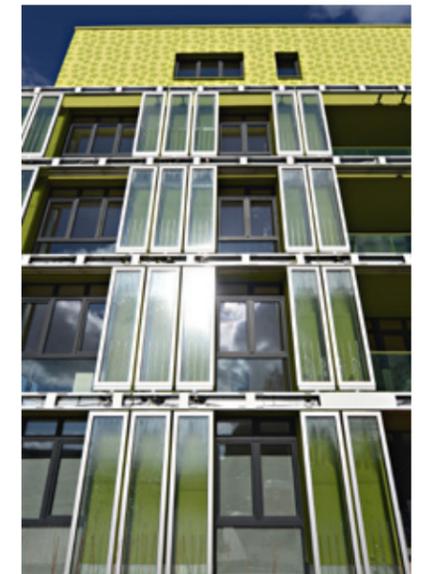
In Summe gab es in den Leitländern 643 Veröffentlichungen zu diesem BTF. Aus den USA stammen 35 % der Publikationen, aus China 32 % und aus UK/IE zusammen 14 %. Deutschland ist mit einem Anteil

von 3 % deutlich abgeschlagen. Mit 55 % Produktionsfokus nimmt das BTF biobasierte Energieerzeugung und -speicherung die führende Rolle unter allen anderen BTF bei den Veröffentlichungen ein. Zwischen den Zeiträumen 2015–2018 und 2019–2022 stieg die Anzahl der Veröffentlichungen um 158 %, was im Vergleich zu anderen Feldern moderat ist. Besonders hervorzuheben sind hier die USA, Kanada und UK. Neben den führenden Ländern gibt es auch in Indien eine steigende Veröffentlichungszahl. Die

373 Patenterteilungen verteilen sich zu 75 % auf die USA, 11 % China und 4 % UK/IE. Für dieses BTF besteht kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Erteilung von Patenten, der Anzahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen sowie derzeitigen biointelligenten Technologien auf dem Markt. In den USA und China gibt es bisher noch keine marktreifen Ansätze für biobasierte Energien, obwohl eine hohe Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen und Patenterteilungen vorliegt.



Das **BIQ-Gebäude** setzt als weltweit erstes Gebäude mit einer Bioreaktorfassade neue Standards, indem es Mikroalgen in Glaspaneelen kultiviert, die Energie erzeugen, Licht steuern und Schatten spenden. Diese innovative Technologie ermöglicht eine nachhaltige Energiegewinnung. Die Algen werden in einem regelmäßigen Zyklus geerntet und können zur Erzeugung von Biogas oder für Forschungszwecke in den Bereichen Kosmetik und Lebensmittelindustrie genutzt werden. Das ganzheitliche Energiekonzept des BIQ basiert auf erneuerbaren Energiequellen wie Algenbiomasse, Solarenergie und Geothermie.



### Zellen im Druck: Bioprinting und additives Biomanufacturing als Schlüssel zur personalisierten Fertigung

Bioprinting und additives Biomanufacturing beziehen sich auf den schichtweisen Aufbau von lebendem Material in 3D-Strukturen sowie auf weitere additive Technologien wie bspw. Lasersintern. Diese Ansätze ermöglichen die Fertigung biologischer Strukturen. Viele Anwendungen beschäftigen sich mit dem Druck von menschlichem Gewebe für medizinische Zwecke (z. B. als Implantate, Organersatz, Prothesen) oder für den Test von Pharmazeutika und Kosmetika. Hiervon abzugrenzen sind Ansätze, die sich auf tierisches Gewebe konzentrieren und u. a. den Druck von künstlichem

Fleisch mit tierischen Zellen ermöglichen. Darüber hinaus kommen ähnliche Technologien auch bei der Herstellung weiterer Lebensmittel zum Einsatz. Auch die Herstellung von Biomaterialien ist ein Anwendungsfall, wobei häufig Pilze bzw. Myzel oder Enzyme als Grundstoff dienen. Grundstoffe von Bioprinting und additivem Biomanufacturing sind oft optimierte Biotinten, welche aufwendig entwickelt und getestet werden, bevor sie erfolgreich zum Einsatz kommen können. Viele der identifizierten Ansätze stellen Querschnittstechnologien zu anderen BTF dar. So werden z. B. Technologien der biobasierten/hybriden Mikro- und Nanotechnologie wie Organ-on-a-Chip oder mikrofluidische Chips erst durch Bioprinting ermöglicht.

Das Drucksystem an sich wird meist durch Computer, ergänzende Anlagen (z. B. Formpressen, Zentrifugen) und Kühlsystemen vervollständigt. KI kommt gelegentlich bei intelligenten Düsen zum Einsatz, die sich automatisch an sich verändernde Rahmenbedingungen anpassen. CAD und Slicer Software ist eine Grundvoraussetzung für die meisten Bioprinting-Technologien. Additives Biomanufacturing kann maßgeblich zur Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft beitragen, da die Grundmaterialien oft biobasiert sind und durch die Fertigungsweise effizient genutzt werden. Insbesondere durch Bioprinting können bedeutende Fortschritte im Bereich der Herstellung von funktionalen und lebensfähigen Organen erreicht werden.

Insgesamt konnten 18 konkrete Technologien, Produkte und Dienstleistungen im BTF Bioprinting und additives Biomanufacturing identifiziert werden. Hier von sind acht US-amerikanischen und drei deutschen Akteuren zuzuschreiben. Der TRL und die Biointelligenzskala befinden sich mit 6,3 bzw. 3,5 eher unter dem Durchschnitt, weshalb davon auszugehen ist, dass die technologische Entwicklung insgesamt noch am An-

fang steht. Keiner der Ansätze erreicht den Höchstwert von fünf. Alle 18 Technologien können direkt in der Produktion eingesetzt werden, womit der Produktionsfokus in diesem Feld am höchsten ist. Mit lediglich 86 Veröffentlichungen gibt es wenig Publikationen. Allerdings ist der Produktionsfokus mit 53 % sehr hoch. Aus den USA stammen 42 % der Publikationen, aus China 23 % und aus Deutschland 8 %. Auffällig ist, dass 9 % der Veröffentlichungen aus Australien kommen und so auch hier eine Fokussierung australischer Akteure zu erkennen ist. Mit einer Verzehnfachung ist der Zuwachs der Veröffentlichungen zwischen 2015–2018 und 2019–2022 sehr hoch. Neben den USA, China und Australien wird dieser Trend auch durch Singapur verstärkt. Im Vergleich zu der starken Zunahme der Veröffentlichungen, stagnieren die Patentanmeldungen in diesem BTF. Dieses mit 56 Patenten im Vergleich zu anderen BTF eher schwach aufgestellt. 63 % der Patenterteilungen stammen aus den USA und 25 % aus China. Wie in vielen BTF fällt auf, dass in China kaum Technologien und Konzepte identifiziert wurden, obwohl Aktivitäten sowohl in Forschung als auch bei Patentanmeldungen festgestellt werden konnten.



Die 4D-Bio-Drucktechnologie von **Precise Bio** ist eine Plattform für Innovationen, die Zellvermehrung, Biomaterialien, Prozesse, Drucktechnologie und andere wichtige Technologien umfasst. Sie bietet den Vorteil, komplexes Gewebe auf hoch reproduzierbare Weise zu generieren und Erkenntnisse aus der Herstellung eines Gewebes auf das nächste anzuwenden. Die Plattform ebnet den Weg für die Entwicklung komplexerer Gewebe und Organe.



#### Von der Messung zur Handlung: Biosensoren und Bioaktuatoren im Einklang

Biosensoren und Bioaktuatoren sind biobasierte Vorrichtungen und Systeme in der industriellen Produktion, die dazu dienen, biologische oder chemische Sig-

nale zu detektieren (z. B. in der Prozessüberwachung) und biologische bzw. chemische Prozesse zu initiieren. Biosensoren und Bioaktuatoren könnten künftig für die präzise Messung von biologisch aktiven Substanzen in Fermentationsprozessen genutzt werden.

Darüber hinaus ist der Einsatz bei der Prüfung von biologischen Zwischen- und Endprodukten denkbar. Ein weiteres mögliches Anwendungsfeld ist die Überwachung von Schadstoffwerten z. B. in Produktionshallen. In der Medizin können Biosensoren und Bioaktuatoren z. B. für die Überwachung und Regulation des Insulinspiegels bei Diabetespatienten eingesetzt werden. Die Integration von Biosensoren in Wearables oder implantierbare Geräte könnte die Gesundheitsüberwachung revolutionieren, indem sie kontinuierliche, real-time Daten über den körperlichen Zustand des Trägers liefert, was besonders für Patienten mit chronischen Erkrankungen hilfreich sein kann. Anwendungsfälleübergreifend werden die Technologien häufig über Geruchs- oder Geschmackssensoren abgebildet, die in der Regel auf Proteinen und mikrofluidischen Chips basieren. Diese werden mit elektronischen Komponenten (z. B. Elektroden, Displays, Computern) und Analyse-Software bzw. maschinellem Lernen kombiniert. Echtzeit-Tracking der beobachteten Parameter ist in vielen Fällen bereits heute möglich. Die Vorteile des Einsatzes von Technologien liegen in der Regel in der Steigerung der Produktivität, der Einsparung von Zeit und Personal und in Einzelfällen in der Substitution von Tieren (z. B. Sprengstoffhunde).

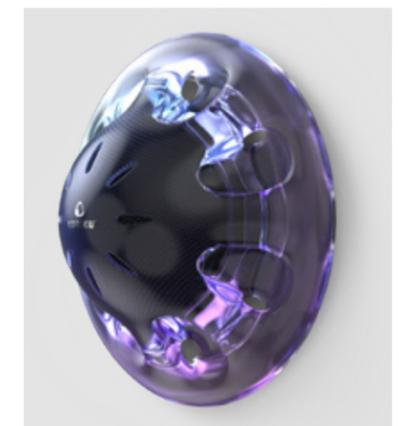
Im BTF Biosensoren und Bioaktuatoren konnten in Summe 20 biointelligente Technologien, Produkte und Dienstleistungen identifiziert werden. Die Hälfte

der Ansätze sind in den USA verortet, vier stammen aus Deutschland und drei aus Kanada. Der TRL von 6,9 und der Biointelligenzgrad von 3,9 liegen im Mittelfeld. Vier Systeme erreichen den Höchstwert von fünf Punkten. Von den 20 Technologien weisen acht einen deutlichen Fokus auf Produktion auf, während die restlichen zwölf als produktionsunterstützend eingestuft werden können.

Es wurden 837 wissenschaftliche Veröffentlichungen mit Fokus auf das BTF gefunden. Aus den USA stammen 40 % der Veröffentlichungen, aus China 28 % und aus UK/IE 10 %. Lediglich 15 % der Veröffentlichungen haben einen Produktionsfokus. Die Anzahl an Publikationen stieg in den Zeiträumen 2015–2018 und 2019–2022 um mehr als das Vierfache, wobei dieser Anstieg vor allem auf die USA, China und UK/IE zurückzuführen ist. Neben den Leitländern stammt eine größere Zahl an Publikationen aus Indien. Über alle Länder hinweg ist zu erkennen, dass die Anzahl an Veröffentlichungen in den letzten Jahren stark gestiegen ist. Mit 450 Patenten gehören Biosensoren und Bioaktuatoren dennoch zu den patentstärksten BTF. 63 % der Patente stammen aus den USA, 25 % aus China und lediglich 3 % aus Deutschland. Obwohl Deutschland eine umfassende Basis an Technologien, Produkten und Dienstleistungen aufweist, zeigt sich eine geringere Präsenz in Bezug auf wissenschaftliche Veröffentlichungen und Patentan-



Das Startup **Koniku** kombiniert in seiner Technologie synthetische Biologie mit Silizium, um Gerüche zu erkennen. Ähnlich wie GPUs Bilder digitalisieren und verarbeiten, erkennen und digitalisieren die Chips Gerüche und Geschmäcker. Die Chips sind in der Lage, Drogen und Sprengstoffe zu erkennen. Die Technologie soll auch dabei helfen, Krankheiten sicher und effektiv zu diagnostizieren und die Gesundheit in Echtzeit zu überwachen.



meldungen im Bezug zu dem BTF. In China verhält es sich genau umgekehrt.

### Mensch und Maschine verschmelzen: Der Einsatz von Human-Biomachine-Interfaces in der Produktion

Human-Biomachine-Interfaces sind biometrische Schnittstellen in der Produktion, die z. B. mit dem Nervensystem lebender Organismen, insbesondere Menschen, verbunden sind. Darüber hinaus gibt es Ansätze, die biologische Signale erkennen (z. B. Eye-Tracking bei Brillen) und entsprechend darauf reagieren. Anwendungen im Bereich der Human-Biomachine-Interfaces sind in der Regel Implantate und Elektroden, die mit dem menschlichen Nervensystem verbunden sind und Gehirnströme oder Nervensignale messen. Einige Schnittstellen verbinden technisches Equipment direkt mit dem Gehirn, wobei zwischen invasiven (z. B. Implantaten) und nicht-invasiven (z. B. Kopfband mit Elektroden) Techniken unterschieden wird. Andere Technologien setzen an Muskeln oder anderen Geweben an. Ein Beispiel hier sind neuromuskuläre Elektroden, die eine Verbindung zwischen Prothesen und den Nerven der Muskulatur herstellen und so ein tatsächliches Fühlen durch die Prothese ermöglichen. Insbesondere Technologien, welche in Kombination mit dem menschlichen Auge agieren, sind ergänzend zu nennen. Die Hardware-Komponente ist dabei meist eine Kontaktlinse inklusive Kamera. Neben künstlicher Intelligenz und maschinellem Lernen wird bei Human-Biomachine-Interfaces vereinzelt Augmented Reality eingesetzt.

Im BTF Human-Biomachine-Interfaces wurden 24 Technologien, Produkte und Dienstleistungen identifiziert. Die USA sind mit elf Technologien führend, gefolgt von Kanada und Deutschland mit jeweils drei Technologien. Der durchschnittliche TRL liegt bei 7,7. Die Hälfte der Technologien, Produkte und Dienstleistungen haben einen direkten Fokus auf die Produktion, während die andere Hälfte produktionsunterstützend fungiert. Der Wert der Biointelligenzskala liegt bei 3,8, wobei es keinen Ansatz gibt, der den Höchstwert von fünf erreicht.

In Summe wurden 2.189 wissenschaftliche Publikationen zu Human-Biomachine-Interfaces veröffentlicht.

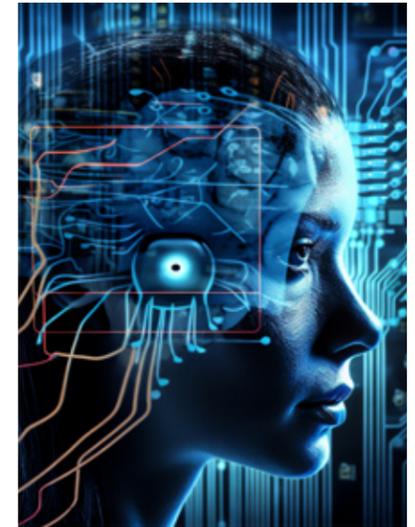
Dies stellt die dritthöchste Zahl an Veröffentlichungen unter allen BTF dar, wobei nur 2 % der Veröffentlichungen den Fokus auf die Produktion setzen. Aus China stammen 38 % der Veröffentlichungen, aus den USA 27 % und aus UK/IE 11 %. Zwischen den beiden Zeiträumen 2015–2018 und 2019–2022 gab es eine Steigerung von 175 %. Die Zunahme ist durch die Leitländer China, USA und UK/IE, aber auch durch Indien getrieben. Während die Anzahl der Veröffentlichungen stark zunimmt, fällt der Anstieg bei den Patentanmeldungen deutlich geringer aus. Von 344 Patentanmeldungen stammen 28 % aus den USA und 69 % aus China, welches hier die absolute Spitzenposition einnimmt. In anderen Ländern gibt es hingegen kaum Patente in diesem BTF. Es fällt auf, dass China keine Technologien aus der Biosensorik und Bioaktuatorik aufweist, obwohl die Forschung und Entwicklung dort absolut führend ist. In den USA verhält es sich umgekehrt.

### Kleine Wunder, große Zukunft: Die Anwendung von biobasierter / hybrider Mikro- und Nanotechnologie

Biobasierte/hybride Mikro- und Nanotechnologie bezeichnet die Integration von biologischem Material in Ansätze der industriellen Nano- bzw. Mikrotechnik. Ansätze der biobasierten/hybriden Mikro- und Nanotechnologie werden in der Regel durch mikrofluidische Chips oder Organ- bzw. Muscle-on-a-Chip-Konzepte umgesetzt. In seltenen Fällen werden Mikro- oder Nanoroboter entwickelt oder eingesetzt, die zusätzlich durch KI selbstadaptiv sein können. Außerdem sind Funktionsmaterialien und Beschichtungen zu nennen, die durch Nanopartikel in Kombination mit 3D-Druck und rationalem molekularem Design durch Selbstorga-



Das Startup **Neuralink** für Gehirn-Computer-Schnittstellen verfolgt das Ziel, Menschen mit schweren neurologischen Störungen zu helfen, indem es ihnen ermöglicht, Geräte und Kommunikation allein durch ihre Gehirnaktivität zu steuern. Hierzu wird ein kosmetisch unsichtbar und biokompatibles Implantat eingesetzt. Das Unternehmen erhielt im Mai 2023 die Genehmigung der US Food and Drug Administration für Versuche am Menschen. Probanden der Studie sollen vor allem querschnittsgelähmten Personen oder Patienten mit Amyotrophe Lateralsklerose (ALS) sein.



nisationen produziert werden. Ein Beispiel hierfür sind lipidbasierte Nanopartikel, welche mit Hilfe von KI formuliert werden und bei RNA-/DNA-Therapien zum Einsatz kommen. Neben KI sind auf der Softwareseite insbesondere App-Lösungen zu nennen, die bei der Steuerung und Sammlung von Daten unterstützen. Insbesondere mikrofluidische Chips haben das Potenzial den Einsatz von Menschen und Tieren zu Versuchszwecken zu ersetzen und einen Beitrag zur Energieeffizienz von Produktionen zu leisten. Nanopartikelbasierte Materialien können zur Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz beitragen, indem biobasierte und bioabbaubare Ressourcen zum Einsatz kommen.

Es konnten in Summe zwölf Technologien, Produkte und Dienstleistungen im BTF der biobasierten/hybriden Mikro- und Nanotechnologie gefunden werden. Vier sind in UK/IE verortet und jeweils zwei in Deutschland und den USA. Der durchschnittliche TRL ist mit 6,5 relativ niedrig. Der Wert von 3,6 auf der Biointelligenzskala, zeigt dass die Ansätze noch relativ am Anfang stehen und weitere Entwicklungen in den nächsten Jahren folgen. Auch hier gibt es keine Anwendung, die einen Wert von fünf auf der Biointelligenzskala erreicht. Ein Drittel der Technologien und Produkte haben einen direkten Anwendungsfokus auf die Produktion, womit der Großteil eher unterstützend eingesetzt wird.

Für das BTF wurden 441 Veröffentlichungen gefunden. Dabei kamen 36 % aus den USA, 26 % aus China und 14 % aus UK/IE. Lediglich 16 % der Veröffentlichungen haben einen direkten Fokus auf Produktion. Beim Vergleich der Zeiträume 2015–2018 und 2019–2022 ist eine Steigung der Publikationen um das Fünffache in den USA, Deutschland und UK/IE zu erkennen. Die Anzahl an erteilten Patenten wächst im Vergleich dazu langsam. Von 111 Patenten sind 75 % in den USA erteilt und 13 % in China. Bei allen untersuchten Kennzahlen zeigt sich, dass Deutschland über Technologien in diesem BTF verfügt, jedoch nur wenige Veröffentlichungen und Patente aus dem Land stammen.

### Lebendige Oberflächen: Biofunktionale Materialien und ihre Anwendung im Tissue Engineering

Biofunktionale Materialien und Oberflächen beziehen sich auf die industrielle Herstellung von Substanzen und Strukturen, die dazu dienen, biologische Funktionen auszuführen oder biologische Prozesse zu unterstützen. Tissue Engineering bezeichnet die künstliche Kultivierung von funktionsfähigem, biologischem Gewebe unter Verwendung von Zellen und biomaterialbasierten Gerüststrukturen. Biofunktionale Materialien und Oberflächen und Tissue Engineering-Technologien kommen in der personalisierten Medizin und der Entwicklung regenerativer Medizin zum Einsatz.



Die Berliner **TissUse GmbH** hat einen Multi-Organ-Chip entwickelt, der menschliche Organsysteme auf Biochips nachbildet. Dieser Chip, nicht größer als ein Smartphone, ermöglicht das Wachstum von bis zu vier dreidimensionalen Organmodellen, die durch einen künstlichen Kreislauf verbunden sind. Das Ziel ist ein „Human-on-a-Chip“ mit mehr als zehn Mini-Organen, der bis zu 80 Prozent der Tierversuche ersetzen könnte. Dieser Chip erlaubt es, die Wirkung von Medikamenten systemisch durch ein humanes Modell zu überprüfen, wodurch die Medikamenten-Entwicklung sicherer wird. Zukünftig könnten personalisierte Chips für individuelle Patienten erstellt werden, um die Reaktionen auf Wirkstoffe zu messen und Wechselwirkungen im Labor zu testen.

Ein beispielhaftes produktionspezifisches Verfahren im Bereich des Tissue Engineering ist der 3D-Biodruck. Mit dessen Hilfe ist es möglich, dreidimensionale Gewebestrukturen aus Zellen oder Biomaterial zu erstellen. Das bietet die Möglichkeit, zukünftig komplexe Gewebe wie beispielweise Blutgefäße herzustellen. Auch für die industrielle Produktion hat das BTF einen signifikanten Stellenwert. Die Biologisierung der Materialforschung bietet große Potenziale hinsichtlich der effizienten und funktionalen Ausrichtung eines Materialsystems und der Entdeckung neuer Ressourcen, Prinzipien und Verfahren. Biofunktionale Materialien sind in der Regel kreislauffähig und regenerativ. Hydrogele und bioabbaubare Polymere zählen zu den ersten Erfolgsbeispielen, die in Querschnittstechnologien wie dem 3D-Biodruck zum Einsatz kommen können. Durch die Kombination mit künstlicher Intelligenz sind Ansätze möglich, welche bereits in der Materialentwicklung die spätere Nutzung mitgestalten (z. B. selbstheilende Materialien, Selbstorganisation). Zu nennen ist hier der Drop-on-Demand-Ansatz, der Anforderungen und Standardprozesse für die bedarfsgerechte Herstellung von künstlichem Gewebe für die medizinische, aber auch industrielle Anwendung erfüllt.

Im Bereich biofunktionale Materialien und Oberflächen und Tissue Engineering wurden elf Technologien, Produkte und Dienstleistungen für die Realisierung einer biointelligenten Wertschöpfung identifiziert. Jeweils drei stammen von Akteuren aus den USA und Deutsch-

land. Der durchschnittliche TRL liegt bei 6,5. 36 % der Technologien befinden sich noch im Labormaßstab, während die anderen bereits Marktreife erreicht haben. Auf der Biointelligenzskala wird ein Wert von 3,7 erreicht, wobei lediglich zwei Technologien mit dem Höchstwert von fünf bewertet wurden. Mit 63 % liegt der Fokus deutlich auf dem Einsatz in der Produktion.

Mit einer Verdreifachung der Veröffentlichungen zwischen 2015–2018 und 2019–2022 zählt es zurzeit noch zu den BTF, die ein geringeres Wachstum aufweisen. Aus dem ansteigenden Verlauf kann geschlossen werden, dass das Thema in den nächsten Jahren ein erhebliches Potenzial für neue Forschungsansätze bietet. Insgesamt wurden im BTF 236 wissenschaftliche Veröffentlichungen identifiziert. 36 % stammen aus den USA, 30 % aus China und 14 % aus UK/IE. Anders als bei den wissenschaftlichen Publikationen steigt die Anzahl der Patentanmeldungen im Schnitt bereits seit 1995, flacht jedoch seit 2019 ab. Insgesamt wurden in diesem Zeitraum 240 Patente angemeldet, von denen 73 % aus den USA stammen.

#### Von der Sequenz zum Skript: Die Zukunft der Gensequenzierung und -editierung

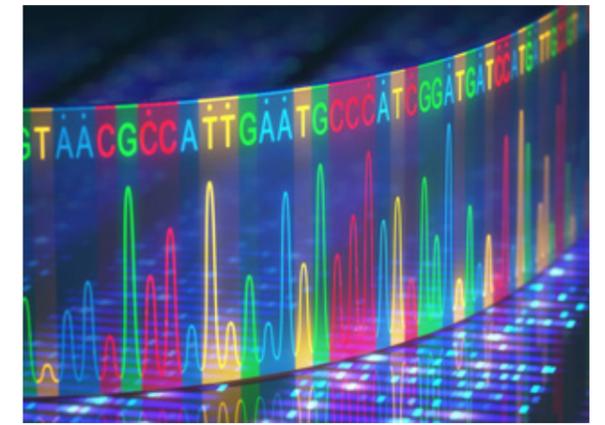
Die Gensequenzierung und -editierung ermöglichen die Entschlüsselung und gezielte Veränderung von DNA-Sequenzen in (Mikro-)Organismen zur Erschließung und Optimierung von neuen Produktionsprozessen. Technologien im Bereich der Gensequenzierung



Das niederländische Unternehmen **Basilisk** bringt Mikroorganismen in Beton ein, die dem Material selbstheilende Eigenschaften verleihen. Die Technologie basiert auf Mikroorganismen, die in Kontakt mit Sauerstoff und Wasser Kalziumkarbonat produzieren, mit dem Risse in Betonstrukturen selbstständig repariert werden können. Das autonome Reparatursystem kann sowohl bei Neubauten als auch bei bestehenden Bauwerken eingesetzt werden.

befassen sich vor allem mit der Analyse von Genomen und deren Struktur. Produktionsunterstützend sind Plattformen wie das Next-Generation-Sequencing. Dadurch wird ermöglicht, dass eine hohe Anzahl von DNA-Fragmenten parallel sequenziert werden kann, wodurch die Gensequenzierung und damit zusammenhängende Prozesse schneller und kosteneffizienter gestaltet werden können. Das BTF gehört zu den Disziplinen, das sich mit umfassenden Analysen von Erbinformationen in Mikroorganismen befasst. Durch den Fokus des BTF auf die Genomik wird sie unter dem Sammelbegriff „Omics“ eingeordnet, der Teilbereiche der modernen Biologie umfasst, welche sich mit der Analyse von Gesamtheiten ähnlicher Einzelelemente beschäftigen. Besondere Relevanz hat das BTF im Zusammenhang mit personalisierter Medizin. Darüber hinaus hat es eine signifikante Bedeutung für die Produktion in verschiedenen Sektoren und Industrien. Im Kontext der Energieerzeugung können Mikroorganismen durch Geneditierung so angepasst werden, dass aus ihnen nachhaltige Kraftstoffe produziert werden. Veränderte Proteine können zur Sequestrierung von Kohlenstoff oder der Reinigung der Umwelt vor Schadstoffen beitragen. Diese Ansätze können in produktionsnahen Anwendungen Menschen vor toxischen Stoffen schützen. Hierzu ist es notwendig, DNA-Sequenzen zu dekodieren und Berechnungskapazitäten aufzubauen, die bei der Erforschung von Funktionen in mikrobiellen Systemen beitragen.

Insgesamt konnten acht Technologien, Produkte und Dienstleistungen identifiziert werden. Darunter finden sich drei in UK/IE und zwei in den USA. Der durchschnittliche TRL liegt bei 8,5. Auf der Biointelligenzskala wird ein Wert von 3,7 erreicht. In der Literaturrecherche wurden 5.047 wissenschaftliche



Veröffentlichungen zu Gensequenzierung und -editierung identifiziert. Davon haben 233 einen direkten produktionstechnologischen Bezug. Durch die breite Anwendung der Geneditierung zur Erschließung und Optimierung von neuen Produktionsprozessen kann ein großer Teil der Veröffentlichungen ebenfalls in der industriellen Produktion Anwendung finden. Die Verteilung zeigt, dass 42 % der Gesamtveröffentlichungen aus den USA stammen, gefolgt von 17 % aus China und 10 % aus UK/IE. Insbesondere ab dem Jahr 2017 steigt die Anzahl der Veröffentlichungen verstärkt an. Die Gesamtanzahl der Veröffentlichungen stieg zwischen 2015–2018 und 2019–2022 um mehr als das Doppelte. Es ist zu beachten, dass die Zahl der Patentanmeldungen darauf hinweist, dass sich das BTF noch in einem frühen Stadium der Entwicklung befindet oder Hürden zu Patentanmeldung bestehen. In den führenden Ländern wurden lediglich 183 Patentanmeldungen gezählt, wobei 76 % aus den USA und 11 % aus China stammen. Trotzdem lässt die intensive Forschungstätigkeit auf ein erhebliches Potenzial für die Entwicklung innovativer Technologien schließen.

## Die Zukunft der Biotechnologie gestalten: Metabolic Engineering und synthetische Biologie einer biointelligenten Wertschöpfung

Metabolic Engineering und synthetische Biologie beschreiben die Anwendung biologischer Stoffwechselprozesse zur Erzeugung biobasierter Produkte und Rohstoffe in der industriellen Produktion sowie die komplette Neuschaffung von biologischen Systemen. Metabolic Engineering und synthetische Biologie setzt in den meisten Anwendungsfällen auf die Kombination von Zellkulturen, Bioreaktoren und Computern bzw. anderen elektronischen und informationstechnischen Komponenten. Daneben gibt es Innovationsplattformen für die Erforschung und Züchtung von Organismen, welche aus verschiedenen Modulen, z. B. digitalen Phänotyp-Untersuchungen und Genomanalysen, bestehen. Automatisierte Datenanalyse und KI werden vereinzelt eingesetzt und unterstützen die Prozesse zur Auswahl von Zellen sowie Zellbausteinen und den Design-Build-Test-Learn (DBTL)-Zyklus. Je nach Ausrichtung der Technologien stehen verschiedene Zelltypen und Biomoleküle.

Es konnten insgesamt sechs biointelligente Technologien, Produkte und Dienstleistungen im BTF Metabolic Engineering und synthetische Biologie identifiziert werden. Mit drei Technologien kann ein geographischer Schwerpunkt in UK/IE verortet werden. Der durchschnittliche TRL von 6,7 lässt darauf schließen, dass die identifizierten Technologien und Dienstleistungen noch am Anfang der Entwicklung stehen. Auf der Biointelligenzskala wird ein durchschnittlicher Wert von 3,7 erreicht. Lediglich eine der auf dem Markt befindlichen und den Kriterien entsprechenden Technologien erreicht den Höchstwert von fünf. Etwa zwei Drittel konnten als Produktionstechnologien eingestuft werden. Zwei Ansätze werden hingegen produktionsunterstützend eingesetzt.

Insgesamt wurden 532 wissenschaftliche Publikationen identifiziert, von denen nur 22 % direkt auf die Anwendung in der Produktion fokussieren. 42 % stammen aus den USA, 24 % aus China und 15 % aus UK/IE. Lediglich 5 % der Veröffentlichungen entfallen auf Deutschland. Insgesamt stieg die Anzahl der Veröffentlichungen im Vergleich der Zeiträume 2015–2018 und 2019–2022 um das Vierfache.



Dieser Anstieg ist vor allem auf die Leitländer USA, Deutschland und UK/IE zurückzuführen. Hinsichtlich der Patenterteilungen ergibt sich ein ähnliches Bild. Von 343 erteilten Patenten stammten 84 % aus den USA. Unter allen 17 BTF stellt dies den Höchstwert für das Land dar. Die Diskrepanz zwischen der geringen Anzahl an Technologien im Land (eine) und dem hohen Wert an Patenterteilungen lässt darauf schließen, dass die USA in diesem Bereich erst zuletzt tätig geworden sind und in den kommenden Jahren mit einem signifikanten Anstieg an Technologien zu rechnen ist. Daneben ist auffällig, dass in China keine Technologien, Produkte oder Konzepte identifiziert werden konnten, obwohl auch dort viel Forschung zu diesem BTF stattfindet.

## Intelligente Synergien: Bio-(Hybrid-) und Soft-Robotik gestalten die nächste Ära der Robotertechnologie

Bio-(Hybrid-) und Soft-Robotik beziehen sich auf die Integration von Eigenschaften lebender Organismen in Robotersysteme, die Teile von industriellen Produktionsprozessen sind. Die identifizierten Anwendungen des BTF Bio-(Hybrid-) und Soft-Robotik zeigen, dass deren Ausgestaltung sehr unterschiedlich sein kann. Eigenständig agierende Roboter begleiten bspw. Astronauten bei Weltraummissionen. Exoskelette unterstützen menschliche Tätigkeiten in der Logistik, der Montage oder in anderen Anwendungsfällen, bei denen Kraft, Schnelligkeit und Präzision notwendig sind. Von Menschen gesteuerte Roboter(-arme) sind ebenfalls in der Produktion üblich. Sie kommen häufig in der Chirurgie oder der Produktion von Waren zum Einsatz.

In einigen Fällen wird versucht, die Hand-Augen-Koordination des Menschen zu imitieren, was bei Hochgeschwindigkeits-Industrierobotern für bspw. Kommissionierungsarbeiten zum Einsatz kommen kann. Typischerweise werden alle Ansätze durch Sensoren, Displays, Computer und ggf. Eingabegeräte ergänzt. Software dient vor allem der Auswertung von Sensordaten, der Programmierung der Roboter und der Generierung von Schnittstellen. KI wird aktuell selten eingesetzt, doch einige Teams forschen an ihrer Implementierung in Robotersysteme in der nahen Zukunft.

Es konnten drei biointelligente Technologien, Produkte und Dienstleistungen aus dem BTF der Bio-(Hybrid-) und Soft-Robotik identifiziert werden. Zwei davon stammen aus den USA und eine aus Deutschland. Auffallend ist hier, dass der TRL bei 8,3 liegt, da die beiden US-Technologien bereits in der Produktion in großem Maßstab eingesetzt werden. Die Biointelligenzskala liegt bei 3,0. Keine der Technologien bzw. Produkte erreicht den Höchstwert. Für den direkten Produktionseinsatz sind ebenfalls die beiden US-Technologien geeignet, während der Ansatz aus Deutschland produktionsunterstützend eingesetzt wird.

Es konnten 494 Veröffentlichungen im BTF identifiziert werden. Mit einem Anteil von 16 % ist der Produktionsfokus relativ gering. Mehr als die Hälfte (55 %) der Veröffentlichungen kommen aus den USA, die einen starken Fokus auf die Erforschung des Feldes legen. Mit 13 % fokussiert sich Deutschland, relativ zu anderen BTF, stärker auf dieses Thema. Mit

einem Anteil von nur 12 % ist China von allen BTF hier am wenigsten aktiv. Der Vergleich der Zeiträume 2015–2018 und 2019–2022 zeigt einen moderaten Anstieg der Veröffentlichungen um 97 %, was im Vergleich zu anderen Feldern gering ist. Neben den USA, Deutschland und China ist auch Italien für diesen Anstieg verantwortlich. Interessant ist der Vergleich zu den erteilten Patenten, da diese in den letzten Jahren zahlenmäßig deutlich stärker gestiegen sind. Mit 2.047 Patenten hat das BTF mit Abstand die meisten Erteilungen aller Felder. Dabei entfallen 99 % der Patente auf China, obwohl dort keine einzige Technologie identifiziert wurde und nur wenige Publikationen veröffentlicht wurden. Da die Patenterteilungen in der Regel zeitlich vor den Publikationen ansteigen, ist zu erwarten, dass in den nächsten Jahren ein erheblicher Anteil der Publikationen und der konkreten Technologien aus China kommen wird. Deutschland konnte im gleichen Zeitraum nur eine Patenterteilung melden.

## Biologische Bits: Die Revolution der Datenverarbeitung durch Bio-Computing und Data Storage

Bio-Computing und Data Storage beziehen sich auf die Verwendung von biologischen Materialien und Prozessen zur Verarbeitung, Speicherung und Übertragung von Informationen in der industriellen Produktion. In der Produktion können entsprechende Ansätze auf verschiedene Arten eingesetzt werden, um Produktionsprozesse zu optimieren. Bspw. können genetisch modifizierte Organismen in den Prozess eingebunden werden, um Optimierungsprobleme effizienter zu lö-



Das **Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme** in Stuttgart betreibt Forschung im Bereich künstlicher Muskeln mit dem Ziel, eine neue Klasse von Aktuatoren zu entwickeln, die als Schlüsselkomponenten in allen Robotersystemen dienen sollen. Im Rahmen dieser Bemühungen wurde die Plattformtechnologie HASEL („hydraulisch verstärkte selbstheilende elektrostatische Aktoren“) entwickelt. HASEL-Aktuatoren könnten die erste Technologie sein, deren Leistungskennzahlen und -fähigkeiten in vollem Umfang denen eines biologischen Muskels entsprechen (187).

sen. Ein weiterer Anwendungsbereich kann die neurobiologische Modellierung sein. Durch die Nutzung biologischer Prinzipien des Nervensystems könnten neuronal inspirierte Algorithmen entwickelt werden, die z. B. bei der Berechnung von komplexen Szenarien eingesetzt werden könnten.

Im Bereich Bio-Computing und Data Storage konnte nur eine Technologie aus Australien identifiziert werden. Ähnlich wie im Feld Soft-Sensorik und KI wird die Umsetzung der Ansätze noch nicht aktiv betrieben. Aber auch hier zeigt sich rege Aktivität auf Forschungsebene. Insgesamt wurden 2.669 wissenschaftliche Publikationen zu diesem Thema veröffentlicht. Die Publikationen aus den USA mit 35 % und China mit 33 % nehmen den größten Anteil ein, gefolgt von UK/IE mit 10 % sowie Deutschland mit 8 %. Obwohl dieses BTF im Vergleich zu den anderen definierten Feldern die meisten wissenschaftlichen Veröffentlichungen aufweist, ist die Anzahl zwischen den Zeiträumen 2015–2018 und 2019–2022 lediglich um 34 % angestiegen. Somit weist dieses Feld das geringste Wachstum unter allen BTF auf. Anders als bei den anderen Feldern kann ein linearer Anstieg der Publikationen ab Mitte der 80er-Jahre verzeichnet werden, wodurch Bio-Computing und Data Storage zu einem der BTF zählt, die schon relativ früh ein Forschungsinteresse ausgelöst haben. Das spiegelt sich auch bei den Patenanmeldungen wider. Insgesamt wurden 78 Anmeldungen identifiziert, wobei die meisten Patente zwischen 1983 und 2013 beantragt wurden. Ab 2013 sind kaum noch Patentanmeldungen zu verzeichnen. Auch hier gehören die USA mit 45 % und China mit 32 % zu den Hauptakteuren. Durch den relativ frühen

Beginn der Forschungsaktivitäten besteht nun eine hohes Potenzial, das Wissen in Technologien umzusetzen.

#### Künstliche Intelligenz und Soft-Sensorik: Die Symbiose von Denken und Fühlen

Soft-Sensorik und KI spielen eine zentrale Rolle in der biointelligenten Wertschöpfung. Dabei werden virtuelle Sensoren eingesetzt, um Produktionsdaten indirekt zu messen und zu simulieren, basierend auf alternativen Datenquellen. Gleichzeitig ermöglichen Echtzeitüberwachung und Vorhersagen durch KI eine präzise Steuerung von Prozessen, wie bspw. die Überwachung chemischer Reaktionen oder Kraftwerken. Soft-Sensorik und KI könnten z. B. Anwendung im Bereich der Prozessanalyse und -optimierung finden. Vor allem bei biologischen und chemischen Prozessen ist das essenziell, um Prozessparameter optimal an die erforderlichen Bedingungen spezifischer Mikroorganismen anpassen zu können. In Kombination mit künstlicher Intelligenz könnten so bspw. Vorhersagen über die Qualität des Produkts oder des Prozesses getroffen und gegebenenfalls sofortige Anpassungen der Parameter vorgenommen werden. Dies ist bei biologischen Prozessen von Vorteil, da sich Schwankungen durch äußere Einflüsse stärker auf die Qualität auswirken können.

Soft-Sensoren sowie KI benötigen eine große Trainingsdatenbasis für den unterstützenden Einsatz in der Produktion. Aus den Experteninterviews geht hervor, dass teilweise nicht ausreichend Daten für eine marktreife Entwicklung dieser Ansätze gesammelt oder zur Verfügung gestellt werden. Auch wenn der Einsatz von Soft-Sensorik in Kombination mit künst-

licher Intelligenz noch nicht aktiv betrieben wird, zeigt sich ein starkes Interesse auf der Forschungsebene. 107 wissenschaftliche Publikationen befassen sich mit Soft-Sensorik und KI im Rahmen einer biointelligenten Wertschöpfung. Außerdem ist seit 2017 eine Vervierfachung der Publikationen zu verzeichnen, wodurch sich das BTF unter den Top-sechs der beschriebenen Felder befindet. Als Leitland bei den wissenschaftlichen Publikationen ist vor allem China zu nennen, das mit 58 Publikationen mehr als 50 % der Literatur ausmacht. 13 % der Publikationen stammen aus den USA, gefolgt von UK/IE mit 9 %. In Israel und Norwegen sind noch keine Veröffentlichungen zu verzeichnen. Obwohl das Feld in der Literatur noch recht neu ist, gibt es bereits Patentanmeldungen in der USA, Schweden und China. Insgesamt wurden 24 Patenterteilungen identifiziert. 16 davon wurden in China angemeldet, sieben in der USA und eines in Schweden. Besonders anzumerken ist, dass China verhältnismäßig wenig Patentanmeldungen im Vergleich zur USA aufweist. Dieser Unterschied könnte durch verschiedene Forschungspraktiken hervorgerufen werden. Aus Expertensicht ist die Forschung in den USA vor allem profitorientiert. In China hingegen wird ein „Gießkannenprinzip“ angewandt, wobei in viele Richtungen geforscht wird, aber nur einige wenige vielversprechende Ergebnisse liefern.

#### Von der DNA bis zum Endprodukt: Rückverfolgbarkeit und Blockchain in biologischen Prozessen

Rückverfolgbarkeit und Blockchain ermöglichen in der biointelligenten Wertschöpfung die lückenlose, sichere und transparente Aufzeichnung und Verwaltung von Produkt- und Prozessdaten, einschließlich der Herkunft von Rohstoffen und der Produktgeschichte. Rückverfolgbarkeit und Blockchain können in verschiedenen Anwendungskontexten der biointelligenten Wertschöpfung zum Einsatz kommen, z. B. bei der Weitergabe von Patienteninformationen im Kontext einer biointelligenten Produktion personalisierter Therapien. Im Datenmanagement steht die sichere und transparente Speicherung sowie Weitergabe von Informationen im Vordergrund. Insbesondere bei klinischen Studien oder Versuchen kann auf diese Weise die Integrität erhöht werden. Ein weiterer wichtiger Anwendungsfall ist das Lieferkettenmanage-

ment und der Produktlebenszyklus. Mittels Blockchain können hierbei der gesamte Lebenszyklus eines Materials oder eines Produktes rückverfolgt und somit Hinweise über die Herkunft von bestimmten Rohstoffen gegeben werden. Im BTF konnte eine Technologie aus den USA identifiziert werden. Der TRL liegt bei 9 und der Wert auf der Biointelligenzskala bei 3. Vor allem für die sichere Nachverfolgung von (biologischen) Rohstoffzertifikaten ist diese Technologie damit sinnvoll. Hinsichtlich geistigen Eigentums und Patenten kann Traceability den Nachweis der Urheberschaft von Erfindungen vereinfachen. Am Lebensende eines Produktes können durch Rückverfolgbarkeit und Blockchain wichtige Informationen gespeichert und weitergegeben werden, die für eine etwaige Weiterverwendung im Second Life oder dem Recycling gebraucht werden (z. B. Materialzusammensetzung, Speicherkapazität von Batterien). Die Anzahl der wissenschaftlichen Publikationen bei Rückverfolgbarkeit und Blockchain ist mit 52 die kleinste im Vergleich zu den anderen BTF. Zwischen 2015–2018 und 2019–2022 ist ein annähernd exponentieller Anstieg der wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu verzeichnen mit einer Steigerung um das 15-Fache. Damit nimmt dieses Feld hinter digitale Plattformen, Modellen und Zwillingen Platz 2 der wachstumsstärksten BTF im Bereich der Forschung ein. China macht mit 44 % den Hauptanteil der Leitländer aus, gefolgt von UK/IE mit 15 %. In Israel und Finnland wurden zu diesem Thema noch keine wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht. Auffällig ist, dass insgesamt deutlich mehr Patentanmeldungen – zum Teil bereits vor der Veröffentlichung wissenschaftlicher Erkenntnisse – durchgeführt wurden. Auch hier ist China der Hauptakteur. Mit 78 der 89 Patentanmeldungen hat China einen Anteil von 87 %. Damit gehört das BTF in China zu den Top-fünf der anmeldestärksten BTF.



Das australische Unternehmen **Cortical Labs** kultiviert aus Stammzellen ausdifferenzierte Neuronen auf einem Elektroden-Array. Dort kann das Array mit Computerkomponenten kommunizieren, indem es die gleichen elektrischen Signale verwendet, die es im menschlichen Körper sendet und empfängt. Es zeigt daher auch Lernverhalten. Die Umsetzung in Form eines Dish-Brains ist bereits in der Lage das Videospiel Pong selbstständig zu spielen.



Deutschland zählt in vielen Befähigertechnologiefeldern (BTF) zu den Vorreitern bei der grundlegenden Forschung und Entwicklung von wesentlichen Aspekten der biointelligenten Wertschöpfung. Hierzu gehören die Bereiche Smart Greenhouse und Smart Farming, biobasierte Energieerzeugung und -speicherung sowie Bioraffinerien und Bioreaktoren. Hinsichtlich der Publikationen fällt Deutschland hingegen deutlich hinter die USA, China und teilweise UK / IE zurück. Im Feld digitale Plattformen, Modelle und Zwillinge ist das Land, bezogen auf die Veröffentlichungen, zwar führend, doch in den meisten anderen Bereichen ist die Publikationsquote gering. Noch deutlicher fällt der Rückstand im Vergleich zu den USA und China bei der Anmeldung und Erteilung von Patenten aus. Hier kann Deutschland lediglich im BTF Bio-Computing und Data Storage einen höheren Anteil an den Patenterteilungen verzeichnen. In Summe ist zu erkennen, dass die Grundlagenforschung in Deutschland gut ausgebaut ist, jedoch der Transfer in die industrielle Anwendung nicht vollumfänglich zu gelingen scheint. Experten sind sich einig, dass es in diesem hochdynamischen Umfeld darauf ankommt, das deutsche Engagement kontinuierlich auszubauen und die Lücke zu den USA und China zu schließen. Die hohen Patent- und Publikationszahlen dieser beiden Länder lassen vermuten, dass die Forschung zur biointelligenten Wertschöpfung dort in Zukunft weiter verstärkt werden könnte.

<sup>16</sup> „Um die Zukunft zu meistern, ist die Verschmelzung von Bioökonomie- und Biotechnologiekompetenzen mit Digitalisierung und künstlicher Intelligenz unerlässlich. Auf dem Weg zur vierten industriellen Revolution wird die Bioökonomie, die diese Elemente miteinander verbindet, zu einem wichtigen Akteur.“ (Jukka Kantola, WorldBioeconomyForum)

<sup>17</sup> „In vielen Studiengängen sind die faszinierendsten Herausforderungen nicht auf ein bestimmtes Gebiet beschränkt, sondern finden sich an den Schnittstellen. Wenn man sich in einem Bereich wissenschaftlich vertieft, neigt man natürlich dazu, sich mit Problemen zu befassen, die mit der Richtung, in die man vorankommt, übereinstimmen.“ (Prof. Brian F. Pfeleger, Universität von Wisconsin)

# MARKT- UND INVESTITIONSPOTENTIALE DER BIOINTELLIGENTEN WERTSCHÖPFUNG

Im Rahmen einer umfassenden Marktanalyse wurden die 17 BTF in insgesamt 83 Marktsegmente unterteilt und hinsichtlich des Marktvolumens, des Marktwachstums und des notwendigen Anfangsinvestitionsvolumens analysiert.

Abbildung 12 visualisiert die Summen der Marktvolumina sowie die Durchschnitte des Marktwachstums aller Marktsegmente bis 2030, aggregiert auf Ebene der BTF. Die Mehrzahl der betrachteten BTF weisen eine jährliche Wachstumsrate (WR) zwischen fünf und 15% auf. Das BTF Bio-Computing und Data Storage liegt mit ca. 30% p. a. hingegen deutlich über diesem Bereich und ist das am stärksten wachsende Feld. Die BTF Rückverfolgbarkeit und Blockchain mit 28% p. a. und Human-Biomachine-Interfaces mit knapp 20% p. a. wachsen ebenfalls deutlich stärker als der Durchschnitt. Die geringsten Wachstumsraten sind in den Feldern biobasierte Energieerzeugung und Speicherung, Biosensoren und Bioaktuatoren, Metabolic Engineering und synthetische Biologie sowie Bioraffinerien und Bioreaktoren zu finden, welche alle jeweils knapp unter 8% pro Jahr wachsen.

Bei der Betrachtung der Marktvolumina zeigt sich, dass Bioraffinerien und Bioreaktoren mit ca. 20 Mrd. USD und Biosensoren und Bioaktuatoren mit 19,4 Mrd. USD die größten Marktsegmente darstellen. Metabolic Engineering und synthetische Biologie (17,5 Mrd. USD) und Smart Greenhouse und Smart Farming (16 Mrd. USD) folgen mit knappem Abstand. Die BTF mit dem geringsten Marktvolumen sind Biofoundries und Hochdurchsatzscreening durch Laborautomatisierung (2 Mrd. USD), Human-Biomachine-Interfaces (1,4 Mrd. USD) und Bio-Computing und Data Storage (1,4 Mrd. USD).

Generell lässt sich feststellen, dass Märkte mit hohem Marktwachstum ein eher geringeres Marktvolumen aufweisen und umgekehrt. Dies ist damit zu erklären, dass Märkte mit hohen Umsätzen in der Regel bereits stärker entwickelt und damit gut etabliert sind. Märkte mit geringem Marktvolumen stehen hingegen häufig

noch am Anfang der Entwicklung, weshalb auch das Wachstum des Marktes meist stärker ist. Die Märkte der 17 BTF folgen damit dem typischen S-Kurvenkonzept, nach welcher sich das Marktwachstum zunächst beschleunigt und dann abschwächt. Das BTF Rückverfolgbarkeit und Blockchain hat sowohl ein hohes Marktvolumen als auch eine hohe Wachstumsrate. Damit ist das Feld eines der vielversprechendsten, was das zukünftige Potenzial der Technologien, Produkte und Dienstleistungen betrifft.

Die aktuelle Marktgröße aller BTF (Abbildung 13) beläuft sich auf 139,9 Mrd. USD. Dabei ist zu beachten, dass geringfügig Doppelerfassungen zwischen den BTF möglich sind. Die WR liegt bei 12,4% bis 2030, was einem zukünftigen Marktvolumen von 402 Mrd. USD entspricht. Bis 2040 wird ein Gesamtwachstum von 10% pro Jahr erwartet. Das Marktvolumen steigt demnach auf 849,3 Mrd. USD. Die biointelligente Wertschöpfung könnte einen großen Teil des zukünftigen Biotechnologie-Marktes abdecken, welcher in 2030 ein Volumen von 1,35 Bill. USD erreichen wird (184). Der Vergleich mit dem heutigen und zukünftigen Bruttoinlandsprodukt zeigt, wie stark der Anteil und damit die Bedeutung von biointelligenter Wertschöpfung in Zukunft steigen könnte. Aktuell liegt das BIP der elf Leitländer bei 57,6 Bill. USD (185). Der Anteil biointelligenter Wertschöpfung beträgt mit 139,9 Mrd. USD 0,24%. Die Prognose für das BIP beläuft sich im Jahr 2040 auf 92,52 Bill. USD (186). Da Märkte der biointelligenten Wertschöpfung schneller wachsen als die gesamten Volkswirtschaften, wird der Anteil am BIP auf 0,92% steigen.

Für die Aufteilung der aktuellen Marktvolumina auf die elf Leitländer gibt es, stand heute, keine validen

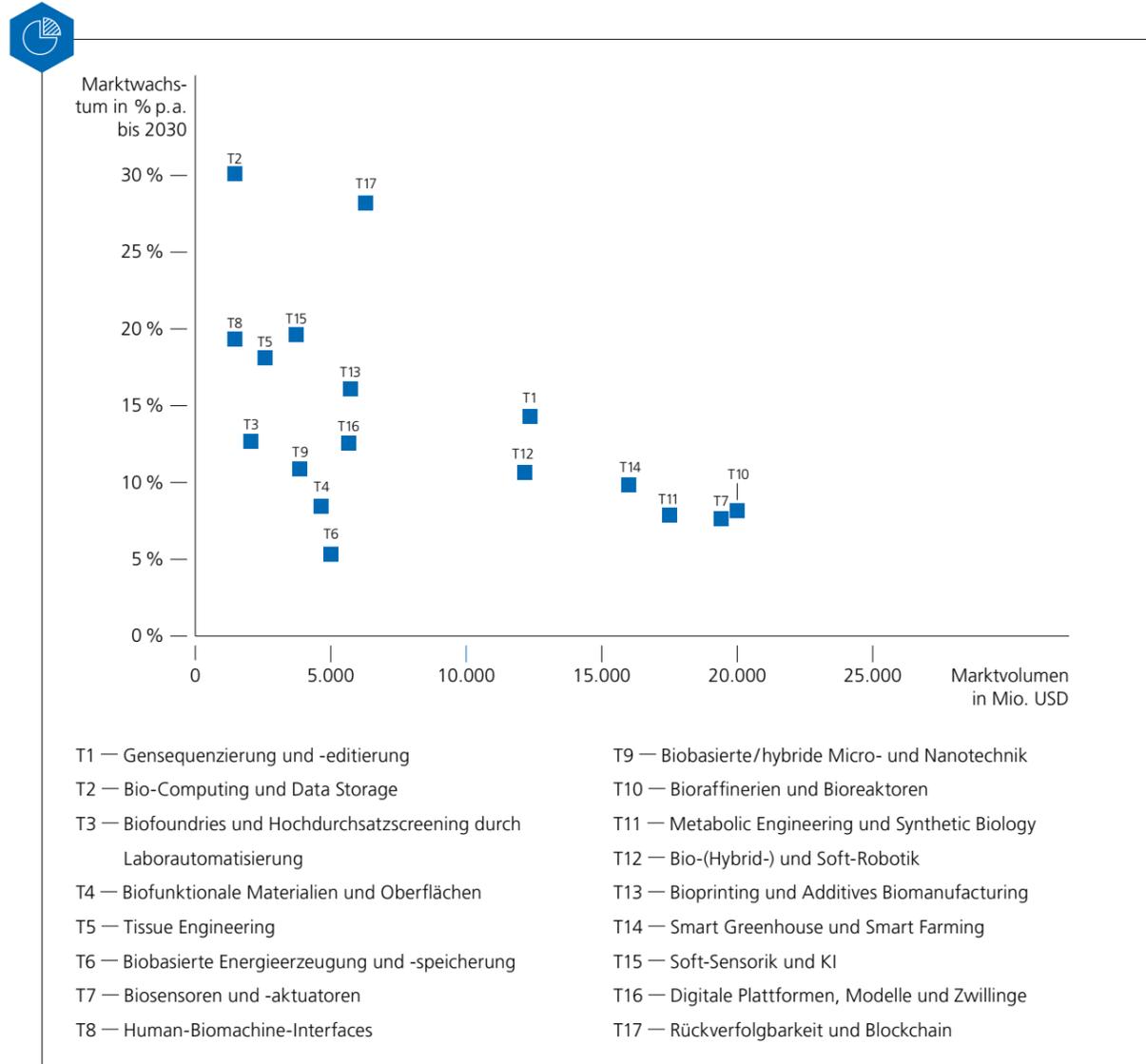


Abbildung 12: Einordnung des Marktvolumens und Marktwachstums bis 2040 je Befähigertechnologiefeld.

Marktzahlen. Mit Ersatzwerten aus ähnlichen Alternativmärkten (sogenannte Proxy-Werten) lässt sich jedoch eine näherungsweise Verteilung abschätzen. Wird der gesamte Biotechnologie-Markt als Proxy-Markt herangezogen, so ergibt sich folgende Aufteilung: 47 % des Gesamtmarktvolumens wird in den USA generiert, 28 % in China, 6 % in Kanada, jeweils 4 % in Deutschland, UK/IE und den Niederland, 3 % in Australien und jeweils 1 % in Norwegen, Schweden, Finnland und Israel (184). Ein stichprobenartiger Vergleich des deutschen Wertes durch die ermittelten Gesamtumsätze von Unternehmen im Wirtschaftszweig Forschung und Entwicklung im Bereich Biotechnologie kann die gezeigte Länderverteilung bestätigen

(187). Die Verteilung der zukünftigen Marktvolumina in 2030 oder 2040 lässt sich durch Marktreports, Expertenschätzungen und Proxy-Werten nicht zuverlässig ableiten, da diese stark abhängig von der Schaffung von notwendigen Rahmenbedingungen in den betrachteten Ländern ist. Länder, welche bereit sind in die Marktentwicklung und die Infrastruktur zu investieren, werden voraussichtlich stärker von Marktwachstumsraten profitieren und höhere Anteile an den zukünftigen Marktvolumina generieren.

Die dargestellten zukünftigen Marktwerte aller 83 Marktsegmente wurden ohne die Berücksichtigung eines Risikofaktors geschätzt und berechnet. Die Be-

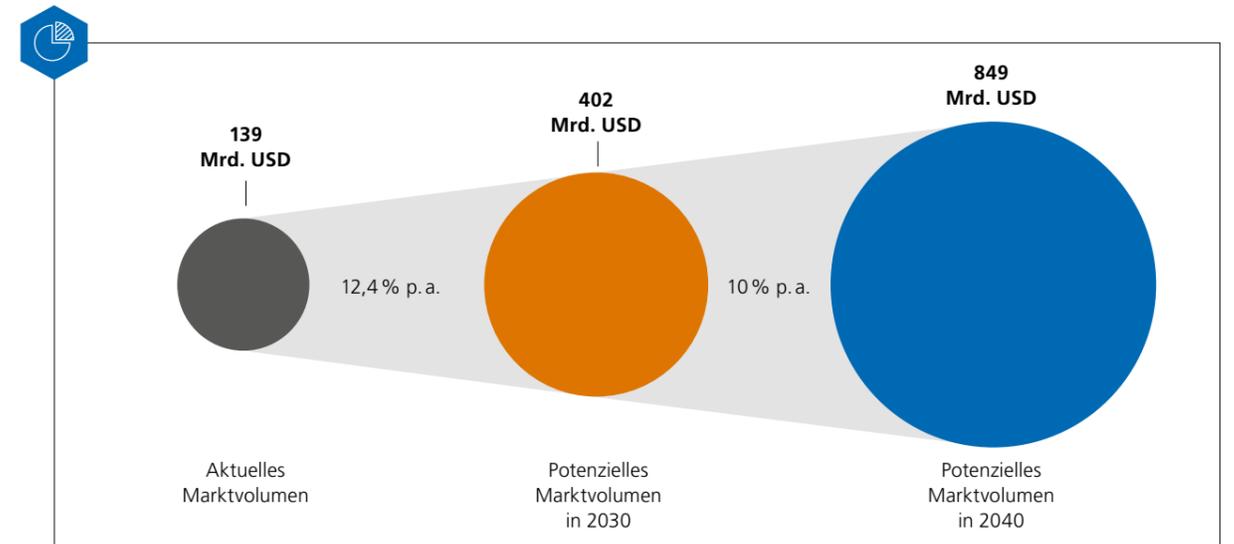


Abbildung 13: Entwicklung des Marktvolumens über alle 17 Befähigertechnologiefelder in den Jahren 2021, 2030 und 2040.

rücksichtigung von Risikofaktoren ist ein probates Mittel der Marktprojektion, mit dem der Unsicherheit der zukünftigen Marktentwicklung Rechnung getragen wird. In Risikofaktoren werden bspw. zukünftige konjunkturelle oder politische bzw. regulatorische Risiken abgeschätzt, welche sich aktuell nur schwer prognostizieren lassen. Nach Expertenmeinung könnte dieser Faktor bei etwa 50 % liegen, da sich in der Regel lediglich 30 bis 40 % aller Marktsegmente eines Feldes erfolgreich entwickeln. Wird dieser Risikofaktor bei der Kalkulation der jährlichen Wachstumsraten aller BTF mit einbezogen, sinken diese auf 6,2 % p.a. bis 2030 und 5 % bis 2040. Das zukünftige Gesamtmarktvolumen in 2030 beträgt demnach 240,9 Mrd. USD in 2030. In 2040 liegt es bei 352,2 Mrd. USD.

Um die prognostizierten Marktwachstumsraten zu erreichen, sind in der Regel Anfangsinvestitionen in die einzelnen Märkte bzw. BTF notwendig. Das notwendige globale Anfangsinvestitionsvolumen zur Entwicklung der beschriebenen Marktsegmente beläuft sich über alle 17 BTF hinweg auf 16,65 Mrd. USD. BTF-übergreifend gilt insbesondere der Transfer zwischen Wissenschaft und Unternehmenspraxis als eine Herausforderung. Er kann jedoch durch die Etablierung umfassender Programme und Investitionen unterstützt werden. Die Schaffung einer digitalen Infrastruktur aus Breitbandinternet, 5G-Netzen und Cloud-Diensten ist ebenfalls für alle BTF elementar. Auch die Grundlagenforschung der meisten Felder ist

ein valider Ansatzpunkt für weitere Investitionen und Entwicklungen. Eine wichtige Voraussetzung ist zudem die Sammlung, Sicherung und Verarbeitung von großen Datenmengen.

In *Abbildung 14* ist der Vergleich zwischen den notwendigen Anfangsinvestitionen und dem zukünftigen Marktwachstum je BTF dargestellt. Aus diesem Vergleich ist erkennbar, welche Märkte einen hohen Umsatz aus den jeweiligen Investitionen erwirtschaften. Im BTF Human-Biomachine-Interfaces ist der notwendige Investitionsbedarf hoch, während das Marktvolumen in 2040 vergleichsweise gering ist. Daraus könnte abgeleitet werden, dass die Investitionen in dieses BTF weniger wirtschaftlich sind als in jenen mit umgekehrtem Verhältnis. Gleiches gilt für die Felder Biofoundries und Hochdurchsatzscreening durch Laborautomatisierung, biofunktionale Oberflächen und Materialien, biobasierte Energieerzeugung und -speicherung sowie biobasierte / hybride Mikro- und Nanotechnik. Dementgegen sind die Anfangsinvestitionen in den Feldern Gensequenzierung und -editierung, Biosensoren und Bioaktuatoren, Bioprinting und additivem Biomanufacturing, Smart Greenhouse und Smart Farming sowie Rückverfolgbarkeit und Blockchain verglichen mit den zukünftigen Marktvolumina in diesen Feldern gering. Die Wirtschaftlichkeit der Anfangsinvestitionen ist demnach höher, da aus diesen ein höheres Marktwachstum entspringt.

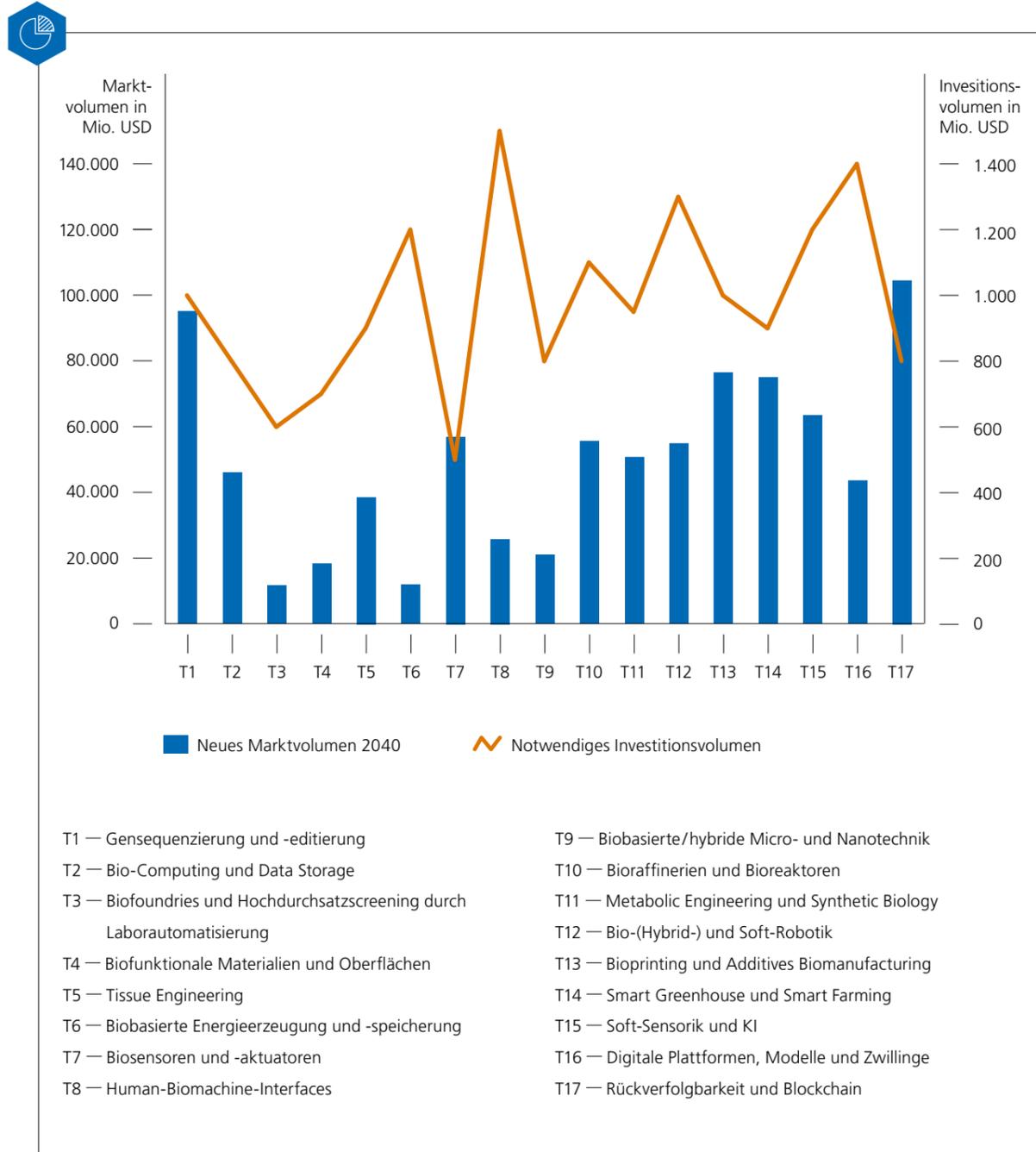


Abbildung 14: Anfangsinvestitionen im Vergleich zu zukünftigen Marktvolumen 2040 je Befähigertechnologiefeld.

Im Folgenden werden die aktuellen Marktvolumina und das Wachstum von wesentlichen Marktsegmenten der biointelligenten Wertschöpfung bis 2030 und 2040 dargestellt zu beschreiben. Darüber hinaus werden relevante Akteure und Auswirkungen von Märkten auf die fünf Bedürfnisfeldern dargestellt. Außerdem werden in jedem BTF die erforderlichen Investitionsvolumina und die konkreten Investitionsansätze beschrieben, welche

notwendig sind, um das Marktsegment zu entwickeln und die prognostizierten Marktvolumina zu erreichen. Der Fokus hierbei liegt auf den Anfangsinvestitionen in den jeweiligen Markt und nicht auf der vollständigen Entwicklung bis in die Reifephase. Die qualitativen Investitionsanforderungen ergeben sich aus den Erkenntnissen des Expertenbeirats und der Aggregation der Aussagen aus den Experteninterviews.

### Bioraffinerien und Bioreaktoren

Im BTF Bioraffinerien und Bioreaktoren wurden vier Marktsegmente definiert. Insgesamt weist das Feld ein aktuelles Marktvolumen von 20 Mrd. USD auf und gehört damit zu den größten BTF. Bis 2030 und 2040 wird eine WR von 8,1 bzw. 5,5% prognostiziert, was

im Vergleich mit den anderen Feldern eher gering ist. Das zukünftige Marktvolumen im Jahr 2030 wird damit etwa 40,3 Mrd. USD und 2040 knapp 55,6 Mrd. USD betragen. *Abbildung 15* zeigt die Entwicklung der Marktvolumina bis ins Jahr 2040.

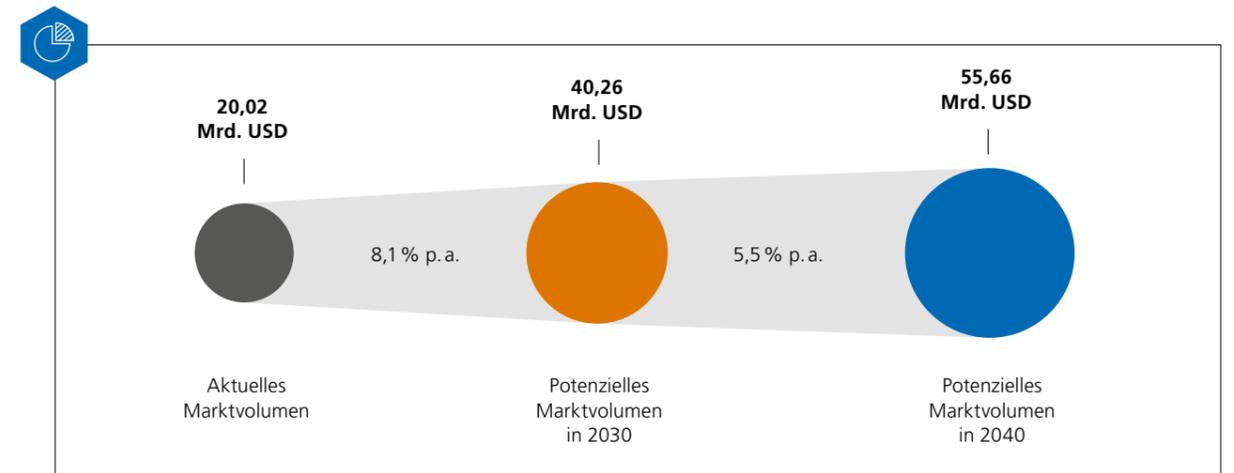


Abbildung 15: Entwicklung des Marktvolumens im BTF Bioraffinerien und Bioreaktoren.

Das größte Marktsegment im BTF Bioraffinerien und Bioreaktoren ist die Produktion von Chemikalien und Polymeren mit einem Volumen von 8,2 Mrd. USD und einem Marktwachstum von 9% p. a. bis zum Jahr 2030 und 6% p. a. bis 2040. Damit steigt das Marktvolumen im Jahr 2040 auf 25 Mrd. USD und wird auf knapp unter der Hälfte des gesamten BTF prognostiziert. Akteure in diesem Feld stammen aus Deutschland, den USA, Norwegen und den Niederlanden und sind in den Bedürfnisfeldern Konsum und Wohnen tätig. Beispiele hierfür sind Wacker, Amyris und Avanto. Im Marktsegment Produktion von Enzymen und Katalysatoren (z. B. zur Verstärkung von chemischen Reaktionen bei der Produktion von Bioenergie) wurden 6,8 Mrd. USD an Marktvolumen ermittelt. Das jährliche Wachstum liegt bei 7% bis 2030 und 4,5% bis 2040. Akteure stammen aus Schweden (Norbite), UK/IE (Vollebak) und den Niederlanden (DSM). Das Marktvolumen im Marktsegment Produktion von Spezialwerkstoffen beträgt aktuell 2,5 Mrd. USD. Das jährliche Wachstum von 7,8 und 6% pro Jahr ist ähnlich zu den vorigen Segmenten. Die Unternehmen Evonik (Deutschland), Ecovative (USA), Provectus AI-

gae (Australien), Pond Technologies (Kanada), SEKAB (Schweden), RISE PI (Norwegen), MetGen (Finnland), TripleW (Israel) und Deep Branche (UK/IE) sind Beispiele für Akteure in diesem Anwendungsfall und zeigen, dass nahezu alle Leitländer in diesem Segment aktiv sind. Bezogen auf die Bedürfnisfelder stehen Konsum und Wohnen im Fokus der Aktivitäten. Das letzte und kleinste Marktsegment im BTF Bioraffinerien und Bioreaktoren ist die Produktion von Nahrungs- und Futtermittel, welches derzeit ein Marktvolumen von 2,45 Mrd. USD aufweist. Die WR liegt mit 8% bis 2030 und circa. 6% bis 2040 in ähnlichen Größenordnungen wie die anderen Segmente. Auch hier sind Akteure aus allen Leitländern, mit Ausnahme von Schweden, Finnland und UK/IE, aktiv und decken das Bedürfnisfeld Ernährung ab. Beispiele für Unternehmen sind Georg Fischer Piping Systems aus Deutschland, LanzaTech aus den USA und Seaweed Solutions aus Norwegen.

Die notwendigen Anfangsinvestitionen des BTF betragen 1,1 Mrd. USD. Hohe Fixkosten und hohe operative Kosten der Anlagen erfordern einen Großteil des Kapi-

tals. In der Forschung ist es wichtig, die gentechnische Veränderung von Mikroorganismen (z. B. Optimierung von Algen und Enzymen) und die automatisierte Kultivierung von Zellen weiter voranzutreiben. Ein weiterer elementarerer Punkt ist die Trennung von Abfallstoffen und die Qualitätssicherung von Materialien und Rohstoffen, welche letztlich die Qualität der Produkte bestimmen. In diesem Sinne ist es notwendig, neue Wertschöpfungsketten aufzubauen, um Zugang zu biologischen Rohstoffen zu erhalten sowie in die Zulassung von Technologien und ihrer Erzeugnisse zu investieren.

### Digitale Plattformen, Modelle und Zwillinge

Im BTF Digitale Plattformen, Modelle und Zwillinge wurde ein gesamtes aktuelles Marktvolumen von 5,7 Mrd. USD identifiziert, welches sich auf fünf unterschiedliche Marktsegmente verteilt. Das Feld gehört damit zu den mittelgroßen BTF. Die WR von 12,5 % bis 2030 und 11,3 % bis 2040 weist auf ein signifikantes Wachstum der Technologien, Produkte und Dienstleistungen im BTF hin. In Summe kann in 2030 ein Marktvolumen von etwa 16,3 Mrd. USD erwartet werden, welches bis 2040 auf 43,6 Mrd. USD steigen wird. In *Abbildung 16* wird diese Entwicklung visualisiert.

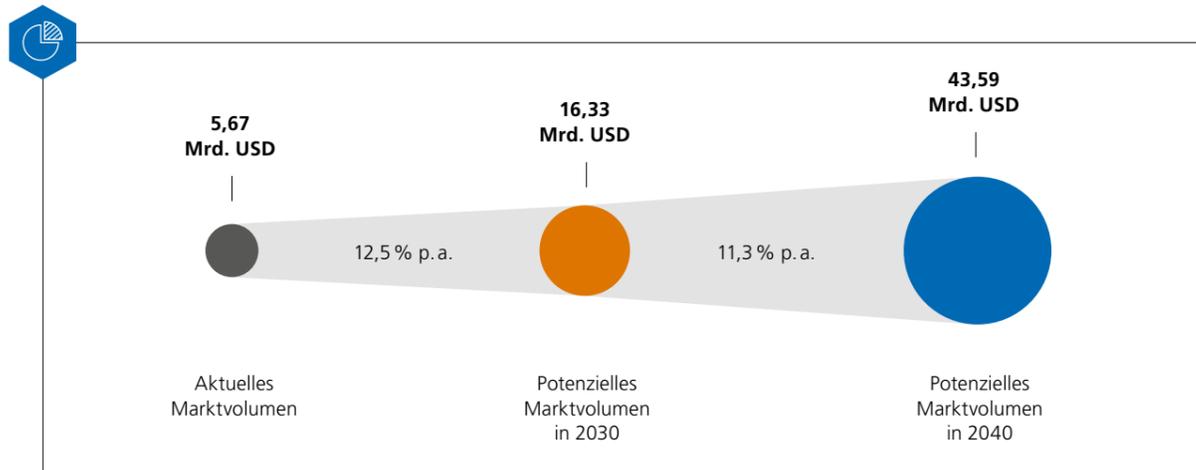


Abbildung 16: Entwicklung des Marktvolumens im BTF Digitale Plattformen, Modelle und Zwillinge.

Das umfangreichste Marktsegment im BTF ist die Anwendung von digitalen Plattformen, Modellen und Zwillingen in der Echtzeitüberwachung biotechnologischer Prozesse mit 1,95 Mrd. USD und einer WR von 10,4 % bis 2030 sowie 8 % bis 2040. Akteure in diesen Marktsegmenten stammen bspw. aus den Niederlanden (AI4B.io). Bioprozessüberwachung ist ein Querschnittssegment, das in nahezu allen Bedürfnisfeldern zum Einsatz kommt, vor allem jedoch in Feldern, in denen die Qualitätskontrolle kritisch ist (z. B. Ernährung und Gesundheit). An zweiter Stelle befindet sich das Marktsegment Anwendung von digitalen Plattformen, Modellen und Zwillingen in der Qualitätskontrolle und Fehlererkennung mit 1,52 Mrd. USD Marktvolumen. Die WR ist mit 15,5 % und 13 % relativ hoch und führt zu einem Marktvolumen in 2040 von 15,5 Mrd. USD. Das Marktsegment wird insbesondere

in Deutschland, den USA, China und Australien bedient. Aktuelle Beispiele für Akteure sind MetaSystems, Recursion und LBT Innovations. Wie die Bioprozessüberwachung, ist auch die Qualitätskontrolle und Fehlererkennung ein Querschnittssegment über beinahe alle Bedürfnisfelder. Das Marktsegment Anwendung digitaler Plattformen, Modelle und Zwillinge in der nachhaltigen Produktion von Biokraftstoffen weist ein Marktvolumen von 1,2 Mrd. USD bei einem Wachstum von 8,3 % p.a. bis 2030 und 7 % p.a. bis 2040 auf. Damit steigt das Marktvolumen bis 2040 geringfügig auf 4,3 Mrd. USD. Das Marktsegment wird insbesondere von Akteuren aus Finnland bedient. Ein Beispiel ist das Unternehmen St1 Nordic Oy. Die in der Untersuchung identifizierten Akteure sind dabei ausschließlich im Bedürfnisfeld Energie tätig. Im Marktsegment Anwendung digitaler Plattformen, Modelle

und Zwillinge bei der simulationsgestützten Produktentwicklung wurde ein Marktvolumen von 650 Mio. USD identifiziert. Die WR bis 2030 liegt bei 12,1 %, bis 2040 sogar bei 14 %. Alle Leitländer, außer Schweden und Norwegen, zeigen bereits erste Ansätze für Technologien, Produkte oder Dienstleistungen in diesem Marktsegment. Beispiele sind die Unternehmen Yokogawa Insilico Biotechnology, Boca Biolistics und MetGen. Insbesondere die Bedürfnisfelder Konsum und Wohnen werden durch das Marktsegment bedient. Das letzte und kleinste Segment stellt die Anwendung digitaler Plattformen, Modelle und Zwillinge bei der Prozessoptimierung in Bioraffinerien, -reaktoren und -foundries dar, welches mit 350 Mio. USD bislang nicht weit entwickelt ist. Das jährliche Wachstum von 19,5 % bis 2030 und 17,5 % bis 2040 wird jedoch sehr hoch eingeschätzt. Deutschland, die USA und Finnland weisen bereits Engagement in diesem Segment auf. Akteure sind bspw. die Hitachi Zosen Inova Schmack GmbH, IEA Bioenergy Task 42 und Fimpec Oy. Da es sich bei diesem Segment ebenfalls um ein Querschnittsfeld handelt, werden alle Bedürfnisfelder bedient.

Bezüglich digitaler Plattformen, Modelle und Zwillinge sind Investitionen in Höhe von 1,4 Mrd. USD notwendig, um die Marktsegmente zu entwickeln. Das Kapital fließt vor allem in den Ausbau der digitalen Infrastruktur. Breitbandnetze und 5G-Technologie

sind, ebenso wie die Weiterentwicklung von Cloud-Computing und Ansätze der Multiscale-Modellierung, notwendig. Für die Echtzeit-Erfassung von Daten sind Sensoren und weitere Messgeräte notwendig, die in ständiger Verbindung mit dem erfassenden System stehen. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Daten- und Cybersicherheit, welche durch fortschrittliche Technologien gewährleistet werden muss. Universitäten, Forschungseinrichtungen und Unternehmen benötigen Unterstützung bei der Entwicklung von neuen Konzepten und Technologien. Dies trifft insbesondere auf Startups zu. Außerdem unterstützt die Schärfung oder Anpassung regulatorischer Rahmenbedingungen sowie eine Intensivierung der internationalen Zusammenarbeit die Entwicklungen in diesem BTF.

### Biofoundries und Hochdurchsatzscreening durch Laborautomatisierung

Im BTF Biofoundries und Hochdurchsatzscreening durch Laborautomatisierung wurden fünf unterschiedliche Marktsegmente mit einem aktuellen Marktvolumen von insgesamt 2 Mrd. USD identifiziert. Damit gehört es zu den kleineren BTF. Das jährliche Wachstum von 12,6 % und 9,6 % liegt etwa im Durchschnitt aller BTF. Bis zum Jahr 2030 wird ein Marktvolumen von etwa 6 Mrd. USD und 11,7 Mrd. USD im Jahr 2040 prognostiziert. *Abbildung 17* fasst diese Entwicklung grafisch zusammen.

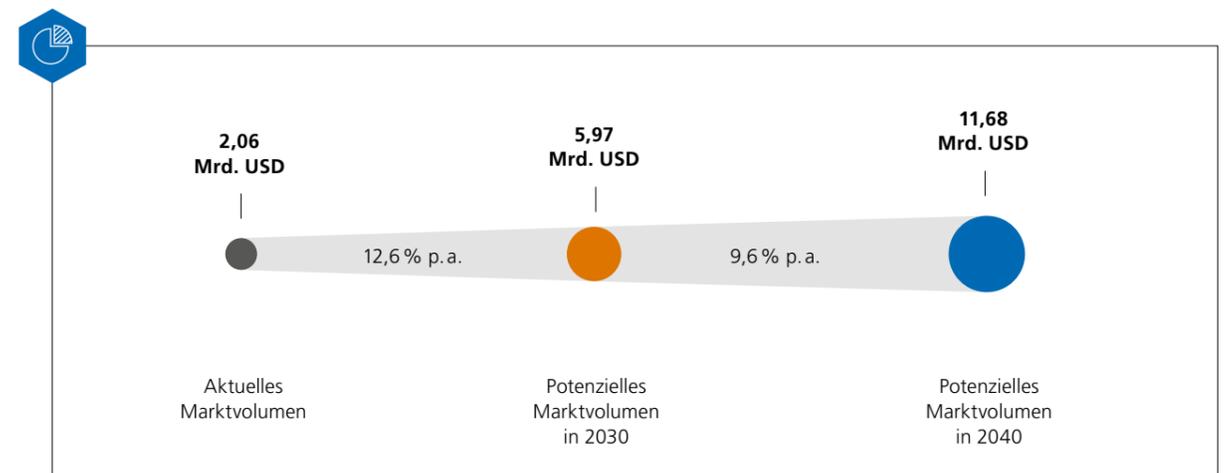


Abbildung 17: Entwicklung des Marktvolumens im BTF Biofoundries und Hochdurchsatzscreening durch Laborautomatisierung.

Das größte Marktsegment ist die automatisierte Bioprozessentwicklung und Qualitätskontrolle (z. B. von Pharmazeutika oder optimierten Zellkulturen) mit 1,2 Mrd. USD und einem Wachstum von 12,5 und 9,5 % p.a. Von den Leitländern sind Deutschland, die USA, China, Kanada, Schweden, UK/IE und die Niederlande in diesem Marktsegment aktiv. Beispielunternehmen sind LabGenius, Concordia Genome Foundry und Bota Bio. Diese sind vor allem in den Bedürfnisfeldern Ernährung und Gesundheit tätig. Mit einigem Abstand folgt das Marktsegment Kultivierung von Enzymen, welches rund 300 Mio. USD an Marktvolumen aufweist. Das Wachstum liegt bei 12,1 und 10 % p.a. Neben Deutschland, den USA und China, sind auch Schweden und UK/IE in diesem Segment tätig. Zu nennen sind die Unternehmen London Biofoundry, Cytana und Invizyne. Vor allem zu den Bedürfnisfeldern Energie, Ernährung, Gesundheit und Konsum trägt das Marktsegment bei. Die Kultivierung von Bakterien als drittes Segment weist ein aktuelles Marktvolumen von 200 Mio. USD und jährliches Wachstum von 10,7 % bis 2030 und 8 % bis 2040 auf. Vor allem Anwendungen im Bedürfnisfeld Energie können durch angepasste Bakterienkulturen bedient werden. Akteure in diesem Segment sind u. a. Gingko Bioworks (USA), Cytana (Deutschland) und London Biofoundry (UK/IE). Die Kultivierung von Hefen und Pflanzenzellen liegt aktuell ebenfalls bei einem Marktvolumen von 200 Mio. USD. Die WR sind mit 15 und 11 % etwas höher als in den anderen Segmenten dieses BTF. Beispielhaft ist hier die Firma SolarBiotech zu nennen, die insbesondere in den Bedürfnisfeldern Energie und Wohnen tätig ist. Als letztes Marktsegment ist die Kultivierung von Algen zu nennen. Bei einem Marktvolumen von 150 Mio. USD und einem jährlichen Wachstum von 13 und 9 % p.a. (2030/2040) ist das Marktsegment im Betrachtungszeitraum von geringerer Bedeutung für die biointelligente Wertschöpfung. Lediglich in den USA konnte in diesem Kontext ein relevantes Engagement identifiziert werden. Als Beispiel kann das Unternehmen Calyxt genannt werden.

Im BTF Biofoundries und Hochdurchsatzscreening durch Laborautomatisierung ist ein Investitionsvolumen von 600 Mio. USD erforderlich. Ähnlich zu Bioraffinerien und Bioreaktoren kommt es zu hohen

Fix- und Betriebskosten bezogen auf die Anlagen. In der Regel ist eine komplette Laborinfrastruktur, inklusive Pipettierrobotern, Messinstrumenten und Reinräumen notwendig. Ebenso ist die Qualitätssicherung der Rohstoffe und der kultivierten Mikroorganismen von hoher Bedeutung. Die Erforschung des markierungsfreien Messens von Zellwachstum mit optischen Methoden ist eine wichtige Grundvoraussetzung, für die weitere Entwicklung des Marktes. Zudem sind automatisierte Säuberungssysteme erforderlich, um die schnellen Durchsätze zu erreichen.

### Smart Greenhouse und Smart Farming

Im BTF Smart Greenhouse und Smart Farming wurden drei Marktsegmente mit einem aktuellen gesamten Marktvolumen von 16 Mrd. USD identifiziert. Damit gehört das BTF zu den größeren identifizierten Märkten der biointelligenten Wertschöpfung. Die WR bis 2030 liegt bei 9,8 %. Somit wird das Marktvolumen auf 37,2 Mrd. USD prognostiziert. Bis 2040 liegt das jährliche Wachstum bei 8,5 %, was zu einer Steigerung auf 75 Mrd. USD in diesem Jahr führt. Die prognostizierte Marktentwicklung wird in *Abbildung 18* zusammengefasst.

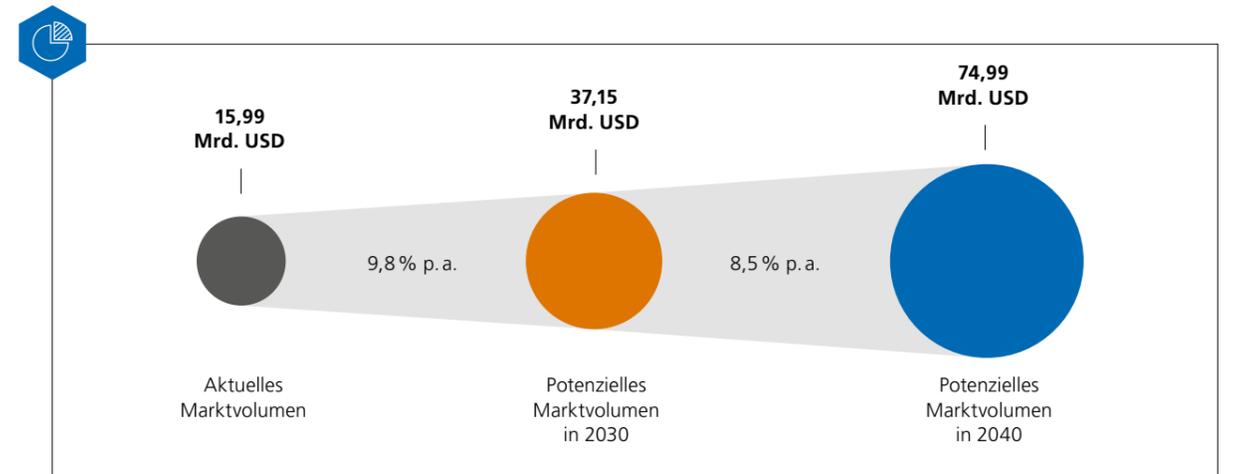


Abbildung 18: Entwicklung des Marktvolumens im BTF Smart Greenhouse und Smart Farming.

Das mit deutlichem Abstand größte Marktsegment ist die Kultivierung von Nutzpflanzen (z. B. für die Anwendung in der Bioenergie oder Baustoffindustrie) mit 12 Mrd. USD. Dies lässt darauf schließen, dass dieser Markt bereits weit entwickelt ist. Nach dem Konzept der S-Kurve ist das Wachstum mit 7 und 4,5 % p.a. erwartungsgemäß gering. Insbesondere die Bereiche Energie, Konsum und Wohnen werden durch die Kultivierung von Nutzpflanzen bedient. Alle Leitländer außer China, Norwegen und Schweden sind im Marktsegment aktiv. Zu den Akteuren gehören Benson Hill, Corematic, Swegreen, Katif, Agxio und Keygene. Das Marktsegment der vertikalen Landwirtschaft folgt mit 2,1 Mrd. USD und WR von 17,5 bzw. 15,5 %. Das Wachstum ist demnach deutlich größer als jenes der Kultivierung von Nutzpflanzen. Dementsprechend ist zu erwarten, dass im Jahr 2040 das Marktvolumen mit 32 Mrd. USD in diesem Segment größer sein wird und fast die Hälfte des gesamten BTF generiert. Unternehmen in diesem Marktsegment bedienen nahezu ausschließlich das Bedürfnisfeld Ernährung. Beispiele sind Kisters (Deutschland), AeroFarms (USA) und iFarm (Finnland). Die WR wurden indessen zu niedrig eingeschätzt. Das letzte Marktsegmente im BTF ist die Herstellung und Verwendung von automatisierten Hydrokulturen für die Pflanzenzucht. Mit 1,9 Mrd. USD und einem Wachstum von 14 und 11,5 % pro Jahr liegt es nur wenig hinter dem vorherigen Marktsegment. Das Unternehmen TruLeaf aus Kanada ist ein Unternehmen, welches relevantes Engagement in diesem Bereich zeigt und das Bedürfnisfeld Ernährung bedient.

Das notwendige Investitionsvolumen in diesem BTF beträgt 900 Mio. USD. Der Grund für die Investitionen liegt darin, dass Landwirtschaft bereits heute in den meisten Ländern stark von staatlichen Subventionen und Investitionen abhängig ist. Der Umstieg auf neue Technologien und Wertschöpfungsketten, wie beim vertikalen Anbau, ist für viele Akteure mit hohen Anfangsinvestitionen und laufenden Kosten verbunden. Dies trifft insbesondere auf die ersten Jahre zu. Zudem ist eine umfassende technische Unterstützung notwendig. Die Digitalisierung der Anlagen erfordert Investitionen in Software und KI-Programme, Sensor- und IoT-Technologien sowie Robotik- und Automatisierungssysteme. Der Energiebedarf der Anlagen ist in der Regel hoch, sodass die Umstellung auf erneuerbare Energien und Speichersysteme hohe Investitionen fordern. Zudem ist es auch hier unabdingbar, dass regulatorische Rahmenbedingungen zum Anbau von Lebensmitteln angepasst werden.

## Biobasierte Energieerzeugung und -speicherung

Das BTF biobasierte Energieerzeugung und -speicherung weist ein aktuelles Marktvolumen von 5 Mrd. USD auf. Die WR bis 2030 beträgt 5,3 % und bis 2040 4,7 %. Damit ist das erwartete Wachstum in diesem

Feld moderat. Bis 2030 wird das Marktvolumen auf 8 Mrd. USD steigen. In 2040 liegt es bei 12 Mrd. USD. Insgesamt wurden sechs Marktsegmente voneinander abgegrenzt, welche größtenteils im Bedürfnisfeld Energie liegen. *Abbildung 19* zeigt auf einen Blick die Entwicklung des Marktes.

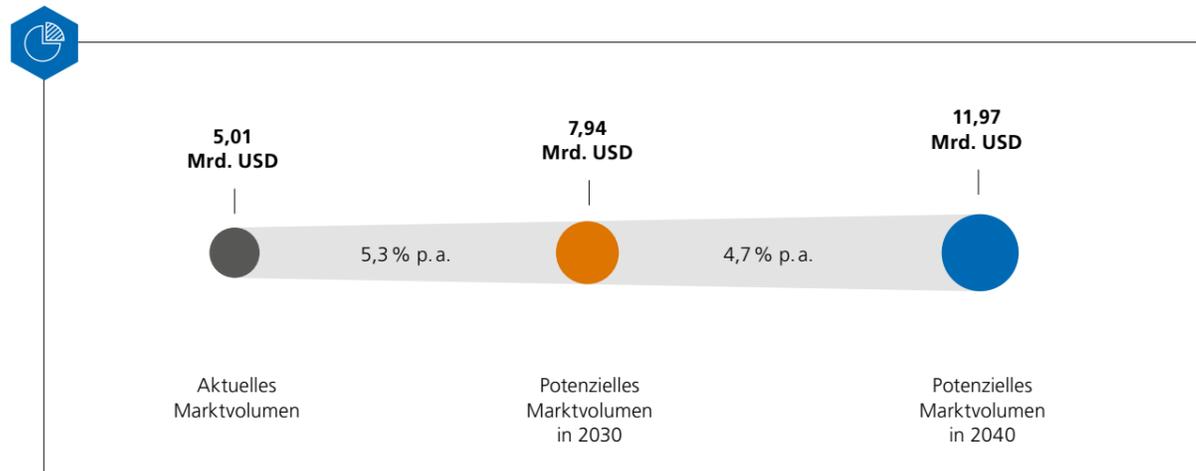


Abbildung 19: Entwicklung des Marktvolumens im BTF Biobasierte Energieerzeugung und -speicherung.

Das größte Marktsegment in diesem BTF ist die Herstellung und Verwendung von Biogasanlagen mit 3,8 Mrd. USD. Das jährliche Wachstum von 4,3 und 4 % (2030/2040) liegt am unteren Ende aller Marktsegmente. Beispielhafte Unternehmen sind ormatic (Deutschland) und Meva Energy (Schweden). Als zweitgrößtes Marktsegment ist die Herstellung von algenbasierten Kraftstoffen zu nennen. Das Marktvolumen liegt bei 500 Mio. USD. Das Wachstum entspricht mit 5,5 % p.a. bis 2030 und 4,5 % p.a. bis 2040 jenem der Biogasanlagen. Das geringe Wachstum basiert auf der Einschätzung der involvierten Experten, die durchweg betonten, dass algenbasierte Kraftstoffe im Vergleich zu ölbasierter Kraftstoffen noch einige Zeit zu teuer sein werden. Neben Deutschland, den USA und UK/IE, sind auch Schweden, Finnland und die Niederlande in diesem Segment tätig. Relevant Akteure sind u. a. die Verbio AG, Renmatrix und SunPine. Mit deutlichem Abstand folgt das Marktsegment Herstellung und Verwendung von Wasserstoff-Produktionsanlagen und Brennstoffzellen. Das Marktvolumen beträgt aktuell 300 Mio. USD, bei einem jährlichen Wachstum von 11 und 9 %. Auf dem dritten Platz folgt

das Segment Herstellung und Verwendung von mikrobiellen Brennstoffzellen. Bei 264 Mio. USD betragen die WR lediglich 4,9 bzw. 4 %. Es ist zu vermuten, dass das Segment eine Nischentechnologie bleiben wird. Das Marktsegment zur Herstellung und Verwendung von biotechnischen Energiespeicherlösungen weist ein Marktvolumen von 140 Mio. USD auf. Das jährliche Wachstum beläuft sich auf 12 % bis 2030 und 8 % bis 2040. Als letztes Marktsegment ist die Herstellung und Verwendung von biotechnischen Solarzellen zu nennen. Das aktuelle Marktvolumen von 5 Mio. USD ist das geringste aller Marktsegmente, was darauf schließen lässt, dass es aktuell noch kaum oder keine marktreifen Ansätze gibt. Das jährliche Wachstum beträgt 22,5 % bis 2030 und 17,5 % bis 2040.

Im Bereich biobasierte Energieerzeugung und -speicherung sind Investitionen in Höhe von 1,2 Mrd. USD notwendig. Dies liegt an den hohen Kosten von Energieträgern und -speichern sowie an der aktuell geringen Lebensdauer von Speicherorganismen, welche durch die Intensivierung von Forschung und Entwicklung minimiert werden können. Insgesamt ist die Effizienz viele

Ansätze und Technologien in großen Maßstäben noch nicht hoch genug, sodass die Wettbewerbsfähigkeit vorerst nur durch weitere Investitionen gewährleistet werden kann. Ein konkretes Beispiel ist die Entwicklung von Biofilmen, welche bei Bedarf Elektronen abgeben können. Auch in diesem BTF ist die Erforschung der genetischen Optimierung von Mikroorganismen notwendig. Ein wichtiger Faktor ist die Entwicklung von neuen Sicherheitssystemen und -mechanismen, welche mit den neuen Energieerzeugungs- und -speicherarten zurechtkommen. Nachhaltigkeit spielt in der Energieerzeugung und -speicherung eine maßgebliche Rolle. Dementsprechend bedarf es in diesem BTF eines ho-

hen Aufwands, um Systeme und Wertschöpfungsketten möglichst klimaneutral zu gestalten.

## Bioprinting und Additives Biomanufacturing

Das BTF Bioprinting und additives Biomanufacturing wurde in sechs verschiedene Marktsegmente unterteilt. Das gesamte aktuelle Marktvolumen liegt bei 5,7 Mrd. USD. Das jährliche Wachstum von 16 % bis 2030 und 14,6 % bis 2040 liegt signifikant über dem Durchschnitt aller Kategorien. In 2030 wird so ein Marktvolumen von 21,7 Mrd. USD erreicht werden, welches bis 2040 weiter auf knapp 76,4 Mrd. USD steigen wird. Die Marktentwicklung wird in *Abbildung 20* grafisch aufgezeigt.

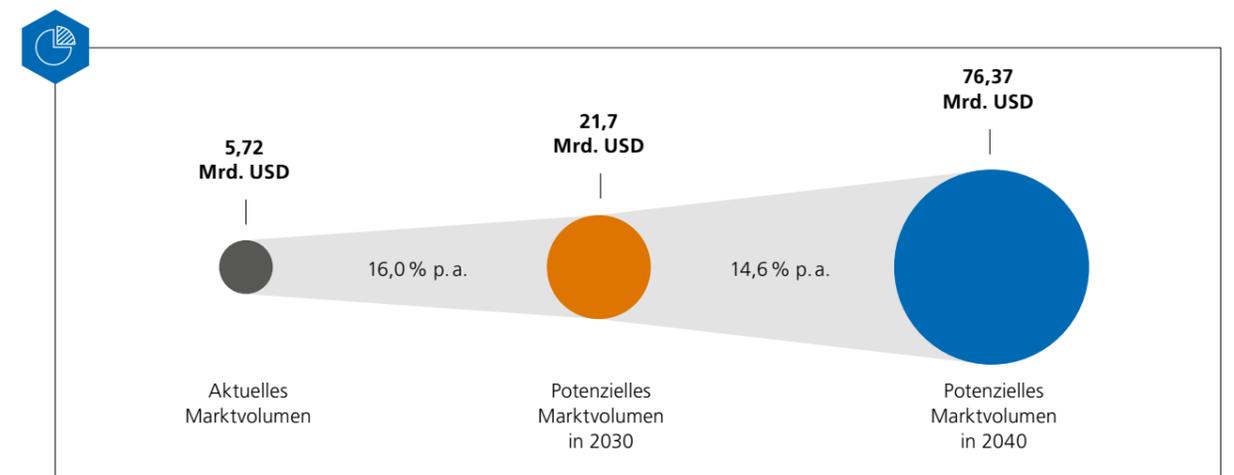


Abbildung 20: Entwicklung des Marktvolumens im BTF Bioprinting und Additives Biomanufacturing.

Das größte Marktsegment im BTF ist die Produktion von Gewebe und Organen durch additive Fertigung für medizinische Zwecke oder in der Kosmetikindustrie. In diesem Segment wurde ein Marktvolumen von 2,1 Mrd. USD ermittelt. Das Wachstum von 8,3 und 6 % pro Jahr ist eher niedrig. Das Segment wirkt sich vornehmlich auf das Bedürfnisfeld Gesundheit aus und wird in den Ländern Deutschland, USA, Kanada und Schweden aktiv verfolgt. Beispielhafte Akteure sind BellaSeno, 3D Biotek, Octane Biotech und CELLINK. Das nächstgrößte Marktsegment ist die Produktion und Verwendung von Implantaten und Prothesen. Auch dieses Segment spielt hauptsächlich im Bedürfnisfeld Gesundheit eine Rolle. Das Marktvolumen beträgt 1,6 Mrd. USD. Mit 19 und 15 % p.a. ist das Wachstum in diesem Marktsegment äußerst hoch.

Neben Deutschland und den USA ist auch Schweden in diesem Bereich involviert. Die Unternehmen Cellbricks, advancedsolutions und CELLINK sind Akteure, die sich mit Implantaten und Prothesen durch additives Biomanufacturing beschäftigen. Das drittgrößte Marktsegment ist die Herstellung und Nutzung von Baumaterialien (z. B. mycelbasierte Materialien). Mit 1,2 Mrd. USD Marktvolumen und einer WR von 14,5 % bis 2030 bzw. 12 % bis 2040, wirkt sich das Segment primär auf das Bedürfnisfeld Wohnen aus. Die Akteure Ecovative (USA), RISE PFI (Norwegen) und blast Studio (UK/IE) sind bereits in diesem Bereich tätig. Die Nutzung von Bioprinting und additivem Biomanufacturing für Elektronikkomponenten ist ein weiteres Nischenfeld. Das Marktvolumen beträgt 300 Mio. USD. Das Marktwachstum bis 2030 liegt bei

22,7 % und 17 % p. a., was einem signifikanten Wachstum entspricht. Neben Deutschland ist auch UK/IE in diesem Segment tätig. Unternehmen sind Black Drop Biodrucker und FabRX. Dicht dahinter folgt das Feld Produktion und Verwendung von Ersatzteilen, z. B. für industrielle Maschinen, durch additives Biomanufacturing. Das Marktvolumen beträgt 290 Mio. USD und die Wachstumsraten 10,7 und 9 % p. a. Dieses Segment trägt zu den Bedürfnisfeldern Ernährung, Gesundheit, Konsum und Wohnen bei. Das kleinste Marktsegment im BTF stellt die Produktion von Lebensmitteln (kultiviertes Fleisch, personalisierte Nahrung, ästhetische „Designer-Lebensmittel“, etc.) dar. Dementsprechend agiert das Segment im Bedürfnisfeld Ernährung. Zwar liegt das Marktvolumen bei lediglich 201 Mio. USD, doch das jährliche Wachstum von 35 % bis 2030 und 30 % bis 2040 lassen das Marktvolumen bis 2040 auf 29,3 Mrd. USD ansteigen. Das Unternehmen vivax bio aus den USA ist einer der Akteure in diesem Segment.

Im BTF Bioprinting und additives Manufacturing beträgt das erforderliche Investitionsvolumen 1 Mrd. USD. Wichtige Voraussetzungen für die Entwicklung der Marktsegmente sind die Erforschung von leitfähiger Biotinte und die gezielte Optimierung von Mikroorganismen und Enzymen. Für die Kultivierung druckfähiger Zellen sind Investitionen in den Aufbau von Zelllinien wichtig sowie der Ausbau der Forschung zu biologischen Materialien. Dies erfordert zudem die Investition in Innovationszentren und Labore sowie gezielt in Unternehmen, die in diesem BTF

tätig sind. Ein weiteres Forschungsfeld mit weiterem Entwicklungs- und Investitionsbedarf ist 4D-Bioprinting. Die Zeitkomponente als vierte Dimension ermöglicht, dass sich Druckergebnisse (bspw. Zellen, biofunktionales Material) auch nach dem Druck in Form und Funktion verändern können, woraus sich neue Anwendungsmöglichkeiten z. B. in der Arzneimittelgabe ergeben könnten. Bezüglich der Hardware sind Investitionen in Hochdurchsatz-Bioprinter oder Multi-Material-Drucktechniken notwendig. Zur Prüfung von Technologien, Produkte und Dienstleistungen im medizinischen Bereich und in der Lebensmittelproduktion auf ihre Qualität und Sicherheit bedarf es neuer Prüfverfahren und -techniken. Gleichzeitig sind auch hier neue Regularien notwendig. Da sich durch Bioprinting und additives Biomanufacturing Produktionsabläufe und Prozesse grundlegend ändern, ist eine Investition in Bildung und Kompetenzaufbau unabdingbar.

#### Biosensoren und Bioaktuatoren

Das BTF Biosensoren und Bioaktuatoren gehört mit sieben Marktsegmenten und einem aktuellen Volumen von 19,4 Mrd. USD zu den größten. Das durchschnittliche jährliche Wachstum aller sieben Segmente liegt bei 7,6 % bis 2030 und 5,8 % bis 2040 und ist damit deutlich unter dem Durchschnitt. Das Marktvolumen in 2030 wird knapp 37,5 Mrd. USD betragen. In 2040 werden es 56,9 Mrd. USD sein. *Abbildung 21* vermittelt einen Überblick über die Marktentwicklung.

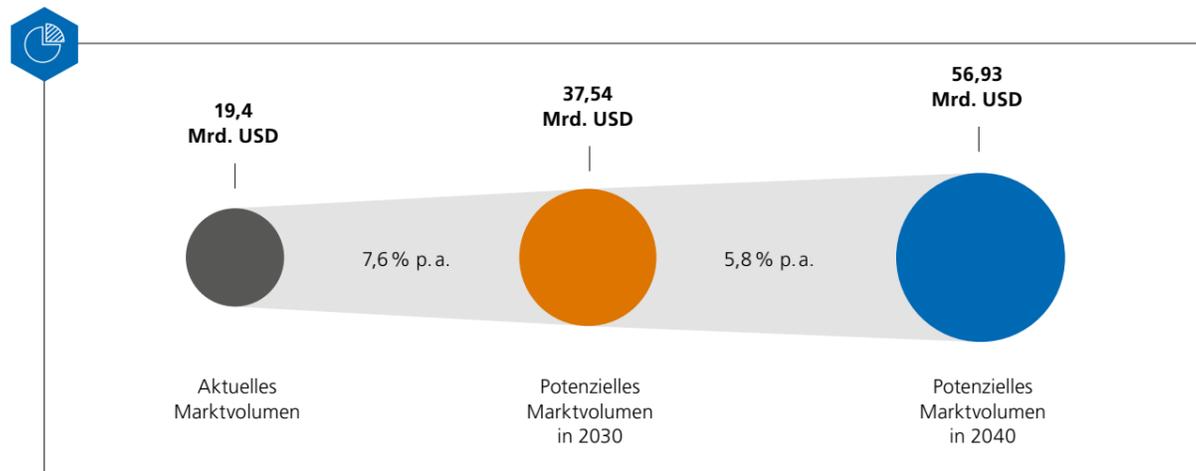


Abbildung 21: Entwicklung des Marktvolumens im BTF Biosensoren und Bioaktuatoren.

Das größte Marktsegment ist die Herstellung und Verwendung von Biosensoren und Bioaktuatoren zur Überwachung von Gesundheitsparametern im Bedürfnisfeld Gesundheit. Das Marktvolumen beträgt aktuell 10,8 Mrd. USD. Die WR von 6 und 5 % sind hingegen vergleichsweise gering. Neben Deutschland, den USA und China, tragen auch Israel, UK/IE und die Niederlande zum Marktvolumen des Segments bei. Bedeutende Akteure sind Medtronic, Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Elfi-Tech und Connecterra. Die Verwendung von Biosensoren und -aktuatoren in der Qualitätskontrolle von Lebensmittelproduktionen ist ein weiteres großes Marktsegment mit 6,6 Mrd. USD. Die WR sind mit 9,2 % bis 2030 und 6 % bis 2040 etwas größer. Bezüglich der Akteure und Länder kann das Unternehmen Koniku aus den USA genannt werden.

Das Marktsegment bedient das Bedürfnisfeld Ernährung. Weit hinter den ersten beiden Marktsegmenten folgt die Verwendung in der Materialprüfung und -kontrolle mit 600 Mio. USD. Das jährliche Wachstum von 9,5 und 8 % ist moderat. Insbesondere die Bereiche Konsum und Wohnen werden durch das Segment bedient. In den Marktsegmenten zur Verwendung von Biosensoren und Bioaktuatoren in der Energieeffizienzsteigerung und dem Abfallmanagement konnten die gleichen Werte ermittelt werden. Das Marktvolumen beträgt in beiden 400 Mio. USD bei WR von 10,5 und 9,5 %. In beiden Segmenten werden alle Bedürfnisfelder, außer Gesundheit, bedient. Ähnlich verhält es sich mit den letzten beiden Segmenten Umweltüberwachung und -reinigung sowie Messung von Echtzeitproduktionsparametern. Das Marktvolumen liegt in beiden Märkten bei 300 Mio. USD, während das Wachstum bei 9,5 und 8 % pro Jahr liegt. Während die Umweltüberwachung und -reinigung sich insbesondere auf das Bedürfnisfeld der Gesundheit auswirkt, wird die Messung von Echtzeitproduktionsparametern in allen anderen Bedürfnisfeldern eingesetzt.

Im BTF Biosensoren und Bioaktuatoren sind Investitionen in Höhe von 500 Mio. USD erforderlich. Elementar in diesem BTF ist die Entwicklung von Schnittstellen und Standards, sodass unterschiedliche Systeme miteinander kommunizieren und interagieren können. Weiterhin ist der Aufbau eines Technologiebaukastens

ratsam, welcher alle Bestandteile des BTF vereint und flexibel in unterschiedlichen Anwendungsfällen zum Einsatz kommen kann. Bestandteile dieses Baukastens könnten verschiedene Arten von Sensoren, Aktuatoren, Software, Schnittstellen und Auswertungstools sein. Hierzu ist die Erforschung u. a. von Quantensensoren, biologischen Schaltern und Modellen zur Auswertung der Informationen notwendig. Ein wichtiger Punkt ist zudem die Lebensdauer der Sensoren, welche momentan noch sehr gering ist.

#### Human-Biomachine-Interfaces

Das BTF Human-Biomachine-Interfaces gehört mit einem aktuellen Marktvolumen von 1,5 Mrd. USD und drei Marktsegmenten zu den kleineren der 17 Felder. Das Wachstum ist indessen mit 19,2 % pro Jahr bis 2030 und 16,3 % pro Jahr bis 2040 hoch. Dementsprechend wird der Anteil an Technologien, Produkten, Dienstleistungen und Prozessen aus diesem BTF in den nächsten Jahren voraussichtlich steigen. Bis 2030 wird das Marktvolumen auf 7,1 Mrd. USD wachsen. In 2040 könnte es knapp bei unter 25,8 Mrd. USD liegen. Sämtliche Anwendungsfälle und Ansätze wirken sich auf alle fünf Bedürfnisfelder aus. *Abbildung 22* präsentiert die prognostizierte Entwicklung des Marktes.

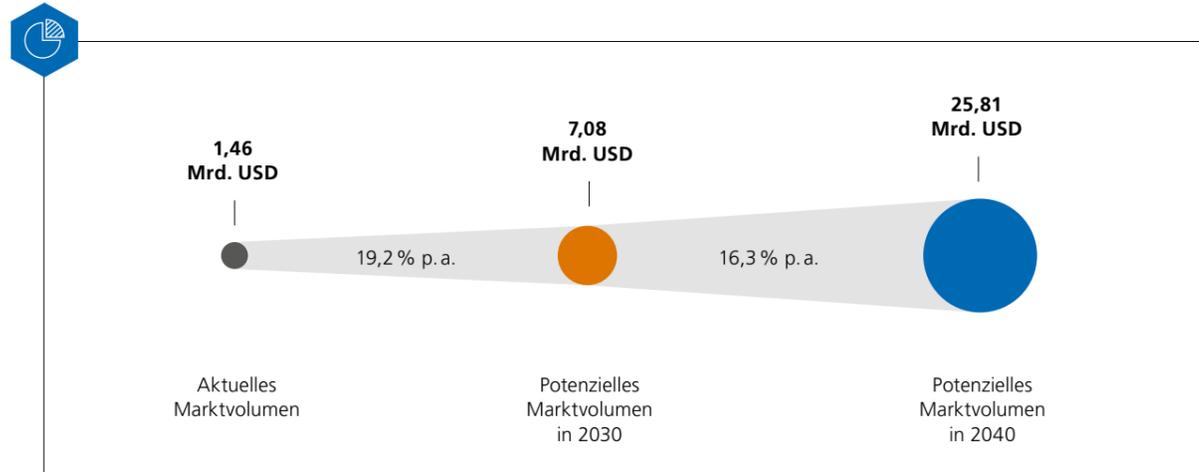


Abbildung 22: Entwicklung des Marktvolumens im BTF Human-Biomachine-Interfaces.

Das größte Marktsegment des BTF Human-Biomachine-Interfaces sind Ansätze zur körperlichen Leistungssteigerung (z. B. durch Exoskelette). Das Marktvolumen des Feldes beträgt 700 Mio. USD. Bis zum Jahr 2030 wird eine Wachstumsrate von 25,3 % pro Jahr prognostiziert, welche das Marktvolumen auf 5,3 Mrd. USD steigen lässt. Die WR für 2040 liegt bei 20 %. Die USA, Australien, Schweden und Israel sind momentan im Markt der körperlichen Leistungssteigerung durch Human-Biomachine-Interfaces tätig. Relevante Akteure sind Mojo Vision, Bionic Vision, Integrum und BrainQ Technologies. Der zweitgrößte Markt des BTF ist die Mensch-Maschine-Kollaboration in Form von Schnittstellen zwischen menschlichem Gehirn und bspw. Robotern mit 511 Mio. USD. Das Marktwachstum liegt hier lediglich bei 6,1 und 5 % p. a. Die Unternehmen Neuralink (USA) und Dot headset (Kanada) sind Akteure, die heute schon auf dem Markt aktiv sind. Das letzte Marktsegment ist die Verwendung von Human-Biomachine-Interfaces für die menschliche Gesundheit am Arbeitsplatz. Der Markt ist circa 250 Mio. USD groß. Das jährliche Wachstum von 15 % bis 2030 und 12 % bis 2040 ist im Vergleich zu allen Marktsegmenten überdurchschnittlich. Deutschland, die USA, Australien und Kanada tragen zum Marktvolumen in diesem Segment bei. Nennenswerte Akteure sind Boston Scientific, Control Bionics, Cochlear und Nuro.

In diesem BTF sind Investitionen von 1,5 Mrd. USD erforderlich, um die Marktsegmente zu entwickeln und die prognostizierten Marktvolumina zu erlan-

gen. Technologien, Produkte und Dienstleistungen in diesen Märkten generieren sowohl in der Herstellung und Testung als auch im tatsächlichen Einsatz hohe Menge an Daten, die verarbeitet und gespeichert werden müssen. Dementsprechend ist der Bedarf an Datenbanken und -speichermöglichkeiten hoch, was hohe Investitionen in diese Technik notwendig macht sowie den Ausbau von Forschung und Entwicklung. Dies erfordert Quantensensoren und PSA-integrierte Sensorik. Aufgrund zu geringer Auflösung nicht-invasiver Techniken ist eine Weiterentwicklung erforderlich. Invasive Ansätze erfordern umfassende Tests und Studien, um die Sicherheit der Anwender zu garantieren. Hierzu ist auch eine angepasste Regulatorik notwendig. Die Einrichtung und Verwendung von Technologien bzw. Produkten des BTF Human-Biomachine-Interfaces erfordert den Aufbau von zusätzlichen Kompetenzen und Weiterbildungsmöglichkeiten in Unternehmen.

#### Biobasierte / hybride Mikro- und Nanotechnik

Das BTF biobasierte / hybride Mikro- und Nanotechnik gehört mit einem aktuellen Marktvolumen von 3,9 Mrd. USD und fünf unterschiedlichen Marktsegmenten zu den mittelgroßen Feldern. Das durchschnittliche jährliche Wachstum im BTF entspricht bis 2030 10,8 % und bis 2040 9,3 %. Damit liegt es im Mittel aller BTF. Im Jahr 2030 wird das Marktvolumen auf 9,7 Mrd. USD ansteigen. 2040 werden es bereits 20,9 Mrd. USD sein. Die Entwicklung des Marktes wird durch *Abbildung 23* deutlich gemacht. Stand heute ist die Herstellung und Verwendung von

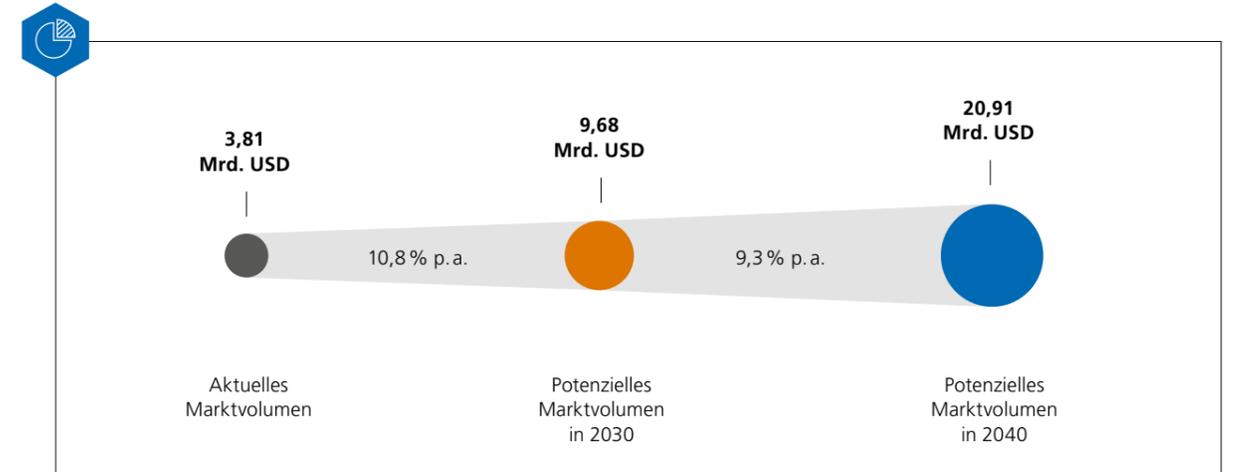


Abbildung 23: Entwicklung des Marktvolumens im BTF Biobasierte/hybride Mikro- und Nanotechnik.

Nanokatalysatoren (z. B. für die Wasserstoffproduktion oder die Abgasreinigung) das größte Marktsegment der biobasierten / hybriden Mikro- und Nanotechnik und vereint ein Marktvolumen von etwa 3 Mrd. USD. Die Wachstumsraten von 8,1 % p. a. bis 2030 und 5,5 % p. a. bis 2040 sind hingegen eher niedrig. Die Herstellung und Verwendung von Nanokatalysatoren kommt in allen Bedürfnisfeldern außer Wohnen und Ernährung zum Einsatz. Auf Platz zwei der Marktsegmente folgt mit deutlichem Abstand die Herstellung und Verwendung von Nanopartikeln (z. B. für Leichtbaumaterial in der Luft- und Raumfahrt oder im Automobilbereich) mit 351 Mio. USD. Das Wachstum ist in diesem Segment am höchsten. Bis 2030 wird eine WR von 20,1 % erreicht. Bezogen auf das Jahr 2040 sind es 17 %. Das Unternehmen AMBER aus UK/IE ist einer der Akteure in diesem Markt. Insbesondere die Bedürfnisfelder Gesundheit und Konsum werden durch Nanopartikel bedient. Die Herstellung und Verwendung von hybriden Mikrofluidsystemen ist ein weiteres Marktsegment des BTF. Das Marktvolumen beträgt 250 Mio. USD. Die WR liegen bei 14 und 12 %. In Deutschland, den USA, Australien und UK/IE finden sich Akteure, welche den beschriebenen Markt bedienen. Beispiele hierfür sind TissUse, Cortical Labs, Eavono und The Charles Stark Draper Laboratory. In den Bereichen Gesundheit und Konsum wird der Großteil der Umsätze generiert. Die Verwendung von Nanorobotern für präzise Montagen auf Nanoskala (z. B. Elektronikkomponenten) umfasst ein aktuelles Marktvolumen von 150 Mio. USD bei Wachstumsraten von 18 und 15 % pro Jahr. In diesem Segment, das die

Bedürfnisfelder Konsum und Wohnen abdeckt, ist der Akteur Barcode Nanotech aus Israel aktiv. Das kleinste Marktsegment ist die Herstellung und Verwendung von Electronic Self Assembly Ansätzen mit 100 Mio. USD. Das Wachstum beträgt sowohl für 2030 als auch für 2040 15 % p. a. Insbesondere in den Bereichen Gesundheit, Konsum und Wohnen finden die technologischen Ansätze ihre Anwendung.

Zur Entwicklung der Marktsegmente im BTF biobasierte / hybride Mikro- und Nanotechnik ist ein Investitionsvolumen von 800 Mio. USD notwendig. Eine wichtige Voraussetzung für das Erreichen der Marktvolumina ist die Weiterentwicklung von Biosensoren, da diese in den meisten Ansätzen des BTF eine relevante Rolle spielen. Zudem ist es essenziell, dass die additive Fertigung in großem Maßstab weiterentwickelt wird. Der Grundbaustein zur erfolgreichen Entwicklung der Marktsegmente ist die Erforschung neuer biobasierter und / oder biokompatibler Materialien, welche in Nanotechnologien zum Einsatz kommen können. Hierzu sind umfassende Investitionen in Labore sowie Mikro- und Nanofabriken notwendig. Insbesondere in medizinischen Anwendungen sind weitreichende Investitionen in Sicherheitsstandards und -systeme notwendig.

## Biofunktionale Materialien und Oberflächen

Im BTF biofunktionale Materialien und Oberflächen konnte ein aktuelles Marktvolumen von 4,7 Mrd. USD errechnet werden. Das jährliche Marktwachstum von 8,4 und 7,5 % ist im Vergleich leicht unterdurch-

schnittlich. Im Jahr 2030 wird ein Marktvolumen von 9,6 Mrd. USD erwartet, welches bis 2040 auf 18,3 Mrd. USD weiter steigen wird. Insgesamt konnten fünf Marktsegmente identifiziert und analysiert werden. *Abbildung 24* gibt einen Überblick über die prognostizierte Entwicklung des Marktes.

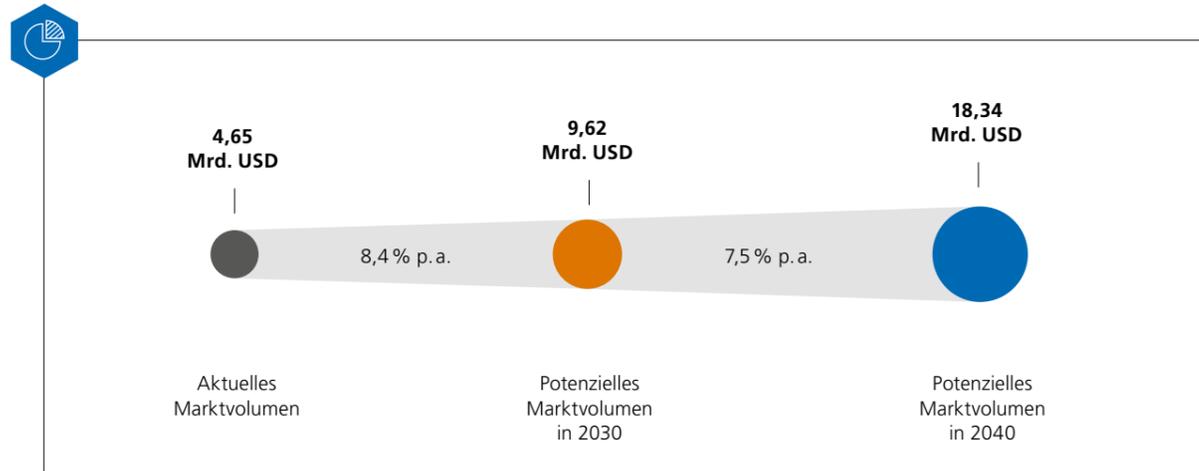


Abbildung 24: Entwicklung des Marktvolumens im BTF Biofunktionale Materialien und Oberflächen.

Das größte Marktsegment des BTF stellt biofunktionalisiertes Anti-Fouling, z. B. für die Seefahrt oder die Wartung von Wasserinfrastruktur, dar. Das Marktvolumen beträgt 2 Mrd. USD. Die WR bis 2030 und 2040 liegen bei lediglich 6,6 und 5,5 %. Die Bedürfnisse Wohnen und Konsum werden durch den Markt bedient. Das zweitgrößte Marktvolumen ist im Segment biofunktionalisierte Rohstoffe und Zwischenprodukte (z. B. biomimetisches Material, wie künstliche Spinnenseide) mit 1,35 Mrd. USD zu verzeichnen. Das Wachstum beträgt 8,2 und 7 % p.a. Vor allem die Niederlande sind in diesem Bereich aktiv. Einer der Akteure ist das Unternehmen Basilisk. Die Bedürfnisfelder Ernährung, Gesundheit und Konsum können durch die Produkte, Dienstleistungen und Technologien des Segments bedient werden. Auf Platz drei des BTF findet sich das Marktsegment der biofunktionalisierten Beschichtungen zur Materialhaftung (z. B. in Form von Adhäsiven) mit 500 Mio. USD. Die WR von 14,2 und 12,5 % sind relativ hoch im Vergleich zu dem gesamten BTF. Das Unternehmen Black Drop Biodrucker aus Deutschland ist eines der Akteure in diesem Bereich. Die Felder Gesund-

heit, Konsum und Wohnen werden durch die Produkte und Dienstleistungen des Segments bedient. Ebenfalls 500 Mio. USD kann das Marktsegment der biofunktionalisierten Verpackungen aufweisen. Hier ist das jährliche Wachstum mit 9 und 8 % um einiges geringer. Das Segment wirkt sich auf die Bedürfnisfelder Ernährung, Gesundheit und Konsum aus. Als viertes Marktsegment reiht sich die Herstellung und Verwendung von biofunktionalisiertem Korrosionsschutz ein. Mit 300 Mio. USD und einem jährlichen Wachstum von 8 % bis 2030 sowie 7 % bis 2040 bleiben die Technologien, Produkte und Dienstleistungen vermutlich ein Nischenansatz. In den Bereichen Konsum und Wohnen findet ein Hauptteil der Aktivitäten in diesem Segment statt.

Die Entwicklung der Märkte für biofunktionale Materialien und Oberflächen erfordert ein Investitionsvolumen von 700 Mio. USD. Auch hier ist die Erforschung von neuen Materialien und Beschichtungen eine der Hauptherausforderungen, die Kapital in größerem Umfang benötigt. Eine Verbesserung der Haltbarkeit und Langzeitstabilität der Produkte ist in

den kommenden Jahren erforderlich. Des Weiteren ist eine saubere und effiziente Trennung von Rohstoffen wichtig sowie die Einführung von Qualitätssicherungsverfahren. Die interdisziplinäre Ausbildung von Ingenieuren, Biologen, Materialwissenschaftlern und Medizinern ist eine zwingende Voraussetzung für die erfolgreiche Entwicklung der Märkte. Programme zur internationalen Zusammenarbeit verbessern den Austausch mit anderen Ländern.

## Tissue Engineering

Im BTF Tissue Engineering wurden vier unterschiedliche Marktsegmente definiert. Das zusammengefasste aktuelle Marktvolumen beträgt knapp 2,6 Mrd. USD. Das jährliche Wachstum von 18 und 15,3 % liegt deutlich über dem Durchschnitt aller Felder. Für das Jahr 2030 wird ein Marktvolumen von 11,4 Mrd. USD prognostiziert. Im Jahr 2040 soll dieses auf knapp 38,6 Mrd. USD steigen. *Abbildung 25* stellt die Ergebnisse dar.

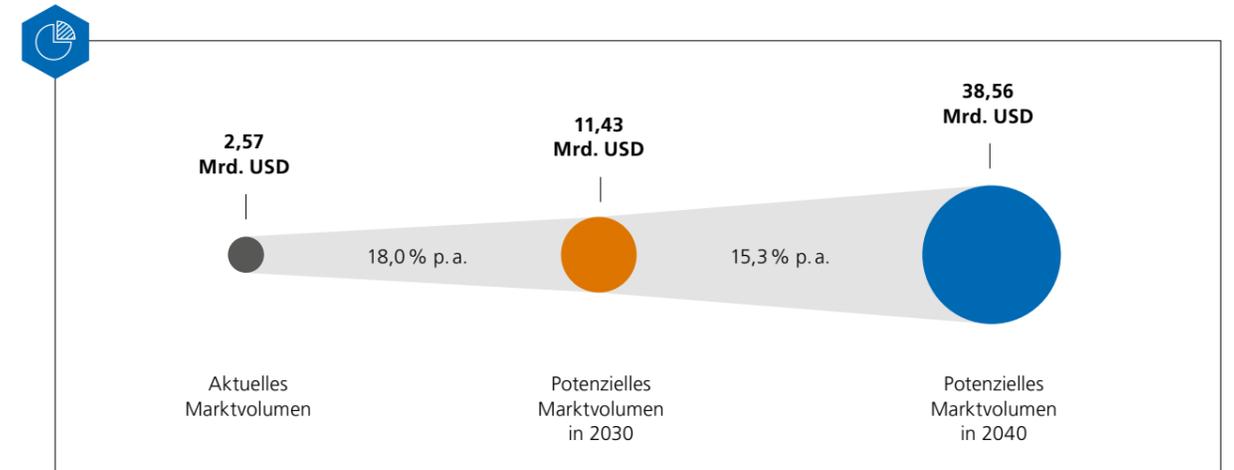


Abbildung 25: Entwicklung des Marktvolumens im BTF Tissue Engineering.

Die Herstellung und Verwendung von biologischen Rohstoffen und Zwischenprodukten (z. B. Kollagen, biokompatible Polymere) durch Tissue Engineering stellt das größte Marktsegment dieser BTF dar. Das Marktvolumen beträgt 1,1 Mrd. USD. Die Wachstumsraten liegen bei 10,5 und 8 % p.a. bis 2030 und 2040. Das Unternehmen NEFFA aus den Niederlanden ist einer der Akteure in diesem Segment. Die Bedürfnisse Wohnen und Konsum liegen im Fokus des Marktes. Das zweitgrößte Marktsegment ist die Herstellung und Verwendung menschlichen Gewebes, z. B. für die Kosmetikindustrie oder bei Toxizitätstest, mit 1 Mrd. USD Marktvolumen. Das jährliche Wachstum beträgt bis 2030 20 % und bis 2040 15 %. Hauptsächlich wird das Bedürfnisfeld Gesundheit bedient. Akteure in diesem Marktsegment stammen aus Deutschland, den USA und Kanada. Beispielfähig sind die Unternehmen BellaSeno, 3D Biotek und Octane Biotech zu nennen. Die Herstellung von Lebensmitteln durch Tissue Engineering (z. B. Fleisch, Milchprodukte, Gemüse) nimmt

ein Marktvolumen von 274 Mio. USD ein. Die Wachstumsraten von 31,3 % und 25 % p.a. sind sehr hoch und sorgen dafür, dass der Markt bis 2040 auf 18,9 Mrd. USD wachsen wird. Das Segment zielt klar auf das Bedürfnisfeld der Ernährung ab. Das kleinste Marktsegment ist die Herstellung und Verwendung von biologischen Filtern mit 200 Mio. USD und Wachstumsrate von 8 und 6 % p.a. Biologische Filter werden vor allem im Bedürfnisfeld Gesundheit eingesetzt.

Im Bereich Tissue Engineering schätzen Experten den Investitionsbedarf auf 900 Mio. USD ein. Entscheidend für den Erfolg des BTF ist eine hohe Qualität der Zellkulturen, die durch eine Optimierung von Kultivierungsprozesse hinsichtlich ihrer Steuerbarkeit unterstützt wird. Auch die Identifikation von weiteren Zellquellen (z. B. Stammzellen, tierische Zellen) und die Entwicklung von Möglichkeiten zur Gewinnung von Zellen bildet in den kommenden Jahren ein wichtiges Feld für Forschungsaktivitäten. Dazu zählt insbesondere

re die Erforschung und Erweiterung von Ansätzen der regenerativen Medizin unter Verwendung von Stammzellen. 3D-Druck, Bioprinting und additive Technologien sind Voraussetzungen für die Herstellung von komplexen Strukturen, wie sie bspw. bei Organen und Geweben erforderlich sind. Des Weiteren ist eine Unterstützung klinischer Studien wichtig, um die Zulassung von Anwendungen in der Praxis zu voranzutreiben und den Anschluss an die internationale Konkurrenz nicht zu verlieren. Die Etablierung der Kooperation zwischen Forschungseinrichtungen und industriellen bzw. medizinischen Organisationen ist ein weiterer wichtiger Punkt, der Investitionen nach sich ziehen wird.

### Gensequenzierung und -editierung

Das BTF Gensequenzierung und -editierung gehört zu einem der größeren Felder. Das aktuelle Marktvolumen wurde auf 12,4 Mrd. USD errechnet. Das jährliche Wachstum beläuft sich auf 14,2% bis 2030 und 11,3% bis 2040. Im Jahr 2030 steigt das Marktvolumen auf 41 Mrd. USD an. Bis 2040 wächst dieser Wert auf 95,1 Mrd. USD. Insgesamt konnten fünf Marktsegmente definiert werden. *Abbildung 26* fasst die Analysen der Marktentwicklung zusammen.

Das größte Marktsegment in diesem BTF ist die Herstellung von Mikroorganismen für die Anwendung

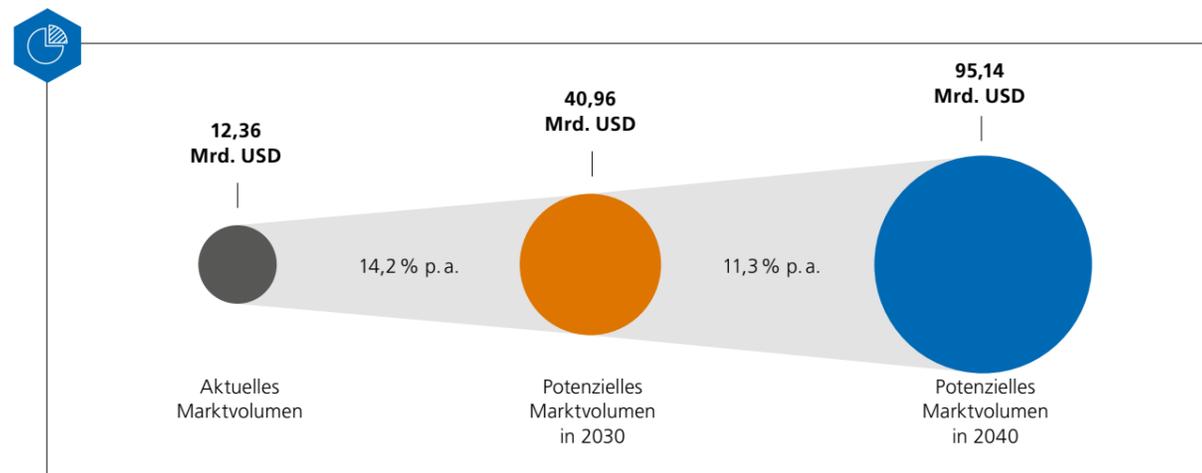


Abbildung 26: Entwicklung des Marktvolumens im BTF Gensequenzierung und -editierung.

in der Grund- und Spezialchemie (z. B. Bakterien zur Produktion von Ammoniak) mit 3,76 Mrd. USD an Marktvolumen. Die WR betragen 15,6% bis 2030 und 12,5% bis 2040. Die Bedürfnisfelder Gesundheit, Konsum und Wohnen werden von den Technologien, Produkten und Dienstleistungen dieses Segments bedient. Das zweitgrößte Marktsegment ist die Produktion von Pharmazeutika, welches ein Volumen von 3 Mrd. USD hat. Das jährliche Wachstum in diesem Segment liegt bei 15,5% bis 2030 und 12% bis 2040. In Deutschland, den USA, China, Kanada, Israel und UK/IE finden sich Akteure, die in diesem Bereich tätig sind. Beispiel hierfür sind Lifespin, Phenomic AI, Sequentify und Recursion. Das Marktsegment bedient in erster Linie das Bedürfnisfeld Gesundheit. Dicht hinter den beiden größten Marktsegmenten folgt auf Platz drei

die Herstellung von Mikroorganismen für die Produktion von Kraftstoffen (z. B. optimierte Enzyme oder Algen). Das Marktvolumen beträgt 2,5 Mrd. USD bei Wachstumsraten von 12,9% und 10,5% jährlich. Das Marktsegment fokussiert sich ausschließlich auf das Bedürfnisfeld Energie. Die Produktion von biologischen Polymeren durch Mikroorganismen weist ein Marktvolumen von 2 Mrd. USD auf. Die WR liegen bei 12,5% bis 2030 und 10% bis 2040. Das Segment wirkt sich auf die Bedürfnisfelder Gesundheit, Konsum und Wohnen aus. Das letzte und kleinste Segment ist die Herstellung und Nutzung von Mikroorganismen für die Produktion von Biokatalysatoren. Mit 1,1 Mrd. USD und Wachstumsraten von 11,6% und 8,5% p.a. können Biokatalysatoren in allen Bedürfnisfeldern eingesetzt werden.

Der Bereich Gensequenzierung und -editierung bedarf eines notwendigen Investitionsvolumens von 1 Mrd. USD. Aktuelle Ansätze in diesem BTF weisen momentan noch eine geringe Effizienz auf. Das Verhältnis zwischen dem Aufwand für die Sequenzierung und der Anwendung der resultierenden Erkenntnisse in industriellen oder medizinischen Anwendungen wird in der Praxis als nicht zufriedenstellend betrachtet. Hierfür sind umfassende Investitionen in die Infrastruktur (Labore, Laborausstattung, Biofoundries) notwendig sowie eine weitreichende Unterstützung der Grundlagenforschung. Zu nennen ist die Technologie CRISPR-Cas9, welche vielversprechende Ansätze zur Entwicklung der Marktsegmente liefert. Next-Generation-Sequencing ist ein weiterer Ansatzpunkt, der in Zukunft stärker erforscht und damit finanziell unterstützt werden sollte. Hierzu sind ebenfalls Investitionen in Bioinformatik-

Tools und Anwendungen zur Datenanalyse (z. B. Big Data) notwendig. Die ethische Verantwortung ist insbesondere in diesem BTF ein wichtiger Punkt, der einer Regelung und Regulierung bedarf.

### Metabolic Engineering und synthetische Biologie

Im BTF Metabolic Engineering und synthetische Biologie wurden sechs Marktsegmente definiert. Das gesamte aktuelle Marktvolumen beträgt 17,5 Mrd. USD und ist eines der größten. Die Wachstumsraten von 7,8% p.a. bis 2030 und 5,7% p.a. bis 2040 liegen deutlich unter dem Schnitt aller BTF. Bis zum Jahr 2030 wird das Marktvolumen auf 34,5 Mrd. USD steigen. Im Jahr 2040 beläuft es sich voraussichtlich auf 50,6 Mrd. USD. *Abbildung 27* veranschaulicht die Marktentwicklung im Zeitverlauf.

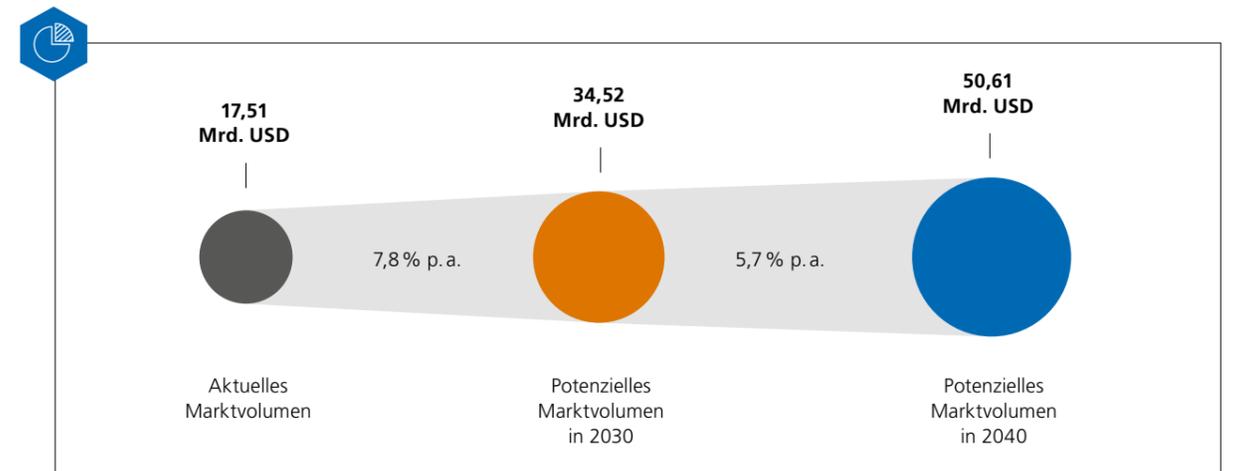


Abbildung 27: Entwicklung des Marktvolumens im BTF Metabolic Engineering und synthetische Biologie.

Das größte Marktsegment im BTF stellt die Produktion von Enzymen dar. Das Marktvolumen liegt bei 6,35 Mrd. USD. Die WR von 6 und 4% sind nochmals geringer als die Gesamtwachstumsraten des BTF. Generell können Anwendungen in allen Bedürfnisfeldern durch die Produktion und die Verwendung von Enzymen bedient werden, da deren Einsatz sehr vielseitig ist. Dicht dahinter folgt das Feld Produktion von Grundchemikalien und Polymeren aus Mikroorganismen, welches ein Marktvolumen von 5 Mrd. USD aufweist. Das Wachstum liegt bei 9 und 6% p.a. Die Technologien, Produkte und Dienstleistungen finden

vorrangig im Bereich Konsum und Wohnen ihre Anwendung. Ein weiteres Marktsegment ist die Produktion von Spezialwerkstoffen aus Mikroorganismen mit 3 Mrd. USD an Marktvolumen. Die WR bis 2030 beträgt 8% und bis 2040 6%. Der Einsatz liegt vor allem in den Bedürfnisfeldern Wohnen und Konsum. Die Produktion von einzelnen Aromastoffen und komplexen Aromen aus Mikroorganismen kann ein Marktvolumen von 2 Mrd. USD aufweisen. Das Wachstum liegt bei 7 und 6% pro Jahr. Der hauptsächliche Fokus des Segments liegt bei den Bedürfnissen Ernährung und Konsum. Mit 915 Mrd. USD ist

die Produktion von Pharmazeutika ein kleineres Segment des BTF. Dementgegen ist das jährliche Wachstum von 12,4 und 10 % deutlich stärker als die WR des gesamten BTF. In Deutschland, den USA, Israel und UK/IE sind Akteure verortet, welche im Marktsegment aktiv sind. Beispielhafte Unternehmen sind Tron, Variantyx, DayTwo und Avestas. Das kleinste Marktsegment stellt die Produktion von Mikroorganismen für die Trennung von anorganischen Stoffen (z. B. Schwermetallen, Salze) dar. Das Marktvolumen beträgt 248 Mio. USD. Auch hier sind die Wachstumsraten von 11,2 % p. a. bis 2030 und 9,5 % p. a. bis 2040 vergleichsweise hoch. Das Segment zielt insbesondere auf die Bedürfnisfelder Gesundheit, Konsum und Wohnen ab.

Im BTF Metabolic Engineering und synthetische Biologie sind Investitionen in Höhe von 950 Mio. USD notwendig. Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Entwicklung der Märkte sind Investitionen in Gentechnik und die Infrastruktur. Biofoundries und Hochdurchsatzscreening sind ebenfalls elementare Bestandteile des BTF. Hierzu zählen automatisierte Plattformen. Darüber hinaus sind Methoden zur nicht-invasiven Qualitätskontrolle von Rohstoffen, Mikroorganismen und Produkten zu entwickeln. Forschungsprojekte, welche sich auf die Optimierung von Stoffwechselvorgängen und die Entwicklung neuer biologischer Bausteine konzentrieren, bilden eine wichtige Grundlage. Investitionen in die Integration synthetischer Biokreisläufe in die Produktion

von Biokraftstoffen, Chemikalien und anderen Produkten müssen getätigt werden. In diesem BTF ist es wichtig, die Ethik in regulatorische Standards und Forschungsrichtlinien einzubeziehen. Open-Source-Initiativen können den Austausch von wissenschaftlichen und praktischen Erkenntnissen zwischen Akteuren vereinfachen.

### Bio-(Hybrid-) und Soft-Robotik

Das BTF Bio-(Hybrid-) und Soft-Robotik gehört zu einem der größeren Felder mit einem aktuellen Marktvolumen von 12,2 Mrd. USD und fünf unterschiedlichen Marktsegmenten. Das durchschnittliche Wachstum liegt bei 10,6 und 8,2 % p. a. Bis 2030 soll das Marktvolumen auf 30 Mrd. USD steigen. In 2040 sind es bereits 54,8 Mrd. USD. *Abbildung 28* zeigt die Entwicklung der Marktvolumina bis ins Jahr 2040.

Das größte Marktsegment des BTF ist die Herstellung und der Einsatz von Robotern zur Handhabung empfindlicher Produkte. Das aktuelle Marktvolumen beträgt ca. 3,15 Mrd. USD. Die jährlichen Wachstumsraten liegen bis 2030 bei 8 und bis 2040 bei 7 %. Anwendungen dieses Segments wirken sich auf die Bedürfnisfelder Ernährung, Gesundheit und Konsum aus. Dicht hinter dem größten Marktsegment folgt der Einsatz von Robotern zum Materialtransport und der Logistik. Das Marktvolumen beträgt 3 Mrd. USD. Gleichzeitig ist das Wachstum von 12,1 und 10 % p. a. das höchste in diesem BTF. Bis 2040 wird das Marktvolumen auf 18,3 Mrd. USD steigen. Generell können alle Bedürfnis-

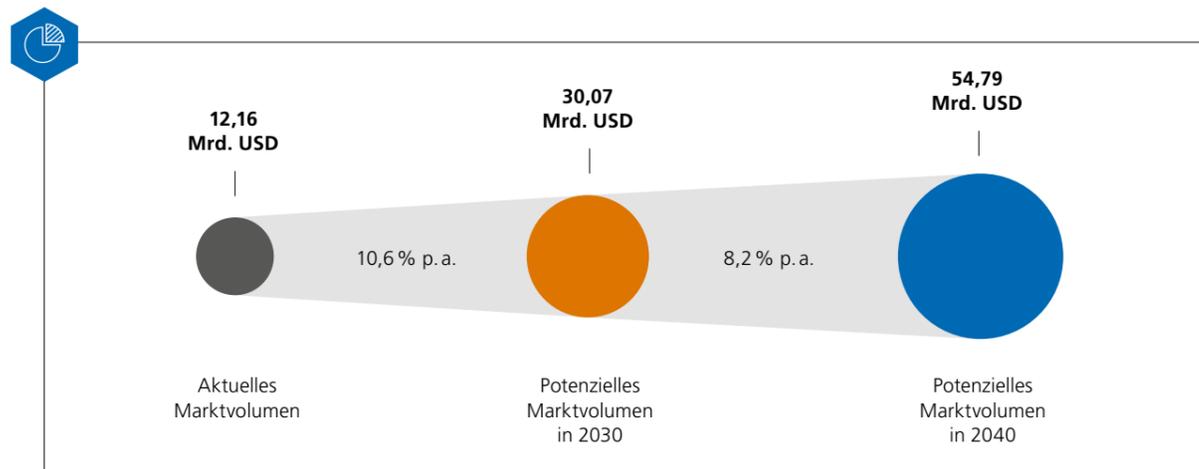


Abbildung 28: Entwicklung des Marktvolumens im BTF Bio-(Hybrid-) und Soft-Robotik.

felder von Technologien, Produkten, Dienstleistungen und Prozessen des BTF profitieren. Die Anwendung von Bio-(Hybrid-) und Soft-Robotik zur Montage und Demontage von Produkten ist ein weiteres Marktsegment dieses BTF. Das Marktvolumen liegt bei 2,5 Mrd. USD bei einem Wachstum von 9,3 und 6,5 % pro Jahr. In den Bedürfnisfeldern Konsum und Wohnen liegt ein Hauptfokus dieses Segments. In Deutschland ist das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt als Akteur auf diesem Markt zu nennen. Der Einsatz von Robotern zur Oberflächenreinigung und Inspektion weist ein Marktvolumen von 2 Mrd. USD auf. Der Markt wächst mit 11,7 % p. a. bis 2030 und 9 % p. a. bis 2040. Insbesondere die Bedürfnisfelder Gesundheit, Konsum und Wohnen werden durch das Marktsegment bedient. Das kleinste Marktsegment stellt die Montage und Fertigung in engen Räumen durch z. B. Schlangenroboter dar. Das Marktvolumen beträgt 1,5 Mrd. USD bei einem Wachstum von 12,7 und 8 % p. a.. Von diesem Markt werden vornehmlich die Bereiche Gesundheit, Konsum und Wohnen bedient.

Das erforderliche Investitionsvolumen für diesen BTF beträgt 1,3 Mrd. USD. Wichtige Punkte sind die Miniaturisierung von Robotern und die Weiterentwicklung von Leichtbautechnologien. Die Erforschung und Entwicklung der Selbstkalibrierungsfähigkeit von Robotersystemen ist ein wichtiger Ansatzpunkt, um das Feld weiter voranzubringen. Akteure und insbesondere Startups, die sich mit biologisch inspirierter und weicher Robotik beschäftigen, benötigen zu

Beginn finanzielle Unterstützung. Wie viele andere BTF erfordert auch dieser Bereich die Erforschung biofunktionaler und biokompatibler Materialien, was Investitionen z. B. in die biomimetische Materialforschung in Bezug auf Elastizität, Flexibilität oder Leitfähigkeit erfordert. Zusätzliche Investitionen in die Entwicklung von Kompetenzen und Wissen sind in diesem BTF von grundlegender Bedeutung.

### Bio-Computing und Data Storage

Das BTF Bio-Computing und Data Storage stellt das mit Abstand kleinste Feld aller 17 BTF dar. Das aktuelle Marktvolumen liegt bei 1,5 Mio. USD. Gleichzeitig sind die jährlichen Wachstumsraten von 29,9 % bis 2030 und 19,9 % bis 2040 die höchsten aller BTF. Das Marktvolumen in 2030 wird auf 15,5 Mrd. USD steigen. In 2040 werden es 46 Mrd. USD sein. Es wurden fünf Marktsegmente definiert, welche zu allen Bedürfnisfeldern beitragen. In *Abbildung 29* wird diese Entwicklung visualisiert.

Der Einsatz biologischer Simulationsplattformen ist das größte Segment dieses BTF. Das Marktvolumen liegt bei 750 Mio. USD. Die WR belaufen sich auf 21,8 und 15 %. Cortical Labs aus Australien ist eines der Unternehmen, welches auf diesem Markt aktiv ist. Das zweitgrößte Marktsegment des BTF ist Herstellung und Verwendung von biologischer Datenspeicherung. Das Marktvolumen beträgt 303 Mio. USD. Die WR für 2030 liegt bei 43,6 %. Bis 2040 sinkt er auf 27 % ab. Das drittgrößte Marktsegment ist die Herstellung und

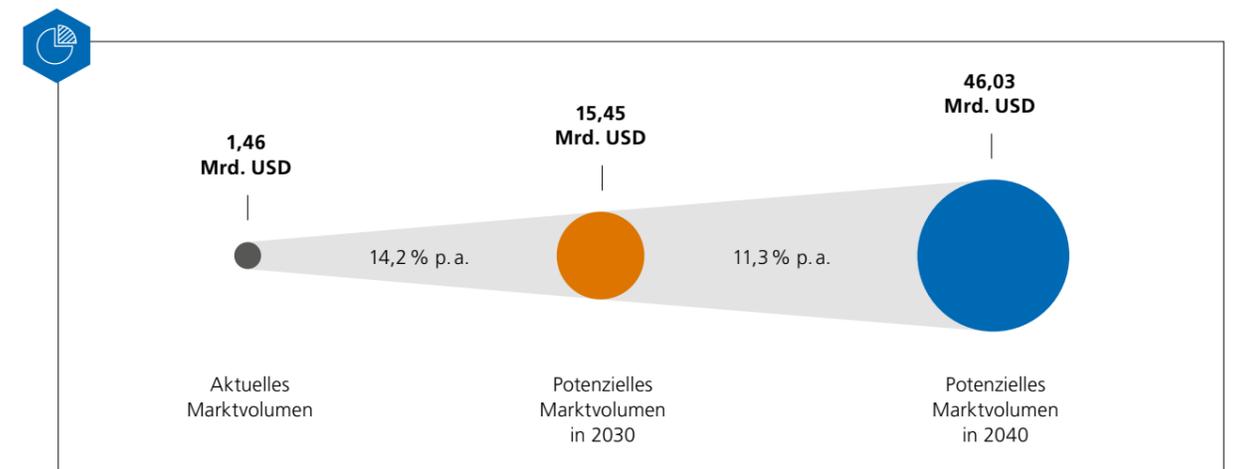


Abbildung 29: Entwicklung des Marktvolumens im BTF Bio-Computing und Data Storage.

Verwendung von Biokommunikationstechnologie mit einem Marktvolumen von 260 Mio. USD. Hier beträgt das Wachstum 16,6 und 14,5 % pro Jahr. In Deutschland, den USA und Australien gibt es bereits Bemühungen zu diesem Themenfeld. Zu nennen sind u. a. die TU Dresden und das Unternehmen Cardea Bio. Neuromorphe Hybrid-Computer stellen ein weiteres Marktsegment des BTF dar. Das geringe Marktvolumen von 100 Mio. USD wird von sehr hohen Wachstumsraten von 30,6 % p. a. bis 2030 und 17 % p. a. bis 2040 begleitet. In Deutschland, Australien, Schweden, Israel und UK/IE gibt es Akteure, die sich mit dem Themenbereich beschäftigen. Das letzte und kleinste Feld ist die Herstellung und Verwendung von Quantenbiocomputern. Das Marktvolumen liegt bei 50 Mio. USD, doch das prognostizierte Wachstum beträgt 40 % p. a. bis 2030 und 20 % p. a. bis 2040.

Das BTF Bio-Computing und Data Storage erfordert Investitionen in Höhe von 800 Mio. USD. Der hohe Investitionsbedarf liegt hauptsächlich an den hohen Kosten, die für DNA-Speicherung und -Sequenzierung anfallen. Bisher sind keine dezentralen und automatisierten Systeme zum Schreiben und Auslesen von biologischen Speichern verfügbar. Darüber hinaus ist die Lesegeschwindigkeit der heutigen Systeme zu langsam, um sie in praktischen Anwendungen einzusetzen. Die Umwandlung konventioneller Datenspeicher zu DNA-Speichern erfordert kostspieliges Equipment. Zudem sind die Bedingungen für eine langfristige Speicherung von Daten heute noch nicht gegeben. Investitionen sind

außerdem in die Entwicklung von RNA-Druckern, in die Erhöhung der Zelldichte auf Chips und in die Überlebensdauer von Zellen zu tätigen. Neue Sicherheitssysteme sind nötig, um die Technologien vor Cyberangriffen zu schützen. Insgesamt hat die Marktanalyse gezeigt, dass die Technologien, Produkte und Dienstleistungen des BTF noch nicht weit entwickelt sind, weswegen hohe Anfangsinvestitionen in die grundlegende Erforschung getätigt werden müssen.

### Soft-Sensorik und KI

Das BTF Soft-Sensorik und KI gehört zu den mittelgroßen Feldern mit einem aktuellen Marktvolumen von 3,7 Mrd. USD und fünf unterschiedlichen Marktsegmenten. Das Wachstum beträgt bis 2030 19,5 % p. a. und bis 2040 16,1 % p. a. Die WR liegen damit deutliche höher als der Durchschnitt aller BTF. Bis 2030 wird ein Marktvolumen von 18,5 Mrd. USD prognostiziert. In 2040 sollen es bereits 63,3 Mrd. USD sein. *Abbildung 30* zeigt auf einen Blick die Entwicklung des Marktes.

Mit 1 Mrd. USD ist das Marktsegment Anwendung von Soft Sensorik und KI in der Predictive Maintenance das größte Segment im BTF. Gleichzeitig ist das Wachstum von 21,5 und 18 % p. a. am höchsten, sodass ein Großteil des zukünftigen Marktvolumens durch dieses Marktsegment bestimmt wird. Das Marktsegment zielt auf alle Bedürfnisfelder, mit Ausnahme von Ernährung ab. Der zweite Platz unter den Marktsegmenten nimmt die Anwendung von Soft-Sensorik

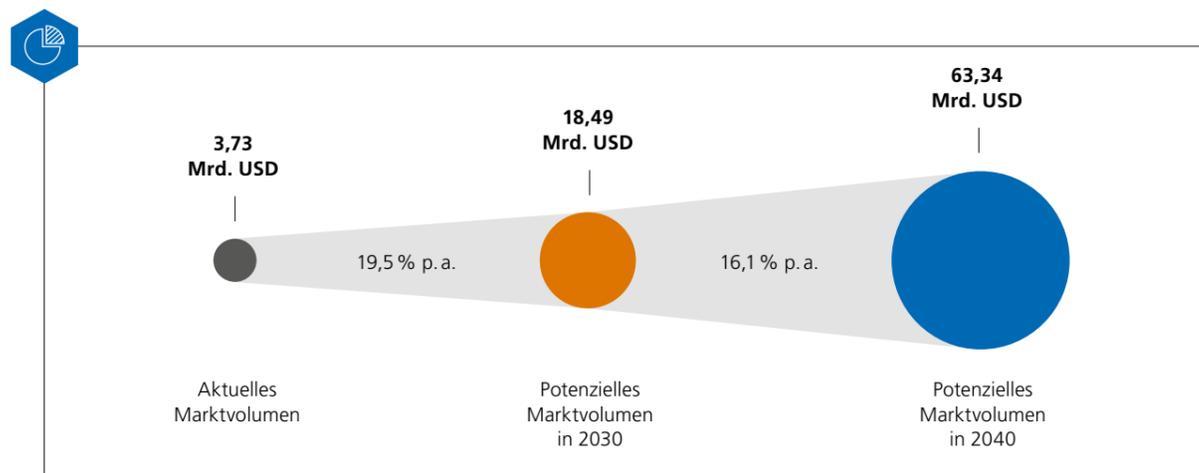


Abbildung 30: Entwicklung des Marktvolumens im BTF Soft-Sensorik und KI.

und KI in der Bioprozessoptimierung ein. Das Marktvolumen liegt bei 800 Mio. USD und die WR bei 12 und 9,5 % p. a. Grundsätzlich werden alle Bedürfnisfelder durch das Marktsegment bedient. Ebenfalls ein Marktvolumen von 800 Mio. USD weist der Einsatz von Soft Sensorik und KI in der Qualitätskontrolle der Lebensmittelproduktion auf. Das Wachstum ist deutlich höher und liegt bei 24,2 und 18 % p. a. Das Bedürfnisfeld Ernährung ist im Hauptfokus des Marktes. Die Anwendung von Soft Sensorik zur Energieeffizienzsteigerung in Bioraffinerien, -reaktoren und -foundries ist ein weiteres Marktsegment des BTF. Das Marktvolumen beträgt 657 Mio. USD. Die WR liegen bei 19,8 % bis 2030 und 17 % bis 2040. Das Segment zählt auf die Bedürfnisse in allen fünf Feldern ein. Das letzte Marktsegment ist die Anwendung von Soft Sensorik und KI im Umweltmonitoring. Das Marktvolumen liegt bei 475 Mio. USD. Die WR betragen 14,3 % und 12 %. Auch dieses Segment trägt zu allen Bedürfnisfeldern bei.

Die Investitionen in das BTF Soft-Sensorik und KI belaufen sich auf 1,2 Mrd. USD. Die Entwicklung von rückverfolgbaren und robusten Methoden von KI-Systemen ist wichtig, um Variationen in biologischen Daten abbilden zu können. Hierzu ist in die Anpassungsfähigkeit von Software an dynamische Veränderungen in biologischen Systemen zu investieren. Beim Training von KI ist eine Standardisierung von biologischen Daten notwendig, um die Präzision der

Ergebnisse von Berechnungen zu erhöhen. Wichtig ist eine interdisziplinäre Ausbildung von Ingenieuren, Biologen, Mathematikern und Informatikern, welche den Kompetenz- und Wissensaufbau über das BTF gewährleistet. Datenschutzrichtlinien und Cybersicherheit sind auch in diesem BTF unentbehrlich, genauso wie regulatorische Vorgaben.

### Rückverfolgbarkeit und Blockchain

Auch das BTF Rückverfolgbarkeit und Blockchain gehört zu den mittelgroßen Feldern und weist ein aktuelles Marktvolumen von 6,3 Mrd. USD in insgesamt vier definierten Marktsegmenten auf. Technologien, Produkte, Prozesse und Dienstleistungen betreffen alle fünf Bedürfnisfelder. Das Wachstum liegt mit 28 % p. a. bis 2030 und 15,9 % p. a. bis 2040 deutlich über dem Durchschnitt aller BTF. In 2030 beträgt das Marktvolumen 57,9 Mrd. USD. Bis 2040 wird es weiter auf 104,5 Mrd. USD steigen und damit eines der großen Themen der Zukunft im Bereich biointelligenter Wertschöpfung darstellen. *Abbildung 31* fasst die Analysen zusammen.

Das größte Marktsegment ist die Anwendung von Blockchain für Nachhaltigkeit in der Bioproduktion. Das Marktvolumen beträgt hierbei aktuell 2,25 Mrd. USD bei einem Wachstum von 6 und 4 % p. a. Die WR sind im Vergleich zum gesamten BTF sehr gering. Als nächstes Segment folgt das Tracking von Energie- und Ressourcenverbrauch in verschiedenen Lebensphasen.

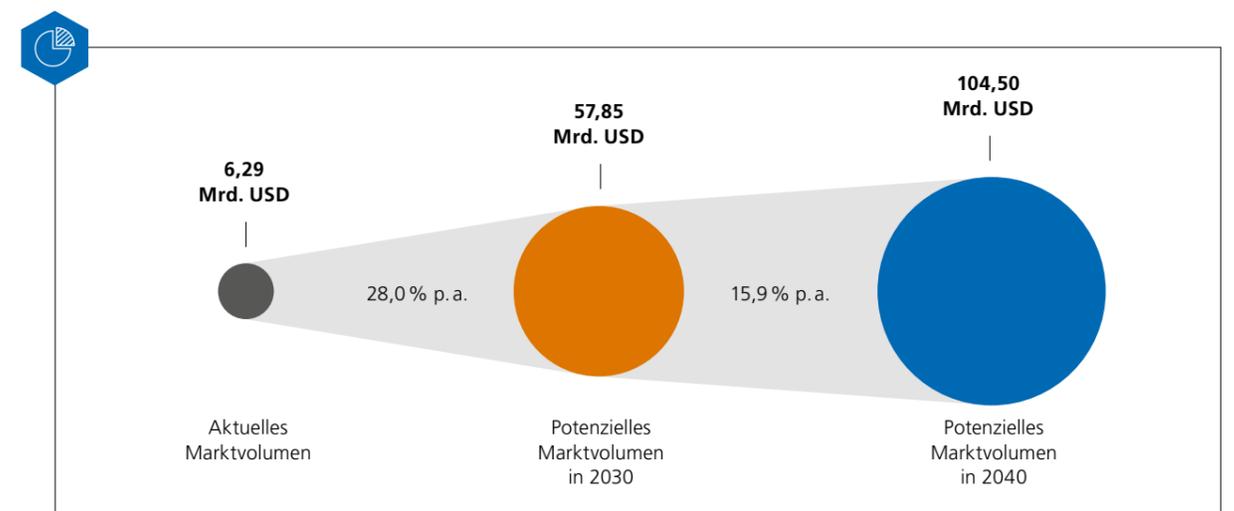


Abbildung 31: Entwicklung des Marktvolumens im BTF Rückverfolgbarkeit und Blockchain.

Momentan liegt das Marktvolumen bei 1,66 Mrd. USD. Bis 2030 wird ein Wachstum von 19 % p. a. erwartet, Bezogen auf das Jahr 2040 beträgt die WR 15 %. Dicht hinter dem zweiten Platz liegt das Marktsegment für die Anwendung von Blockchain in der Produktsicherheit und Qualitätskontrolle. Das Marktvolumen beträgt 1,46 Mrd. USD, bei einem Wachstum von 40 und 20 % p. a.. Ein weiterer Markt ist die Anwendung von Blockchain im Bereich der Bioinformatik. Das Marktvolumen beläuft sich auf 919 Mrd. USD und die WR betragen 37,2 % bis 2030 und 20 % bis 2040.

Der Bereich Rückverfolgbarkeit und Blockchain erfordert ein Investitionsvolumen von 800 Mio. USD. Darunter fällt z.B. die Unterstützung von Innovationszentren und Unternehmen, die sich auf die Integration von Blockchain in industrielle oder medizinische Anwendungsfälle ausgerichtet haben. Gleichzeitig sind Pilotprojekte und Untersuchungen zu Technologie-Weiterentwicklung notwendig (z. B. in Richtung Smart Contracts), um weitere Verwendungsmöglichkeiten zu identifizieren. Investitionen in die Rechenleistung und Energieversorgung sind ein wichtiger Schritt, um die Skalierbarkeit der Ansätze für den Einsatz bei sehr großen Datenmengen

voranzutreiben. Gleichzeitig erfordern die steigenden Datenmengen neue Richtlinien zur Datensicherheit. Auch ethische Aspekte (z. B. Datenschutz- oder Rückverfolgung persönlicher Daten) gewinnen an Bedeutung. Standards und Schnittstellen sind notwendig, damit unterschiedliche Technologien, Netzwerke und Informationssysteme miteinander kommunizieren können und sich so Synergieeffekte ergeben.



Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Wachstum aller 17 BTF deutlich über jenem der meisten Volkswirtschaften liegt, insbesondere jenem von Deutschland (188). Demnach ist zu vermuten, dass der relative Marktanteil der betrachteten Technologien, Produkte, Dienstleistungen und Prozesse in den kommenden Jahren deutlich steigen wird. Auffällig ist, dass das Wachstum in den meisten Marktsegmenten nach 2030 etwas abflacht. Es ist also davon auszugehen, dass ein Großteil der Entwicklung in den kommenden Jahren stattfinden wird. Dementsprechend ist es für Unternehmen, Forschungsinstitute und Volkswirtschaften notwendig, zeitnah Investitionen zu tätigen, um den Anschluss nicht zu verlieren. In der Regel sind hierzu Anfangsinvestitionen in grundlegende Forschung, Infrastruktur und den Aufbau von Wertschöpfungsketten notwendig sowie die Förderung von Startups, die sich in Geschäftsfeldern der biointelligenten Wertschöpfung betätigen wollen.

## 5. GLOBALES RENNEN: BENCHMARKING DER BIOINTELLIGENZ IM INTERNATIONALEN VERGLEICH

# INTERNATIONALER BENCHMARK BIOINTELLIGENZ

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Benchmarkings vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Betrachtung des Status quo in Deutschland im Vergleich zu den anderen Leitländern. Besonders positiv hervorstechende Merkmale, Rahmenbedingungen oder Ansätze werden zusätzlich als länderspezifische Highlights hervorgehoben.

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf Experteninterviews sowie einer zusätzlichen Plausibilisierung durch öffentlich zugängliche Datenbanken. Die Experteninterviews dienten dabei als grundlegende Informationsquelle, um Einblicke in die verschiedenen Facetten der biointelligenten Wertschöpfung zu erhalten. Das breite Spektrum an Expertenmeinungen ermöglichte eine weitgehend ganzheitliche Betrachtung der weltweiten Aktivitäten. *Abbildung 32* stellt die konsolidierten Ergebnisse je Fokusthemenfeld und das Gesamtergebnis

in einer Heatmap dar. Die Ergebnisse zeigen, wie die Leitländer im Vergleich zueinander abschneiden, wobei die Werte zwischen 0 und 1 liegen. Je höher der Wert, desto besser sind die Voraussetzungen eines Landes, in diesem Fokusthemenfeld zukünftig eine Schlüsselrolle im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung einzunehmen. Die aggregierten Einzelergebnisse ergeben den Biointelligenz-Wert. Die Farbgebung in Blau und Weiß weist auf signifikante Unterschiede der Ergebnisse je Fokusthemenfeld hin. So wird unmittelbar

	Politisches Risiko und Regulierung	Verfügbarkeit von Finanzkapital	Zugang zu physischen Ressourcen	Marktzugang	F&E-Aktivitäten	Innovationsnetzwerke	Biointelligente Technologien
<b>USA</b>	0,32	0,97	0,49	0,64	0,71	0,81	0,80
<b>Deutschland</b>	0,54	0,66	0,55	0,67	0,72	0,77	0,54
<b>Schweden</b>	0,79	0,38	0,74	0,59	0,53	0,73	0,54
<b>Finnland</b>	0,81	0,16	0,54	0,46	0,53	0,45	0,24
<b>GB</b>	0,33	0,52	0,46	0,42	0,56	0,28	0,83
<b>Niederlande</b>	0,66	0,31	0,48	0,60	0,52	0,77	0,44
<b>Kanada</b>	0,43	0,63	0,54	0,34	0,36	0,35	0,61
<b>Australien</b>	0,69	0,40	0,27	0,43	0,31	0,08	0,60
<b>China</b>	0,05	0,81	0,41	0,27	0,54	0,54	0,22
<b>Israel</b>	0,12	0,37	0,25	0,25	0,48	0,53	0,40
<b>Norwegen</b>	0,83	0,21	0,65	0,11	0,19	0,33	0,05

Abbildung 32: Heatmap-Darstellung der Ergebnisse des Benchmarks. Je höher der Wert, desto besser sind die Voraussetzungen eines Landes in diesem Fokusthemenfeld zukünftig eine Schlüsselrolle einzunehmen.

ersichtlich, in welchen Aspekten ein Leitland im Kontext der biointelligenten Wertschöpfung besonders gut abschneidet (dunkelblaue Einfärbung) oder Verbesserungspotenzial aufweist (hellblaue Einfärbung).

Die Ergebnisse zeigen, dass die USA derzeit das größte Potenzial haben, zukünftig eine Schlüsselrolle im Kontext der biointelligenten Wertschöpfung einzunehmen, dicht gefolgt von Deutschland und Schweden. Auf den Plätzen vier bis sieben folgen Finnland, Vereinigtes Königreich/Irland die Niederlande und Kanada, wiederum gefolgt von Australien, China, Israel und Norwegen auf den Plätzen acht bis elf. Noch auszuschöpfendes Potenzial besteht in Deutschland insbesondere in den Fokusthemenfeldern „Biointelligente Technologien“ und „Unternehmertum“, während Deutschland in den Bereichen „Bildung und Qualifikation“, „Einfluss auf Nachhaltigkeit“, „Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten“ und „Marktzugang“ derzeit sehr gute Voraussetzungen bietet. Zum Zweck der Veranschaulichung und systematischen Analyse stellt *Abbildung 33* den Status quo Deutschlands

in Bezug auf die Fokusthemenfelder im Vergleich zu ausgewählten Leitländern dar. Die präsentierten Resultate wurden entsprechend auf die in Deutschland erzielten Ergebnisse normiert. Ein Wert größer als eins indiziert ein überlegenes Potenzial im Vergleich zu Deutschland, während ein Wert kleiner als eins auf ein unter Deutschland liegendes Potenzial hinweist.

Zur Überprüfung der Ergebniszuverlässigkeit wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. In diesem Kontext wurde anstelle der indikatorspezifischen Gewichtung je Fokusthemenfeld eine gleichverteilte Gewichtung als Grundlage für das Benchmarking verwendet. Die ermittelten Ergebnisse zeigen lediglich minimale Veränderungen in fünf der 13 Fokusthemenfelder. Die Änderungen erstrecken sich jedoch auf die Platzierungen vier bis zehn. Die Top-drei Platzierungen der Leitländer je Fokusthemenfeld verändern sich nicht. Hierdurch bestätigt sich die Zuverlässigkeit der Ergebnisse des Benchmarkings. Hinsichtlich des Gesamtergebnisses lassen sich keinerlei Veränderungen im länderspezifischen Ranking feststellen.

Unternehmertum	Geschäftsmodelle	Struktur von Wertschöpfungsnetzwerken	Marktpotenzial der Technologie	Einfluss auf Nachhaltigkeit	Ethische Erwägung und Akzeptanz	Bildung und Qualifikation	Biointelligenz-Wert
0,77	0,53	0,32	0,91	0,64	0,56	0,54	0,64
0,53	0,40	0,55	0,72	0,71	0,58	0,72	0,62
0,69	0,32	0,30	0,48	0,51	0,44	0,47	0,54
0,65	0,48	0,63	0,25	0,65	0,74	0,51	0,51
0,42	0,40	0,26	0,74	0,49	0,52	0,66	0,49
0,70	0,16	0,05	0,54	0,34	0,23	0,22	0,43
0,46	0,27	0,31	0,41	0,38	0,37	0,47	0,42
0,41	0,29	0,06	0,35	0,33	0,39	0,35	0,36
0,39	0,48	0,09	0,24	0,05	0,47	0,37	0,35
0,66	0,26	0,10	0,51	0,22	0,31	0,37	0,34
0,30	0,03	0,03	0,05	0,22	0,26	0,21	0,25

Hohes Potenzial im Kontext der biointelligenten Wertschöpfung      Geringes Potenzial im Kontext der biointelligenten Wertschöpfung

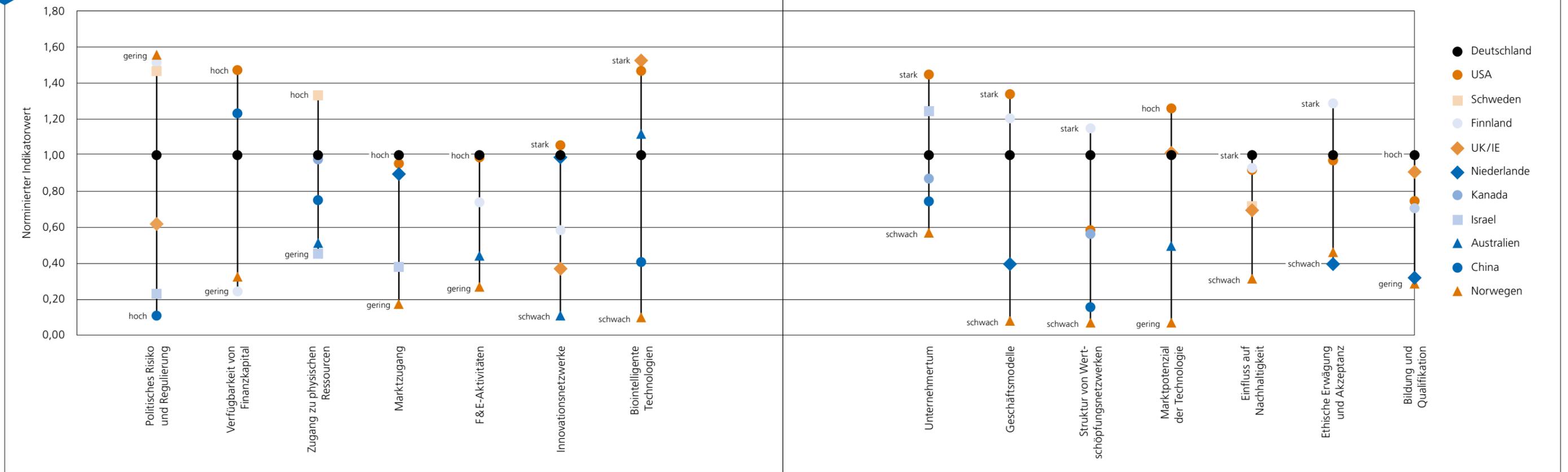


Abbildung 33: Ergebnisse je Fokusthemenfeld ausgewählter Leitländer normiert auf den Status quo Deutschlands.

Es ist festzuhalten, dass die Ergebnisse eine Momentaufnahme zum Zeitpunkt der Durchführung der Experteninterviews im Zeitraum von Juni 2023 bis September 2023 darstellen und lediglich eine Tendenz der Potenziale zur biointelligenten Wertschöpfung im jeweiligen Land wiedergeben. Die Ergebnisse hängen stark von der Anzahl und den Aussagen der Experten sowie den verwendeten Datenbankwerten ab. *Tabelle 3* fasst das Konfidenz-Niveau der betrachteten Länder zusammen. Das Konfidenz-Niveau zeigt, dass die Ergebnisse für Deutschland deutlich auf Expertenaussagen beruhen, während die Aussagen für bspw. Norwegen zu einem größeren Teil durch Datenbanken plausibilisiert wurden. Ebenso ist zu ergänzen, dass China aus den bereits genannten Gründen in dieser Untersuchung unterrepräsentiert ist und im Vergleich der Leitländer besser als dargestellt einzuschätzen ist.

Leitland	Konfidenz-Niveau
Deutschland	17,2
USA	9,3
Schweden	5,5
Finnland	11,3
Vereinigtes Königreich und Irland	7,2
Niederlande	3,4
Kanada	3,6
Israel	3,8
Australien	7,4
China	4,5
Norwegen	2,1

Tabelle 3: Darstellung des Konfidenz-Niveau je Leitland. Das Konfidenz-Niveau gibt das Verhältnis von Expertenaussagen und Datenbankinformationen an, die in die Ergebnisse eingeflossen sind.

Im Folgenden werden die Ergebnisse sowie der Status quo Deutschlands je Fokusthemenfeld diskutiert sowie länderspezifische Highlights analysiert. Dabei wird ein Fokus auf die in *Abbildung 33* dargestellten Leitländer gelegt.

### Politische Stabilität und Regulierung

Deutschland, bekannt für seine politische und gesellschaftliche Stabilität, befindet sich im Ländervergleich im Fokusthemenfeld „Politische Stabilität und Regulierung“ auf einer mittleren Position. Diese Lage ist eng verknüpft mit der Regulatorik des Landes, die sowohl Herausforderungen als auch Chancen für die Innovationslandschaft innerhalb der biointelligenten Wertschöpfung und Entwicklung biointelligenter Technologien darstellt. In führenden Ländern wie Norwegen, Finnland und Schweden tragen liberale Rechtsvorschriften und die effizient gestalteten Richtlinien für Geschäftstätigkeiten wesentlich zur Förderung von Innovationen bei.

In Deutschland hingegen wird das bestehende Innovationssystem oft durch strikte Gesetzgebung, insbesondere in der biointelligenten Wertschöpfung und verwandten Feldern, gebremst. Diese Regularien werden im internationalen Vergleich oft als Hindernis für die Entwicklung und Kommerzialisierung neuer Technologien wahrgenommen. Die Experten fassten zusammen, dass Deutschland sehr strikte Regularien hat, welche im internationalen Vergleich hinderlich für Innovationen sein können. Das Vereinigte Königreich und Irland bieten einen interessanten Vergleich zu Deutschland, insbesondere im Hinblick auf das Regulierungssystem. Experten betonen, dass das britische Regulierungssystem flexibler und effizienter ist als das deutsche. Sie heben hervor, dass es in UK/IE im Vergleich zu anderen europäischen Ländern einfacher ist, Regularien zu ändern. Diese Flexibilität in der Regulierungsdynamik trägt entscheidend dazu bei, wie schnell und effektiv Innovationen in den jeweiligen Ländern gefördert und umgesetzt werden können.

Ein weiterer kritischer Punkt in der Diskussion um Deutschlands Innovationsklima ist die bürokratische Effizienz. Finnland z. B. zeichnet sich durch einen geringeren Aufwand bei Antragsstellungen und anderen bürokratischen Prozessen aus, insbesondere im nationalen Kontext, verglichen mit EU-weiten Forschungsprojekten. Dies fördert eine schnellere Realisierung von Innovationsprojekten und eine dynamischere Forschungslandschaft, die für die biointelligente Wertschöpfung essentiell ist.

In den USA stellt sich im Bereich der biointelligenten Technologien eine andere Herausforderung: Nicht die strenge Regulierung, sondern vielmehr das Fehlen spezifischer Vorschriften kann ein Hindernis sein. Die Unsicherheit und Unklarheit, die durch das Fehlen gezielter Regularien entstehen, erschweren es Unternehmen häufig, den Zulassungsweg für neue Produkte zu verstehen und die notwendigen Genehmigungen zu erhalten. Dies zeigt, dass das Fehlen klarer Richtlinien ebenso wie strenge Regulierungen die Entwicklung und Markteinführung neuer Technologien behindern kann. In China stehen Unternehmen im Gegensatz zu Deutschland, wo eine hohe Rechtssicherheit den Markt und das Unternehmertum unterstützt, vor anderen Herausforderungen. Experten weisen darauf hin, dass in China

die Rechtssicherheit nicht so stark ausgeprägt ist wie in Deutschland und der Markt dort weniger stabil ist. Zudem gibt es in China häufigere staatliche Eingriffe in den Marktmechanismus, was sich nachteilig auf das Unternehmertum auswirken kann. Diese Umstände stellen, trotz des schnellen Wachstums und des großen Marktpotenzials in China, signifikante Herausforderungen für Unternehmen dar.

Es ist festzustellen, dass Deutschland in seiner Innovationskraft und im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung durchaus konkurrenzfähig ist, insbesondere dank seiner hochqualifizierten Fachkräfte und hervorragenden Hochschulen. Um jedoch international weiter voranzukommen, kann der Abbau von bü-

rokratischen Hürden und das Schaffen eines Rahmens, der Innovationen in der biointelligenten Wertschöpfung effizienter und effektiver fördert, hilfreich sein.

#### Verfügbarkeit von Finanzkapital

Deutschland rangiert im internationalen Benchmark im Fokusthemenfeld „Verfügbarkeit von Finanzkapital“ im Mittelfeld, gemeinsam mit Kanada. Im Gegen-

---

»What holds paramount importance is the predictability and foresight of regulation and politics. Stability is not confined to a conservative context but is pivotal in a progressive sense. Anticipating the trajectory of regulation and politics over a timeframe of at least five, preferably ten years is imperative.«

---

Dr. Sebastian Beblawy, Umwelttechnik BW<sup>18</sup>

satz dazu führen China und an der Spitzenposition die USA das Ranking an, während Finnland, die Niederlande und Norwegen niedrigere Positionen einnehmen.

Die Experten beschreiben den Zugang zu Risikokapital in den USA als leicht. Während in den USA umfassende Mittel für Risikokapital vorhanden sind sowie eine umfassende Bereitschaft, riskante Ideen mit hohem Innovationspotenzial zu unterstützen, fehlt es häufig an einer spezifischen Fokussierung auf den Bereich der Konvergenz und der biointelligenten Wertschöpfung. Die nächstliegenden Themen, in die Risikokapital fließt, sind in der Regel Künstliche Intelligenz und Biotechnologie, wobei die Konvergenz aus Bio-, Hard-, und Software oft nicht im Vordergrund steht.

Ein zentraler Aspekt, der Deutschlands Position kennzeichnet, kann wie folgt zusammengefasst werden: Experten betonen, dass es eine Lücke in den finanziellen Möglichkeiten gibt, insbesondere im Bereich des Frühphasen-Risikokapitals. Die vorherrschende stark institutionalisierte Finanzierungsstruktur kann die Entwicklung und den Fortschritt in neuen, risikoreicheren Technologiebereichen der biointelligenten Wertschöpfung einschränken. Deutschland und Israel tätigen umfassende Investitionen in F&E und bieten staatliche Förderprogramme für verwandte Bereiche der biointelligenten Wertschöpfung an, bspw. im Bereich der Bioökonomie oder Biotechnologie. Hierdurch wird die Position im internationalen Wettbewerb gestärkt.

In China existiert ein dynamisches und gut finanziertes Umfeld für Startups und Innovationen. Die hohe Verfügbarkeit von Kapital, sowohl aus privaten als auch aus staatlichen Quellen, ermöglicht es chinesischen Unternehmen, in der Entwicklung von Technologien voranzuschreiten. Allerdings ist der chinesische Markt weitgehend nach innen gerichtet, was die Zusammenarbeit mit internationalen Startups limitiert. Die Fokussierung auf klare Ziele mit Hilfe der Fünfjahrespläne und die gezielte Unterstützung von Schlüsselindustrien und Startups könnten wegweisend für die Stärkung von Deutschlands Position im internationalen Wettbewerb sein.

Zusammenfassend ist anzumerken, dass die umfassenden Investitionen in Forschung und Entwicklung sowie staatliche Förderprogramme für verwandte Bereiche der biointelligenten Wertschöpfung (z. B. Bioökonomie, Biotechnologie) positiv sind und die Innovationskraft des Landes stärken. Jedoch gibt es Herausforderungen, denen Deutschland gegenübersteht. Insbesondere die festgestellte Lücke

im Frühphasen-Risikokapital und die stark institutionalisierte Finanzierungsstruktur könnten die Entwicklung in risikoreichen, konvergenten Technologiebereichen der Biointelligenz einschränken. Insgesamt bietet Deutschland ein stabiles Finanzkapitalumfeld, das noch Potenzial zur Weiterentwicklung hat.

---

»Erfolgreiche Innovationen erfordern Kreativität und Mut. Sie benötigen aber auch ein Umfeld, das sie auf diesem Weg begleitet und unterstützt. Wagniskapital spielt dabei eine entscheidende Rolle, da es ermöglicht, Risikoprofile zu fördern, die ansonsten nur schwer an Finanzmittel kommen würden. In Europa hat sich der Wagniskapitalmarkt in den letzten zehn Jahren fast verzehnfacht. Das ist erfreulich und ermutigend. Wir müssen aber auch im Blick behalten, dass das Delta zu den USA immer noch enorm ist, sowohl was das Volumen als auch die Stärke des Ecosystem angeht.«

---

Olaf Koch, ZINTINUS GmbH

## Zugang zu Ressourcen

In der aktuellen internationalen Bewertung des Fokusthemenfelds „Zugang zu Ressourcen“ und der Entwicklung der Energieinfrastruktur zeichnet sich ein differenziertes Bild der Länderpositionen ab. Deutschland findet sich dabei im Mittelfeld, umgeben von Ländern wie Finnland, Kanada und den USA, die ähnliche Herausforderungen und Potenziale aufweisen. An der Spitze des Rankings stehen Schweden und Norwegen, die aufgrund ihrer innovativen Ansätze und starken Investitionen in erneuerbare Energien führend sind. Am anderen Ende des Spektrums befinden sich Israel, Australien und China.

Der internationale Vergleich der Mineralreserven ist facettenreich. Deutschland, mit seinen sehr begrenzten eigenen Ressourcen, steht vor der Herausforderung, seine Abhängigkeit von rohstoffreichen Ländern zu verringern. Im Gegensatz dazu wird China und Australien von Experten als ein Land mit umfangreichen eigenen Ressourcen beschrieben, das eine größere Unabhängigkeit in der Rohstoffversorgung genießt. Laut Experten haben diese Unterschiede bei den Rohstoffreserven direkte Auswirkungen auf die wirtschaftliche Stabilität und Unabhängigkeit der Länder.

Die Produktkonzentration der Importe weist signifikante Unterschiede im internationalen Vergleich auf, vor allem in Bezug auf strategische Allianzen. In Nordamerika, repräsentiert durch die USA und Kanada sowie in Teilen des europäischen Binnenmarkts, wird die positive Wirkung starker strategischer Partnerschaften auf Diversifizierung und Stabilität der Importe hervorgehoben. Diese Regionen profitieren von eng verflochtenen Handelsbeziehungen, die eine ausgewogene Produktverteilung ermöglichen und damit ihre wirtschaftliche Resilienz stärken. In deutlichem Kontrast dazu steht China, das trotz seiner starken Wirtschaftsleistung und globalen Präsenz in geringerem Maße auf internationale strategische Allianzen setzt.

»The Australian economy is heavily influenced by its natural resources, resulting in substantial exports of minerals and agricultural products. Additionally, the country places a strong emphasis on the services and finance sector.«

Prof. Esteban Marcellin, University of Queensland<sup>19</sup>

Die Energieinfrastruktur, insbesondere hinsichtlich erneuerbarer Energien, ist weltweit sehr unterschiedlich ausgebaut. Länder wie Finnland, Norwegen und Schweden heben sich durch ihre starke Fokussierung auf erneuerbare Energien deutlich hervor. Diese skandinavischen Nationen sind Vorreiter bei der Investition in erneuerbare Energiequellen und setzen damit nach Meinung von Experten internationale Maßstäbe. Ihre Bemühungen reflektieren nicht nur ein Engagement für Nachhaltigkeit, sondern auch eine strategische Entscheidung, die langfristige Energieunabhängigkeit und ökologische Verantwortung fördert.

## Zugang zu Märkten

Deutschland zeichnet sich im globalen Ranking durch einen hervorragenden Zugang zu Absatz- und Beschaffungsmärkten im Fokusthemenfeld „Zugang zu Märkten“ aus, gefolgt von den USA und europäischen Ländern wie den Niederlanden und Schweden. Die starke Stellung Deutschlands im internationalen Handel wird durch umfassende Handelsabkommen im europäischen Wirtschaftsraum gestützt, was zu einer hohen Exportquote führt. Trotzdem bleibt Raum für Verbesserungen, insbesondere in Nicht-EU-Ländern, in denen Bürokratie und Zölle den Exportprozess häufig verlangsamen.

Israel bietet hier ein interessantes Gegenbeispiel. Die Experten aus Israel beschreiben die Situation des Landes in Hinblick auf Startups und Unternehmen als eine Insel, da zu den grenznahen Ländern keine geschäftliche Zusammenarbeit besteht. Diese Aussage unterstreicht die einzigartigen Herausforderungen Israels im Bereich des Marktzugangs und der internationalen Zusammenarbeit, die sich deutlich von der offeneren und integrativeren Situation in Deutschland unterscheiden. In Finnland gestaltet sich die Situation hinsichtlich der Regulierung für Startups und Technologieunternehmen verhältnismäßig unkompliziert, insbesondere wenn es um Technologien geht, die keine direkten ethischen Fragestellungen aufwerfen. Die finnischen Experten heben hervor, dass die rechtlichen Herausforderungen in solchen Fällen begrenzt sind, was eine gewisse Erleichterung im Innovationsprozess darstellt. Im Gegensatz dazu sehen sich Unternehmen in Israel mit komplexeren regulatorischen Bedingungen konfrontiert, die auch kulturelle und religiöse Aspekte, wie bspw. die Einhaltung jüdischer Speisegesetze, berücksichtigen müssen. Diese regulatorischen Unterschiede bringen eine Vielfalt von Heraus-

»The market constantly evolves with shifting user preferences. Leaders must grasp market dynamics, anticipate customer needs, and offer proactive solutions, guiding companies to lead rather than react to changes.«

Matija Zulj, AGRIVI<sup>20</sup>

forderungen, die Startups je nach ihrem geografischen und kulturellen Kontext bewältigen müssen. Experten weisen darauf hin, dass sowohl auf der Angebots- als auch auf der Nachfrageseite Nachholbedarf besteht. Zukunftsperspektiven für Deutschland im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung umfassen die Weiter-

entwicklung des Marktzugangs durch Anpassung an globale Trends und verstärktes Bewusstsein für die Wertschöpfung im Konvergenzbereich.

## Forschung- und Entwicklungsaktivitäten

In Deutschland ist das Fokusthemenfeld „Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten“ im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung im Vergleich zu den anderen Leitländern derzeit am stärksten ausgeprägt. Nach Expertenmeinungen ist in Deutschland vor allem die Grundlagenforschung stark ausgeprägt. Es gibt allerdings Raum für Verbesserung im Hinblick auf eine reibungslosere Integration von Forschungsergebnissen in anwendungsorientierte Lösungen, trotz anwendungsorientierter Forschungseinrichtungen wie der Fraunhofer-Gesellschaft. In diesem Zusammenhang wird auf die mangelnde öffentliche Kommunikation von Forschungsergebnissen verwiesen, vor allem im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung.

Experten aus den anderen Leitländern beschreiben die Forschungsaktivitäten in Deutschland als weniger profitorientiert. Die Forschungskultur wird als positiv und als gute Grundlage für eine offene und kooperative Atmosphäre wahrgenommen. Die interdisziplinäre Forschung, die eine wesentliche Grundlage für die biointelligente Wertschöpfung darstellt, steht jedoch noch vor Herausforderungen. Es gibt Hindernisse und Ungleichheiten, die die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Disziplinen erschweren können, bspw. erhalten Promotions-

studierende in der Biologie oft nur Teilzeitstellen, während Ingenieure in der Produktionstechnik in der Regel Vollzeitstellen haben. Dies führt zu Ungleichheiten und hemmt die interdisziplinäre Forschung. Eine weitere Herausforderung besteht darin, die

Prinzipien wissenschaftlichen Arbeitens der verschiedenen akademischen Disziplinen im Kontext einer biointelligenten Wertschöpfung zusammenzuführen. Es besteht Bedarf, Brücken zwischen den verschiedenen Disziplinen zu bauen und die Zusammenarbeit zu fördern, um innovative Lösungen für komplexe

Probleme zu entwickeln. Laut Expertenmeinungen ist dafür auch die Minimierung struktureller Hemmnisse bei der Besetzung wissenschaftlicher Positionen wichtig. Trotzdem ist die Tatsache, dass Studiengänge in Deutschland nach und nach interdisziplinärer werden, ein positiver Schritt in Richtung einer umfassenderen und integrativeren Forschungslandschaft.

Es existieren Unterschiede zwischen verschiedenen Disziplinen und Teilbereichen, sowohl in Bezug auf Forschungsmethoden als auch auf Herangehensweisen. Diese Vielfalt kann als Stärke betrachtet werden, erfordert jedoch auch eine verbesserte Integration und Zusammenarbeit, um das volle Potenzial der deutschen Forschungslandschaft auszuschöpfen. Insgesamt zeigt sich die deutsche Forschungsszene dynamisch.

Die USA erreichen einen ähnlichen Wert wie Deutschland im Bereich der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Als Unterschied wird die Integration von Forschungsergebnissen in die Industrie beschrieben. In den USA ist es im Vergleich zu Deutschland laut Experten eher üblich, Kooperationen zwischen Universitäten und Unternehmen zu bilden. Außerdem zeichnet sich die Forschungs- und Entwicklungskultur durch eine hohe Risikobereitschaft und den Fokus auf die erfolgreiche Umwandlung von wissenschaftlichen Erkenntnissen in Produkte aus. Insbesondere Universitäten tragen maßgeblich zur Forschung bei und es existieren Unterstützungsprogramme, die den Weg von der Idee zur Unternehmensgründung begleiten. Das führt laut Experten jedoch zu einer profitorientierten Forschungslandschaft als in Deutschland. Finnland zeichnet sich durch eine enge Verbindung zwischen Industrie, Universitäten und Forschungszentren aus, die laut Experten auf die geringe Größe des Landes zurückzuführen ist. Vor allem im Bereich der Forstwirtschaft und der Bioökonomie arbeiten viele Forscher aus verschiedenen Disziplinen zusammen, wodurch bereits einige multidisziplinäre Projekte durchgeführt werden konnten. In der Gesamtbewer-

tung liegt Finnland im Mittelfeld. Im Vergleich zu Deutschland steht Norwegen vor der Herausforderung, Forschungs- und Entwicklungsprojekte durch Kooperationen finanzieren zu müssen, da die Investitionen in F&E vergleichsweise gering ausfallen. Laut Expertenaussagen investieren weniger Unternehmen in F&E-Aktivitäten. Norwegen belegt im Bereich Forschungs- und Entwicklungsaktivität den letzten Platz unter den Leitländern.

#### Innovationsnetzwerke

Deutschland belegt im Vergleich mit den Leitländern im Fokusthemenfeld „Innovationsnetzwerk“ den zweiten Platz nach den USA. In Deutschland gibt es bereits verschiedene Innovationsnetzwerke, die auch

»Deutschland ist ein herausragender Forschungsstandort mit zahlreichen Vorteilen. Trotz möglicher Kritik und Vergleichen mit anderen Ländern ist die Forschung hier grundlegend sehr erfolgreich, unabhängig vom Fachgebiet.«

Cornelius Lahme, Bluisseafood

durch spezielle Förderprogramme finanziell unterstützt werden. Laut Experten bieten Innovationsnetzwerke politischen Entscheidungsträgern die Möglichkeit, Meinungen zu sammeln und zu vereinheitlichen. Sie dienen als Plattform, auf der Kompetenzen gebündelt werden, was die Kommunikation zwischen der politischen Seite und der Industrie erleichtert. Von lokalen Gemeinschaften bis hin zu europäischen Lobbygruppen existieren verschiedene Netzwerke in unterschiedlichem Maße. Dennoch wird angemerkt, dass die Entwicklung solcher Netzwerke eher langsam voranschreitet. Ähnlich wie in Deutschland sind

»Concerns arise about the limited scope of innovation, hindering the development of a robust business sector. The worry stems from a lack of diverse knowledge, ideas, and skilled individuals. To establish a thriving industry, a network of companies and operators is essential, fostering a world-class foundation for sustained success.«

Sari Tasa, Econo<sup>21</sup>

auch in Finnland die Netzwerke vielfältig und umfassen nicht nur nationale, sondern auch internationale Verbindungen. Auf nationaler Ebene arbeiten Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Industrieverbände in Interessengruppen zusammen, um die Einflussnahme auf politische Entscheidungsträger zu stärken. Auf internationaler Ebene gibt es enge Verbindungen zu europäischen Forschungsuniversitäten, insbesondere im Bereich der Forstwirtschaft. Besonders in Finnland wird die Bündelung von Ressourcen und die Zusammenarbeit auf nationaler und internationaler Ebene als entscheidend für den Erfolg in der Bioökonomie und anderen technologischen Bereichen angesehen. Im Vergleich zu Deutschland und Finnland wird im Vereinigten Königreich und Irland der Austausch mit der Politik noch als Herausforderung wahrgenommen. Obwohl die Kontakte zu politischen Entscheidungsträgern vorhanden sind, fehlt es noch an einer kontinuierlichen Zusammenarbeit, wodurch Veränderungen langsamer vorangetrieben werden können. Das ist u. a. ein Grund, warum UK/IE in der Bewertung den vorletzten Platz belegen. Auch Norwegen ist beim Ausbau von Innovationnetzwer-

ken noch am Anfang. Laut Experten legt das Land nun verstärkt Wert auf internationale Zusammenarbeit und betont dies durch Bonusanreize für Forschende, die mit internationalen Partnern zusammenarbeiten und bei Veröffentlichungen internationale Koautoren haben.

Die Struktur der Netzwerke in Deutschland variiert. Sie können von Universitäten initiiert werden, sich um spezielle Förderprojekte gruppieren oder aus nationalen Finanzierungsprojekten hervorgehen. In Bezug auf die politische Seite wird angemerkt, dass in Deutschland eine Kultur des Austauschs zwischen Wissenschaft und Industrie besteht. Es gibt regelmäßige Treffen und Dialoge, die einen fruchtbaren Austausch von Konzepten und Ideen ermöglichen. Dennoch weisen Experten auf Herausforderungen hin, die insbesondere im Vergleich zu

anderen Ländern wie China oder den USA, die Frage aufwerfen, ob eine stärkere europäische Zusammenarbeit notwendig wäre, um global wettbewerbsfähig zu bleiben. In den USA erstreckt sich die Vernetzung über verschiedene Disziplinen, wobei bspw. die American Chemical Society eine plattformübergreifende Zusammenarbeit zwischen Fachleuten der organischen Chemie, der theoretischen Chemie und der Biotechnologie fördert. Es wird beschrieben, dass solche Kooperationen eher informell und flexibel sind, wobei die Beteiligung von Experten aus unterschiedlichen Bereichen zu einem breiterem Verständnis und einem interdisziplinären Ansatz führt. Ein weiterer zentraler Aspekt in den USA ist der Austausch von Forschenden und Talenten zwischen verschiedenen Ländern, insbesondere mit Europa. Hierbei spielen nicht nur Studierende, sondern auch Forschungslabore eine wichtige Rolle, die in den USA mit Laboren in Europa zusammenarbeiten. Diese Zusammenarbeit wird als flexibel und kooperativ beschrieben, und es entstehen oft länderübergreifende Labor Kooperationen.

## (Biointelligente) Technologien

Deutschland liegt im Fokusthemenfeld „Biointelligente Technologien“ im Mittelfeld auf Rang fünf. Spitzenreiter ist UK/IE vor den USA, Kanada und Australien. Am schwächsten schneiden China und Norwegen ab. Die Ergebnisse dieses Fokusthemenfelds korrelieren stark mit den Ergebnissen der Analyse der biointelligenten Technologien, Produkte und Dienstleistungen im Rahmen der 17 BTF. Die führenden Länder, in denen bereits ein Portfolio verschiedener Technologien, Produkte und Dienstleistungen identifiziert wurde, treten hier stärker hervor.

Das Technologieportfolio Australiens, des Vereinigten Königreichs und Irland, Kanadas und der USA zeichnet sich insbesondere durch einen sehr hohen TRL und einer hohen Biointelligenzskala aus. Während im australischen, kanadischen und britischen Technolo-

---

»Bio digital technologies are incredibly adaptable. There isn't one specific sector that gains the most from them.«

---

Marcus Ballinger, Canada Horizons GC<sup>22</sup>

gieportfolio 7, 8 bzw. 9 BTF vertreten sind, werden in den USA 15 von 17 BTF abgedeckt. Die deutschen biointelligenten Technologien, Produkte und Dienstleistungen zeichnen sich durch einen hohen TRL und einen fortgeschrittenen Wert auf der Biointelligenzskala aus, wobei im internationalen Vergleich noch deutliches Verbesserungspotenzial besteht. Hinsichtlich der Breite des Technologieportfolios liegt Deutschland mit den USA gleichauf.

Die Gründe für die Position Deutschlands sind vielschichtig. Die hohen TRL in Australien und UK/IE wurden von Experten mit der Weiterentwicklung bestehender, bewährter Technologien aus den Disziplinen der Biotechnologie erklärt, z. B. durch die

Integration von Informationssystemen zur Automatisierung in den Produktionsprozess, flankiert von neu entwickelten biointelligenten Technologien und Produkten aus aufstrebenden Startups. Ähnliches ist ebenso in Deutschland zu beobachten, wobei es sich technologisch häufig nicht um komplette Neuentwicklungen handelt, sondern um die Weiterentwicklung bestehender Technologien durch inkrementelle Verbesserungen. Zwar gibt es auch Neuentwicklungen, diese befinden sich aber meist noch im Labormaßstab. Das breite Technologieportfolio der USA besteht ebenfalls aus bewährten Technologien aus der Biotechnologie, die durch neue Technologien mit niedrigem TRL ergänzt werden. Positiv hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang Schweden, das bereits über mehrere Unternehmen verfügt, die Technologien aus dem Konvergenzbereich entwickeln. Durch die Fokussierung auf ausgewählte BTF

kann in der Regel eine derzeit höhere TRL erreicht werden. Schweden zeichnet sich bei der Entwicklung biointelligenter Technologien durch eine starke, auch nicht-finanzielle Unterstützung des Technologietransfers von der Forschung in die Anwendung aus. Ähnliches gilt für Australien mit der National Collaborative Research Infrastructure Strategie (NCRIS), die Bereiche einer biointelligenten Wertschöpfung unterstützt. Auch in UK/IE gibt es Förderprogramme, die den Technologietransfer im Bereich

der biointelligenten Wertschöpfung unterstützen, allerdings nur in begrenztem Umfang.

Neben der TRL und der Biointelligenzskala sowie der Breite des Technologieportfolios können die Länder auch nach der Produktionsnähe der eingesetzten Technologien und Produkte bewertet werden. Die Fokussierung auf produktionsnahe Anwendungen ist in Deutschland vorhanden. Australien zeigt eine ausgeprägte Produktionsnähe mit einem Schwerpunkt auf Produktionstechnologien und produktionsunterstützenden Technologien. Dies gilt auch für die USA und UK/IE. Letztere weisen eine ausgewogene Verteilung zwischen produktionsnahen und dienstleistungsorientierten Anwendungen auf.

Alle Experten sind sich einig, dass biointelligente Wertschöpfung einen positiven Beitrag zur Nachhaltigkeit leisten kann, sowohl in ökologischer als auch in ökonomischer Hinsicht. Besonders die deutschen Experten sehen ein großes Potenzial, die Wertschöpfung in Deutschland nachhaltig zu verändern und merken vielfältige Anwendungsmöglichkeiten für biointelligente Technologien, Produkte und Dienstleistungen in unterschiedlichen Bereichen an. Auch in UK/IE ist die Einstellung positiv, insbesondere im Hinblick auf die Substitution energie- und abfallintensiver Prozesse und solcher, die derzeit fossile Rohstoffe nutzen. Ein gemischtes Stimmungsbild zeigen die kanadischen, US-amerikanischen und australischen Experten. Zwar wird ein größerer ökologischer Mehrwert gesehen, dieser ist aber derzeit noch mit hohen Kosten oder produktionstechnischen Schwierigkeiten verbunden.

## Unternehmertum

Im Fokusthemenfeld „Unternehmertum“ liegen die USA, Schweden und die Niederlande auf den Plätzen eins bis drei, während Israel und Deutschland im Mittelfeld positioniert sind. Ein Großteil der Akteure im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung sind KMUs. Dies deutet auf ein umfangreiches und vielfältiges Ökosystem hin, das Innovation und Wachstum fördert. Deutschland, das sich im Mittelfeld befindet, zeigt eine ausgewogene Struktur zwischen Kleinst-, Klein-, mittelgroßen und Großunternehmen. Diese Diversifikation spricht für ein robustes und flexibles Ökosystem. Die Experten betonen, dass Israel, ebenfalls im Mittelfeld, sich durch einen hohen Anteil an Kleinst- und Kleinunternehmen auszeichnet. Diese Struktur unterstreicht die Bedeutung von KMU als Innovationsmotor.

Israel, oft als Startup-Nation bezeichnet, ragt mit einer beeindruckenden Startup-Quote von 30 % heraus, was deutlich über

dem internationalen Durchschnitt liegt. Deutschland folgt mit einer Quote von 19 %, was die starke Position beider Länder im Bereich innovativer Unternehmensgründungen innerhalb der biointelligenten Wertschöpfung unterstreicht. Diese Zahlen reflektieren eine lebendige Startup-Kultur und eine unterstützende Umgebung für neue Unternehmen in diesen Ländern. In Finnland profitieren Startups von der staatlichen Förderung durch Institute, die gezielt in Spin-offs und neue Technologien investieren, was eine stabile Unterstützung bietet, wie die Experten betonen. Dies bietet den Vorteil einer stabilen und gezielten Förderung. Im Gegensatz dazu sehen sich Startups in den USA, trotz der hohen Verfügbarkeit von 60 % des weltweiten Risikokapitals, mit niedrigen Gründungsraten konfrontiert. Eine Startup-Quote von nur 6 % im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung spiegelt hohe Markteintrittsbarrieren wider, bedingt durch den Bedarf an Ressourcen, was vor allem größeren, etablierten Unternehmen zugutekommt und für neugegründete Startups eine signifikante Herausforderung darstellt. Laut Experten können diese Rahmenbedingungen dazu führen, dass in den USA, trotz des reichlichen

---

»To truly thrive, especially in digital fields, a more international and collaborative model might be needed, acknowledging the necessity of global expertise in certain industries like video games. Existing funding structures and science park strategies may need reevaluation to facilitate a more flexible and globally oriented approach.«

---

Johan Kask, CREDS<sup>23</sup>

Kapitals, die effektive Umsetzung von Innovationen im Startup-Sektor erschwert wird. Es gilt zu jedoch zu berücksichtigen, dass viele Startups bereits in Frühphasen durch Großunternehmen aufgekauft werden. Beide Länder zeigen somit, dass sowohl staatliche Förderung als auch private Kapitalverfügbarkeit ihre spezifischen Herausforderungen in der Unterstützung von Startups mit sich bringen. In China ist das Umfeld besonders für lokale Startups attraktiv. Hier gibt es große Ballungsräume wie Shanghai und Peking, die eine hohe Dichte potenzieller Kunden bieten, was die Skalierung von Geschäftsmodellen in einer Stadt erleichtert. Dieser Vorteil wird durch einen extrem wettbewerbsintensiven Markt mit einer hohen Dichte an Konkurrenzunternehmen gemildert, wie von den Experten analysiert. Kanada hingegen bietet ein unterstützendes Umfeld für Startups, geprägt durch vorteilhafte Steuergesetzgebung für forschungsintensive Unternehmen, starke staatliche Förderprogramme für Forschung und Entwicklung als auch einer lebhaften Angel-Investoren-Szene.

Im Vergleich der Wachstumsgeschwindigkeit innovativer Startups in Israel, Deutschland und den USA werden deutliche Unterschiede sichtbar. Israel zeichnet sich durch eine beeindruckende Wachstumsrate aus. 67% der Startups wachsen in den ersten fünf Jahren über den Status eines Kleinunternehmens hinaus. Die Experten aus dem Private-Equity-Bereich weisen diesbezüglich darauf hin, dass die Notwendigkeit einer globalen Ausrichtung aufgrund des kleinen heimischen Marktes ein wesentlicher Treiber für dieses schnelle Wachstum ist. In Deutschland hingegen wachsen etwa 36% der Startups in den ersten fünf Jahren über die Klasse der Kleinunternehmen hinaus, was ein moderateres Wachstum im Vergleich zu Israel zeigt. Dies könnte teilweise an dem umliegenden europäischen Markt und den damit verbundenen regulatorischen und bürokratischen Hürden liegen, so die Experten. Wie von Experten angemerkt, tendieren deutsche Startups dazu, Märkte mit etablierten Zulassungsprozessen wie Singapur, den USA oder Israel zu wählen, um den Markteintritt zu vereinfachen.

### Geschäftsmodelle

Im länderspezifischen Vergleich zeichnen sich die USA, Finnland und China im Fokusthemenfeld „Ge-

schäftsmodelle“ durch ihre führenden Positionen aus, während Deutschland und UK/IE eine mittlere Position einnehmen.

In der Gesundheitsbranche sind innovative Geschäftsmodelle, die neue Technologien und Nachhaltigkeitsansprüche miteinander verbinden, von zentraler Bedeutung. Laut den Experten gibt es in Kanada ein Modell, bei dem Startups oft an größere US-Unternehmen verkauft werden. Eine Praxis, die Kapital und Fachwissen generiert, aber auch kritische Stimmen aufgrund des Brain-Drains hervorruft. Laut den Experten ist in den USA schließlich das Geschäftsmodell im Gesundheitsbereich durch eine effiziente Arbeitsteilung zwischen kleinen, innovativen Unternehmen und großen Firmen, die sich auf klinische Entwicklung und Vermarktung spezialisieren, gekennzeichnet. In den USA ist eine Tendenz zur experimentellen Entwicklung von Geschäftsmodellen zu beobachten. Amerikanische Unternehmen erkunden neue Ertragsmodelle, wobei der Fokus nicht ausschließlich auf den Kosten, sondern vielmehr auf dem Wert der Produkte oder Dienstleistungen für die Kunden liegt. Die Experten betonen, dass bspw. im Gesundheitssektor die Herausforderung darin besteht, den Wert hochspezialisierter, individueller Lösungen zu erfassen und zu bepreisen. Das Marktpotenzial in verschiedenen Ländern variiert erheblich, was sich in einer Vielzahl von Strategien und Herausforderungen niederschlägt. Die USA zeichnen sich durch eine dominante Position im globalen Markt aus. Dabei spielen die hohen Preise im Pharmasektor eine entscheidende Rolle für den globalen Umsatz der Branche. Zwischen 40 und 70% der globalen Einnahmen eines neu eingeführten Arzneimittels stammen aus den USA, wodurch sich das Land als dominante Kraft im globalen Pharmamarkt etabliert hat.

In Deutschland wird die starke Exportorientierung mit globaler Reichweite mit dem Schwerpunkt auf Technologie und Nachhaltigkeit kombiniert, um somit langfristiges Wachstum zu sichern. Die mögliche Entwicklung von Krankenhäusern zu Produzenten personalisierter und/oder zellbasierter Medizin in Ländern wie den USA und Deutschland könnte bspw. neue Märkte für den Maschinen- und Anlagenbau eröffnen, bedient durch Geschäftsmodelle wie „The-

rapy-as-a-Service“. Laut den Experten ermöglichen diese Modelle es, Herausforderungen wie Entwicklungsdauer und Markteinstiegsrisiken zu bewältigen, während sie gleichzeitig die Erschließung neuer Umsatzpotenziale und eine kostensparende Nutzung von Ressourcen fördern.

In der Lebensmittelbranche reflektieren innovative Geschäftsmodelle die zunehmende Bedeutung einer biointelligenten Wertschöpfung durch technologische

Kundenbindung fördern, sowie Pay-per-Use-Modelle für PlantCubes, die den Kunden eine flexible und bedarfsorientierte Nutzung ermöglichen.

Von den Experten aus israelischen Unternehmen wird die Bedeutung des direkten Kundenkontakts betont, insbesondere in einer frühen Phase der Zusammenarbeit mit Kunden. Dies ermöglicht es ansässigen Unternehmen, flexibel auf die Bedürfnisse der Kunden zu reagieren. Von kanadischen Unternehmern wird darauf

hingewiesen, dass der Schwerpunkt auf direktem Marketing liegt, um Erstanwender und Technologie-Enthusiasten gezielt anzusprechen. Dieser ganzheitliche Ansatz, der technologische Innovationen mit kundenorientierten Geschäftsmodellen verbindet, illustriert, wie Unternehmen in den Leitländern in der Lebensmittelbranche auf die Herausforderungen und Chancen der biointelligenten Wertschöpfung reagieren, um langfristigen wirtschaftlichen Erfolg und Kundenzufriedenheit zu gewährleisten.

Sowohl Schweden als auch Deutschland setzen auf eine Strategie der Marktgestaltung durch vorausschauende Investitionen. Schwedische Unternehmen neigen dazu, nicht nur auf bestehende Markttrends zu reagieren, sondern aktiv Märkte zu kreieren, indem sie Trends wie KI-basierte, personalisierte Ernährungsberatung und

personalisierte Medizin antizipieren und daraufhin agieren. Diese proaktive Herangehensweise deutscher Unternehmen ermöglicht es ihnen, Werte zu schaffen, indem sie vor der Trendkurve agieren. Das israelische Unternehmertum ist geprägt von der Erkenntnis, dass ohne eine proaktive Einstellung kaum Fortschritte im Geschäft erzielt werden können. Die israelische Innovationslandschaft ist daher durch ein hohes Maß an Eigeninitiative und das Bestreben gekennzeichnet, den Markt aktiv zu formen und nicht nur auf bestehende Bedingungen zu reagieren. Finnland und China demonstrieren ihre Stärken durch eine Kombination aus technologischer Innovation und einer aggressiven

»Companies face challenges evolving business models, especially when protecting existing operations is a concern. Recognizing the need to pivot and reorganize is vital. This entails more than changing pricing; it involves transforming work processes, organizational structures, and identifying valuable capabilities.«

Tom Brennan, McKinsey <sup>24</sup>

Ansätze zur dezentralen und bedarfsgerechten Herstellung von personalisierten Lebensmitteln, bspw. durch 3D-Footprint-Verfahren. Diese Technologieansätze ermöglichen es Unternehmen, ihr Wertangebot durch die Vermarktung von personalisierten und nachhaltigen Lebensmittellösungen zu stärken. Laut den Experten wird dies in Deutschland durch eine Kombination aus Flexibilität in Vermarktungskonzepten und Innovationskraft hervorgehoben. Die Experten betonen, dass Unternehmen in der Lebensmittelindustrie innovative Ertragsmodelle nutzen, wie z.B. Abonnementdienste für personalisierte Ernährungspläne, die regelmäßige Einnahmen und

globalen Expansionsstrategie, was sie zu wichtigen Akteuren in ihren jeweiligen Branchen macht. Finnische Unternehmen betonen ihre globale Präsenz und ihre Bereitschaft, in verschiedene Märkte weltweit einzusteigen. Darüber hinaus zeigen sie ein Interesse an nachhaltigen Lösungen und haben erkannt, dass einige Kunden bereit sind, ein Preispremium für ökologische und langlebige Produkte zu zahlen. China zeigt oft eine hohe Risikobereitschaft und eine zunächst weniger restriktive regulatorische Haltung, was die schnelle Entwicklung und Umsetzung von Innovationen in Schlüsseltechnologiebereichen begünstigt. Jedoch ist diese Situation dynamisch und es gibt eine zunehmende Tendenz zu strengeren Regulierungen in verschiedenen Sektoren, was die Geschäfts- und Innovationsumgebung beeinflusst.

#### Struktur der Wertschöpfungsnetzwerke

Die Analyse des Fokusthemenfelds „Struktur der Wertschöpfungsnetzwerke“ zeigt, dass Deutschland zwar hinter Finnland liegt, jedoch alle weiteren Leitländer in diesem Zusammenhang deutlich zurückfallen. Während in Deutschland die strukturelle Ausgestaltung biointelligenter Wertschöpfungsnetzwerke noch kontrovers diskutiert wird, forciert Finnland bereits aktiv die Etablierung dezentraler regionaler Produktionscluster als Grundlage einer biointelligenten Wertschöpfung. Im Mittelfeld dieses Fokusthemenfelds liegen die USA und Kanada, die Schlusslichter bilden Australien, die Niederlande und Norwegen.

Biointelligente Wertschöpfungsnetzwerke werden in Deutschland derzeit mit Eigenschaften wie Resilienz, Dezentralität und regionalen Vorteilen in Verbindung gebracht. Die aktuelle Diskussion konzentriert sich in erster Linie auf theoretisch erarbeitete Ausprägungsformen, während die konkrete Umsetzung durch Leuchttürme noch wenig Beachtung findet. Mit Blick auf die konkrete Ausgestaltung der Wertschöpfungsnetzwerke wird die Heterogenität in Deutschland von den Experten betont, insbesondere im Maschinen- und Anlagenbau. Als Beispiel wurde genannt, dass einzelne Unternehmen, die früher reine Che-

mieproduzenten waren, heute zu den größten Waldbesitzern Europas zählen. Hintergrund ist der steigende Bedarf an biologischen Ausgangsstoffen in der Produktion des Unternehmens. Diese Veränderungen führen zu einem veränderten Bedarf an biologischen Rohstoffen und einer angepassten Flächennutzung. Biointelligente Wertschöpfungsnetzwerke werden von den deutschen Experten als Ersatz oder Ergänzung bestehender Wertschöpfungsketten gesehen. Die Experten weisen darauf hin, dass bei einer vollständigen Substitution bestehender Wertschöpfungsketten biointelligente Systeme nicht zwingend autonom agieren, sondern sich auch in bestehende Strukturen integrieren können. Offen bleibt laut Experten die Frage, ob eine Regionalität in diesem Kontext zwangsläufig bedeutet, dass Regionen aufeinander angewiesen sind, oder ob eine gewisse Autarkie in regionalen Zentren möglich ist.

In Finnland werden biointelligente Wertschöpfungsnetzwerke vor allem mit Dezentralität durch vernetzte Produktionssysteme in kleinen Einheiten und im Zusammenhang mit der Etablierung einer kreislauffähigen Wertschöpfung in Verbindung gebracht. Es zeichnet sich eine Verschiebung hin zu einer ganzheitlichen Sichtweise ab, bei der Aspekte der Kreislaufwirtschaft und der ökologischen Nachhaltigkeit eine entscheidende Rolle spielen. Expertenaussagen unterstreichen, dass es ein hohes Potenzial für Veränderungen in den Wertschöpfungsnetzwerken gibt. Finnland bemüht sich aktiv um den Aufbau neuer Wertschöpfungsnetzwerke, indem Kompetenzen entlang der Wertschöpfungskette gebündelt und Aspekte der Kreislaufwirtschaft berücksichtigt werden. Die aktuelle Situation in glo-

»When discussing changes in production methods, emphasizing also smaller decentralized units and circularity is crucial. The impact on specific value chains can be significant.«

Jussi Jääntti, VTT<sup>25</sup>

bal vernetzten Wertschöpfungsketten, die durch Schockereignisse wie Kriege oder Lieferengpässe geprägt ist, wird von den Experten in Finnland als Herausforderung gesehen, welcher mit biointelligenten Ansätzen begegnet werden und die Versorgungssicherheit des Landes stärken kann. Ein vollständiger Verzicht auf globale Lieferketten wird jedoch von den Experten nicht für möglich gehalten.

Eine vielschichtige Entwicklung biointelligenter Wertschöpfungsnetzwerke erfolgt derzeit in den USA, insbesondere im Hinblick auf die Frage der Dezentralität. Nach Experteneinschätzung ist es denkbar, dass biointelligente Wertschöpfungsnetzwerke in Zukunft sowohl dezentralisiert als auch zentralisiert ausgestaltet werden. Das Thema Resilienz steht auch in den USA im Vordergrund. In Kanada wird der Ansatz der biointelligenten Wertschöpfungsnetzwerke vor allem mit Dezentralität und Resilienz in Verbindung gebracht. Dabei steht insbesondere die Balance zwischen Globalisierung, internationaler Kooperation und der Stärkung der eigenen Resilienz im Vordergrund. Den Aussagen der Experten zufolge lassen sich zwei Szenarien unterscheiden. Einerseits könnte Kanada vollständig resilient werden und eine eigene biointelligente Wertschöpfungskette von der Datengenerierung bis zur Infrastruktur entwickeln. Zum anderen könnten lokale Zentren aufgrund der Größe des Landes eine entscheidende Rolle spielen. Die Umsetzung in lokalen Zentren wird durch die große Ausdehnung Kanadas begünstigt. Derzeit starke Wertschöpfungsnetzwerke erstrecken sich allerdings von Norden nach Süden, um die Nähe zu den USA zu nutzen. Ähnlich wie in Deutschland und Finnland wird von den Experten betont, dass die lokale Produktion durchaus ihren Platz hat, aber auf globalisierte Wertschöpfungsketten nicht gänzlich verzichtet werden kann.

Die Erschließung neuer Märkte und Kundengruppen im Kontext biointelligenter Wertschöpfungsnetzwerke wird durch die Experten für denkbar gehalten. In welchem Umfang dies möglich ist, konnte von den befrag-

»Die jetzt schon bestehenden guten Ansätze müssen kondensiert werden, um wirkliche Leuchtturmprojekte zu schaffen und disruptive Anwendungen aufzuzeigen. [...]. Dann wird der Zeitpunkt kommen, um Biointelligenz in die Breite zu bringen.«

Simon Harst, Fraunhofer IWU

ten Experten nicht abschließend beantwortet werden. Unternehmen der produzierenden Industrie hierzulande zeigen ein grundsätzliches Interesse, das Thema voranzutreiben. Dabei liegt der Fokus derzeit auf der Suche nach Kooperationen zur Entwicklung von Proofs of Concepts und zur Prozessoptimierung. In Finnland betonen die Experten, dass neue Kundengruppen vor allem durch den Nachhaltigkeitsgedanken gewonnen werden. Es wurden bereits Beispiele für Kundengruppen identifiziert, die bereit sind, mehr zu bezahlen, wenn Produkte umweltfreundlich, langlebig oder reparierbar sind. Es wird betont, dass ein für wahrscheinlich erachtetes Anwachsen dieser Gruppe an Konsumenten der wesentlichen Treiber einer Transformation in eine biointelligente Wertschöpfung sein kann.

Trotz der diskutierten Potenziale einer biointelligenten Wertschöpfung weisen die Experten auf eine Reihe von Umsetzungshemmnissen hin, die sowohl technische als auch gesellschaftliche Fragen betreffen. Dabei wird die Akzeptanz der Unternehmen, sich auf neue Wertschöpfungsstrukturen einzulassen, als deutlich herausfordernder eingeschätzt als die technische Umsetzbarkeit der Biointelligenz, z. B. in Form von Nicht-Experten-Systemen. In Deutschland identifizieren Experten in diesem Kontext insbesondere Themen wie gesellschaftliche Akzeptanz, Mitarbeiterkompetenzen und Komplexität der Wertschöpfungsnetzwerke als wesentliche Herausforderungen. Es wird betont, dass

eine verstärkte Kommunikation und Präsenz notwendig ist, um die Vorteile dieser Systeme aufzuzeigen. Zwar werden keine unmittelbaren Grenzen in Bezug auf die produktionstechnische Umsetzung gesehen, jedoch darauf hingewiesen, dass mögliche Hindernisse überwunden werden könnten, solange der Nutzen klar aufgezeigt wird. Die Experten heben hervor, dass es dringend notwendig ist, Leuchtturmprojekte zu schaffen, um den konkreten Mehrwert aufzuzeigen und die Bewegung zu beschleunigen.

Zur Umsetzung und Etablierung biointelligenter Wertschöpfungsstrukturen wird von den Experten aus unterschiedlichen Ländern vermehrt auf Kollaborationen und selektive Entwicklungsgemeinschaften im Rahmen eines erweiterten Open-Innovation-Ansatzes verwiesen. Wichtig dabei ist die Realisierung eines hohen Kollaborationsgrads sowohl in der Wertschöpfung als auch in der Forschung. Ein Beispiel für eine solche Zusammenarbeit ist das finnische Bio Power Labs, ein Ökosystem rund um die synthetische Biologie, das versucht, verschiedene Teile der Wertschöpfungskette zu integrieren. Die interviewten Experten weisen drauf hin, dass in den USA Kooperationen im Bereich der biointelligenten Wertschöpfungssysteme vergleichsweise selten sind, aber als äußerst wichtig angesehen werden.

Unternehmen in Deutschland erkennen zwar das Potenzial der biointelligenten Wertschöpfung, schrecken aufgrund der unzureichenden politischen Unterstützung häufig von einer First-Mover-Rolle zurück.

### Marktpotenzial der Technologien

Bei der Bewertung des Fokusthemensfelds „Marktpotenzial der Technologien“ liegen die USA deutlich vor UK/IE. Deutschland liegt gleich auf mit UK/IE auf Platz drei. Finnland, China und Norwegen finden sich am Ende des Leitländervergleichs. Die Ergebnisse hängen stark mit den Ergebnissen des Fokusthemensfelds „Biointelligente Technologien“ sowie der Detailausführungen im Kapitel zur Marktvolumenanalyse zusammen, d. h., je mehr biointelligente Technologien, Produkte und Dienstleistungen in verschiedenen Marktsegmenten identifiziert wurden, desto besser fällt die Bewertung in diesem Themensfeld aus. Entsprechend fallen Leitländer wie China und Norwegen zurück.

Aufgrund der hohen Anzahl an identifizierten biointelligenten Technologien, Produkten und Dienstleistungen in den USA und deren breitem Anwendungsspektrum, ist es wahrscheinlich, dass amerikanische Unternehmen am stärksten von den prognostizierten Marktvolumina profitieren. Dies bestätigen auch die Experten und zeigen auf, dass insbesondere Themenfelder wie personalisierte Medizin und Zelltherapien, Bioprinting, CRISPR-Technologien und Tissue Engineering zukünftig stark wachsen werden.

Aufgrund der vergleichsweise geringeren Anzahl an biointelligenten Technologien und Produkten und der damit verbundenen schwächeren Adressierung verschiedener Marktsegmente liegt Deutschland hier deutlich hinter den USA. Ähnliches gilt für UK/IE. Besonders in Deutschland wird das Potenzial für biointelligente Technologien, Produkte und Dienstleistungen in der Zukunft dennoch als hoch eingeschätzt, u. a. bedingt durch eine tendenziell technologieaffine Gesellschaft.

Die Experten aus dem Vereinigten Königreich und Irland hingegen vermuten, dass die dort ansässigen Unternehmen und Forschungsinstitute insbesondere bei der Optimierung von Enzymen für die Herstellung von Arzneimitteln, Lebens- und Futtermitteln, Konsumgütern und Kraftstoffen sowie die Optimierung von industriellen Mikroben für die Produktion von Enzymen, kleinen Molekülen wie Primär- und Sekundärmetaboliten und personalisierter Medizin wachsen werden.

Generell wird von einem Großteil der Experten angemerkt, dass eine Beteiligung an sich etablierenden und wachsenden Märkten für Unternehmen nur dann sinnvoll ist, wenn die entwickelten und am Markt angebotenen Technologien die Wirtschaftlichkeit der Produktion positiv verändern. Darüber hinaus ist die Anwendung der Technologien in der Produktion derzeit ein wichtiges Anliegen, wird aber aufgrund von fehlender Vernetzung zwischen den Anbietern der einzelnen Komponenten derzeit nur in begrenztem Umfang genutzt. Einhellig schreiben die Experten der biointelligenten Wertschöpfung in allen Ländern ein großes ökonomisches Potenzial zu. Als Zeithorizont wird hier meist auf 2030 bis 2040 verwiesen.

»We explored the potential of bio-convergence [...]. Our focus is on multidisciplinary approaches, including biology, without targeting a specific market. The vast potential we observed extends to areas such as climate, food, technology, agritech, energy and more.«

Zachi Schnarch, IIA<sup>26</sup>

### Ethische Erwägungen und Akzeptanz in der Gesellschaft

Deutschland liegt im Fokusthemensfeld „Ethische Erwägungen und Akzeptanz in der Gesellschaft“ im oberen Mittelfeld der Leitländer. In Deutschland stoßen Technologien der biointelligenten Wertschöpfung bislang auf eine breite gesellschaftliche Akzeptanz, sofern diese als sinnvoll angesehen werden. In diesem Zusammenhang betonen die Experten die derzeit als hoch eingeschätzte Sinnhaftigkeit der biointelligenten Wertschöpfung. In einigen Bereichen wie der Gentechnik und der Freisetzung gentechnisch veränderter Organismen wird die deutsche Gesellschaft teilweise noch als zögerlich gegenüber Veränderungen beschrieben. Laut Experten war die niederländische Gesellschaft vor einigen Jahren eher skeptisch gegenüber lebenden Zellsystemen, heute scheint sie sich diesem Fortschritt geöffnet zu haben. Im Vergleich zu Deutschland wird betont, dass es in der Natur der niederländischen Bevölkerung und Kultur liegt, Herausforderungen effizient und ohne übermäßige Komplikationen zu bewältigen. Auch in China ist die Gesellschaft eher positiv gegenüber neuen Technologien eingestellt, wobei der Patriotismus in China eine bedeutende Rolle bei der gesellschaftlichen Akzeptanz spielt. Die Bevölkerung unterstützt Innovationen, die das Land voranbringen. Lokale Produkte werden aus

patriotischen Gründen bevorzugt. Finnland hebt sich nach Expertenmeinungen durch eine schnelle Anpassungsfähigkeit der Bevölkerung an neue Technologien hervor sowie durch eine gewisse Neugierde, die die Akzeptanz von Innovationen fördert. Als Grund dafür wurde u. a. der eingeschränkte Zugang zu natürlichen Ressourcen des Landes genannt, wodurch eine Fokussierung auf Technologien und technische Lösungen erforderlich ist. Dennoch ist die Gesellschaft positiv gegenüber biointelligenter Technologie, entsprechenden Produkten und Dienstleistungen eingestellt, solange ein klarer Nutzen erkennbar ist.

In Deutschland ist der Begriff der Biointelligenz derzeit in der Politik als auch

in der Gesellschaft, im Vergleich zur Biotechnologie eindeutig positiv konnotiert. Experten heben dennoch hervor, dass der derzeitige regulatorische Rahmen Innovationen oftmals behindert. Im Vergleich zu Ländern wie Südkorea, Singapur oder China, wird Deutschland als weniger technologieoffen wahrgenommen. In China bspw. erfolgt die Unterstützung häufig top-down, wobei die Regierung Schlüsseltechnologien fördert. Dies ermöglicht laut Experten eine schnelle Umsetzung, wodurch China im Bereich Hightech und Innovation bereits bemerkenswerte Fortschritte erzielt hat. In Schweden und Norwegen existieren auf politischer und gesellschaftlicher Ebene gewisse Widerstände. Besonders im Agrarsektor beider Länder gibt es politischen Widerstand gegen Technologien, die als Bedrohung für traditionelle Arbeitsbereiche wie die Landwirtschaft wahrgenommen werden. Es herrscht die Ansicht, dass natürliche Lebensmittel gesünder seien, und es gibt Widerstand gegen sogenannte lab-grown-Lebensmittel. Als möglicher Grund werden starke Interessensgruppen wie Bauern- und Fischereiverbände genannt.

Für Deutschland stellen die Experten fest, dass Entscheidungen über neue Technologien häufig eher ideologisch motivierten Ansätzen folgen als wissenschaftsbasierten Zielen und Wegen, wodurch rational begründete Entscheidungen in den Hintergrund ge-

drängt werden. Darüber hinaus weisen die Experten darauf hin, dass viele Menschen in Deutschland oftmals nicht ausreichend informiert sind und sich an vermeintlich negativen Schlagzeilen in den Medien orientieren. Dies kann zu Konflikten und Vorurteilen gegenüber neuen Technologien führen. Den Medien kommt daher aus Sicht der Experten eine entscheidende Rolle zu, um die Bevölkerung richtig zu informieren und Fehlinformationen entgegenzuwirken. Die Niederlande versuchen über Finanzierungssysteme wie die Netherlands Organization for Scientific Research (NWO) Forschungsergebnisse öffentlich zugänglich zu machen. Die Experten betonen jedoch, dass die tatsächliche gesellschaftliche Akzeptanz nicht nur von den Anstrengungen der Wissenschaft, sondern auch von der Bereitschaft der Gesellschaft abhängt, diese Entwicklungen zu akzeptieren und sich dafür zu interessieren. In Finnland werden in Branchen wie der Lebensmittelproduktion neben technologischen As-

pekten auch kulturelle Traditionen und Kostenaspekte berücksichtigt. Die Marktdynamik und die Bedürfnisse der Verbraucher spielen eine entscheidende Rolle bei der Einführung intelligenter Produktionstechnologien. So basieren die Diskussionen über neue Technologien oft auf Werten und Präferenzen. Bei der Nutzung von Technologien im Bereich der Forstwirtschaft bspw. gibt es immer verschiedene Alternativen, die unterschiedlichen Interessen gerecht werden.

Für Deutschland wird darauf hingewiesen, dass die breite Bevölkerung eher wenig über wissenschaftliche Entwicklungen z. B. im Bereich der Biotechnologie informiert ist. In Finnland findet die Integration von Themen wie der Bioökonomie bereits in den Schulbüchern und Bildungsveranstaltungen statt. Der Fokus auf Schulbildung und die Integration von Innovationsthemen in den Lehrplan weisen laut Experten darauf hin, dass Finnland darauf abzielt, die nächste Generation früh-

zeitig für technologische Entwicklungen zu sensibilisieren. Veranstaltungen und Gespräche von Vertretern innovativer Unternehmen in Schulen fördern zudem das Verständnis für biobasierte Produkte und innovative Ansätze in der Gesellschaft. In den Niederlanden zeigt sich ein verstärktes Bewusstsein für Nachhaltigkeitsthemen besonders an niederländischen Universitäten. Dort entstehen größere Online-Communities auf verschiedenen sozialen Plattformen, die sich dem Schwerpunkt Nachhaltigkeit beschäftigen.

#### Einfluss auf die Nachhaltigkeit

Die Bewertung des Fokusthemenfelds „Einfluss auf die Nachhaltigkeit“ in den Leitländern zeigt ein vielschichtiges Bild, in dem Deutschland, Finnland und die USA führend sind, während UK/IE, Kanada und Schweden im Mittelfeld liegen und China das Schlusslicht bildet.

Die Experten unterstreichen, dass in Deutschland der Gedanke der Nachhaltigkeit eine zentrale Rolle in der In-

dustrie spielt. Diese Entwicklung wird vorangetrieben durch die Nutzung biologischer Rohstoffe, Ressourcen und Prozesse. Besonders wird in diesem Zusammenhang auf die biointelligente Wertschöpfung verwiesen, als ein Befähiger für nachhaltige und kreislauffähige Wertschöpfungssysteme. Darüber hinaus weisen Experten darauf hin, dass in deutschen Unternehmen das Verständnis und die Implementierung ökologischer Nachhaltigkeit weit verbreitet sind. Dies wird durch Aussagen von Experten bestätigt. Diese zeigen, dass das Bewusstsein für Ressourceneffizienz und langfristiges, umweltfreundliches Wirtschaften tief in der Unternehmenskultur verankert ist. Trotz der Fortschritte in der nachhaltigen Entwicklung und der breiten Akzeptanz in der Wirtschaft weisen Experten auf Herausforderungen in der praktischen Umsetzung in Deutschland hin. Die Notwendigkeit nachhaltiger Produktion, wie von Experten diskutiert, wird als entscheidend für die Zukunftssicherung der Produktionsstandorte gesehen, ist jedoch von sozialen und ressourcenbezogenen Aspekten abhängig.

Die Experten beschreiben, dass die amerikanische Gesellschaft Nachhaltigkeit als ein schwer zu erreichendes Ziel ansieht. Diese Einstellung zeigt sich laut der Experten darin, dass Nachhaltigkeitsmaßnahmen oft nur dann ergriffen werden, wenn sie keine finanziellen oder anderen Unannehmlichkeiten mit sich bringen. Ökonomische Nachhaltigkeit wird in Organisationen als wichtig erachtet. In den USA zeigen sich Herausforderungen in der Umsetzung aufgrund individueller Einstellungen und ökonomischer Überlegungen. Im Gegensatz zu dem quasi bestehenden Ethos der Nachhaltigkeit in Deutschland werden in den USA nachhaltige Entscheidungen oft auf Basis von Kosten-Nutzen-Überlegungen getroffen, was die Bereitschaft zur Umsetzung nachhaltiger Praktiken einschränkt. Dies unterstreicht die unterschiedlichen Herangehensweisen beider Länder an das Thema.

Finnland hat sich das ambitionierte Ziel gesetzt, bis 2035 klimaneutral zu werden – schneller als viele andere Länder. Diese Zielsetzung wird durch umfangreiche staatliche Unterstützung und gezielte Maßnahmen wie den Ausstieg aus der Kohleverwendung vorangetrieben, wie Experten hervorheben. Darüber hinaus zeigt Finnland eine hohe Akzeptanz für bio-

basierter und recycelbarer Produkte, was durch starke gesellschaftliche Initiativen im Recyclingbereich unterstützt wird. Dies verdeutlicht eine allgemeine Bereitschaft der finnischen Gesellschaft, nachhaltige Praktiken zu unterstützen und umzusetzen. Experten betonen, dass die Notwendigkeit einer raschen Transformation in Finnland anerkannt wird, um den globalen Klimaherausforderungen zu begegnen und die langfristige Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. Im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung eröffnen sich laut den Experten neue Chancen und Potenziale. Diese Innovationen sind nicht nur für die Industrie, sondern auch für die gesellschaftliche Entwicklung von großer Bedeutung. Trotz der klaren Ausrichtung auf Nachhaltigkeit und die festgelegten Ziele gibt es in Finnland Herausforderungen. Die Bedeutung eines ausgewogenen Ansatzes in der Nachhaltigkeitspolitik wird hervorgehoben, bei dem ökologische, soziale und ökonomische Nachhaltigkeitsziele in Einklang gebracht werden müssen, um langfristig erfolgreich zu sein.

Im Vereinigten Königreich und Irland wird das Konzept der Nachhaltigkeit zwar weitgehend anerkannt, jedoch nur in begrenztem Umfang umgesetzt. Ein bedeutendes Hindernis ist die Risikoaversion der Industrie, in nachhaltige Fertigungstechnologien zu investieren, die möglicherweise noch nicht kosteneffektiv oder wettbewerbsfähig sind wie von einem Experten hervorgehoben wird. In UK/IE wird Nachhaltigkeit in Forschung und Entwicklung stark berücksichtigt und es gibt eine klare Erwartung, dass neue Technologien und Produkte nachhaltiger als ihre Vorgänger sein müssen. In Kanada herrscht an Universitäten und in der Regierung ein starkes Bewusstsein für Nachhaltigkeit, wie von einem Experten dargestellt, gibt es unterschiedliche Grade der Akzeptanz in Bezug auf konkrete Maßnahmen wie bspw. Klimasteuern. Dies deutet darauf hin, dass in Kanada ein grundsätzliches Verständnis für die Wichtigkeit von Nachhaltigkeit besteht, aber die konkrete Umsetzung und Akzeptanz variieren.

Schweden wird, ähnlich wie Norwegen, von Experten des jeweiligen Landes dafür kritisiert, dass politische Aussagen und tatsächliche Handlungen in Bezug auf Nachhaltigkeit auseinanderfallen können. Es besteht eine Diskrepanz zwischen politischen Aussagen und tatsächlichen Handlungen, insbesondere wenn es um die Finan-

»In der transparenten Kommunikation liegt der Schlüssel: Wo stehen wir wirklich, wohin wollen wir? Die Gesellschaft muss nachvollziehen können, inwiefern Innovation der Allgemeinheit zugutekommt. Keine überstürzten Ankündigungen, sondern eine realistische Perspektive, die nicht nur von Technikerinnen und Technikern, sondern auch aus anderen Disziplinen, zum Beispiel der Philosophie oder Ethik, unterstützt wird.«

Thomas Potthast, Universität Tübingen

zierung von Nachhaltigkeitsinitiativen geht. Dies steht im Kontrast zu Ländern wie Deutschland und Finnland, die ein stärkeres Engagement und eine konsistentere Umsetzung in Sachen Nachhaltigkeit zeigen. Israel hingegen befindet sich bezüglich der Nachhaltigkeit weit hinter anderen Ländern, hauptsächlich aufgrund des geringeren Drucks von Anteilseignern, Regulierungsbehörden und Verbrauchern. Dies führt zu einer geringeren Priorisierung und Umsetzung von Nachhaltigkeitsinitiativen, wie von Experten angemerkt wird.

### Bildung und Qualifikationen

Deutschland nimmt im Fokusthemenfeld „Bildung- und Qualifikation“ im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung derzeit eine führende Position ein. Im Vergleich zu den anderen Leitländern hat Deutschland die höchsten Ausgaben für Bildung, gemessen am BIP. Besonders die wissenschaftliche Ausbildung bis zur Universitätsebene wird stark gefördert. Darunter fallen vor allem die MINT-Fächer, die in ihrer heutigen Form zwar eine gute, wenngleich auszubauende Basis für die biointelligente Wertschöpfung bilden.

Allerdings nimmt laut Expertenmeinungen die Förderung nach der Wahl eines wissenschaftlichen Studiengangs an der Universität ab. Während Ingenieure klare Karrierewege haben, gestaltet sich der Weg in den Naturwissenschaften, insbesondere in der Forschung, komplexer. Um diesem Problem entgegenzuwirken, bieten einige deutsche Universitäten bereits duale Studiengänge an. Diese ermöglichen eine nahtlose Integration neuer Erkenntnisse und Technologien in den Unternehmenskontext. Das Schaffen klarerer Karrierewege gestaltet und unterstützt die praktische Umsetzung von Technologien.

Die biointelligente Wertschöpfung erfordert eine breitere und interdisziplinäre Ausbildung, die über biologische und chemische Kenntnisse hinausgeht und auch ökonomische sowie technologische Aspekte einschließt. In Deutschland entwickeln aktuell erste

»At the university, we focus on sustainability, aligning with government initiatives. Our center, BioZone aims to transform biology and engineering for a sustainable society. Emphasizing sustainability is crucial at provincial and federal levels in Canada, given its rich history of nature conservation.«

Prof. Radhakrishnan Mahadevan, University of Toronto<sup>27</sup>

Hochschulen spezialisierte Studiengänge und Programme. Dennoch betonen die befragten Experten, dass diese noch nicht die erforderliche Breite für eine gezielte Ausbildung im Kontext der biointelligenten Wertschöpfung abdecken. Gleichzeitig verschiebt sich der Fokus der Gesellschaft von der Betonung einer möglichst hohen Bildung hin zur Förderung der Grundbildung und zu technischen Berufen, insbesondere im Kontext der Nachhaltigkeit. Große Kampagnen zielen darauf ab, Elektriker, Ingenieure und traditionelle Handwerker gezielt zu rekrutieren. Diese Entwicklung spiegelt den Wandel in der gesellschaftlichen Wahrnehmung von Bildung und Berufen wider.

Trotz dieser positiven Entwicklungen steht Deutschland in diesem Kontext auch Herausforderungen gegenüber. Die oftmals sehr langen Einstellungsprozesse beeinträchtigen den Fortschritt und stellen besonders bei zeitkritischen Projekten ein Problem dar. Die Knappheit an qualifiziertem Personal wirkt sich bereits heute negativ auf Unternehmen aus. Ähnlichen Herausforderungen stehen auch andere Länder gegenüber. Im Vereinigten Königreich und Irland sehen einige Experten speziell im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung einen Mangel an qualifiziertem Personal, da die Besetzung entsprechender Stellen nicht auf formalen Titeln basiert, sondern eine genaue Abstimmung der Fähigkeiten und

Qualifikationen auf die Anforderungen der Position erfordert. Dennoch besitzt das Land nach Expertenmeinungen die Fähigkeit, Studierende aus verschiedenen Ländern anzuziehen, insbesondere durch die hohe Qualität der wissenschaftlichen Institutionen.

In Finnland findet laut Experten ein Rückgang des Bildungsstands in Naturwissenschaften statt, besonders in Mathematik und Chemie. Dies führt zu einem Mangel an qualifizierten Arbeitskräften. Trotz gestiegenem Interesse an Umweltschutz und grünen Technologien besteht eine allgemeine Schwierigkeit, qualifiziertes Personal zu finden. Sowohl in technischen Berufen als auch in der Forstwirtschaft, existiert ein starker Bedarf an Fachpersonal. In China zeigt sich das Gegenteil bei der Verfügbarkeit von Fachkräften. Laut Experten ist es dort heutzutage schwieriger einen Job zu finden als vor fünf Jahren. In China herrscht ein Überschuss an qualifizierten Arbeitskräften, was zu einer hohen Arbeitslosenquote unter den jungen Menschen führt und gleichzeitig den Wettbewerb um Arbeitsplätze intensiviert.

### Zwischenfazit: Stand der Biointelligenten Wertschöpfung in Deutschland

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass Deutschland über substanzielles Potenzial verfügt, eine entscheidende Rolle bei der Etablierung einer biointelligenten Wertschöpfung einzunehmen.

Deutschland zeichnet sich insbesondere durch die Förderung interdisziplinärer und praxisorientierter Studiengänge und Ausbildungsberufe aus, um qualifiziertes Personal für die Umsetzung einer biointelligenten Wertschöpfung auszubilden. Dies zeigt sich auch in der vielfältigen Forschungslandschaft. Diese ist geprägt von einer starken Grundlagenforschung im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung, wobei die Integration der Forschungsergebnisse in anwendungsorientierte Lösungen verbesserungswürdig ist. Der Marktzugang Deutschlands zeichnet sich durch eine herausragende

»Parity of esteem between higher education and technical education is often advocated for, including by politicians. While higher education had decades of stability and funding certainty, further education has had almost continuous reform, introduction of new qualifications and changes to provisions without any of the commensurate investment needed to implement those changes.«

Dr. Helen Ewles, Royal Academy of Engineering<sup>28</sup>

Position im internationalen Handel aus. Die geschickte Anpassung an die sich wandelnden globalen Märkte und das Bewusstsein für die zentrale Bedeutung der Wertschöpfung im Konvergenzbereich bieten Deutschland die Chance, seine Spitzenposition nachhaltig weiter auszubauen. Geschäftsmodelle in Deutschland sind stark exportorientiert, mit einem Fokus auf die globale Reichweite. Deutsche Unternehmen bieten trotz ihrer mittleren Position im internationalen Ranking eine solide Basis für zukünftiges Wachstum. Parallel dazu verfolgen sie eine proaktive Marktgestaltungsstrategie, indem sie Trends vorwegnehmen und innovative Lösungen entwickeln, um aktiv neue Märkte zu erschließen und zu formen, anstatt nur auf bestehende Marktbedingungen zu reagieren. Zudem zeichnet sich die deutsche Industrie durch ein umfangreiches Engagement für Nachhaltigkeit aus. Diese Haltung wird immer stärker in der Unternehmenskultur verankert und spiegelt sich sowohl in großen als auch in kleinen Unternehmen wider, die ein neues Bewusstsein für ökologische Nachhaltigkeit entwickeln und fördern.

Deutliche Defizite werden in Deutschland vor allem bei der Umsetzung von Marktreife von Technologien, Produkten und Dienstleistungen der biointelligenten Wertschöpfung sichtbar. Die derzeit verfügbaren biointelligenten Technologien, Produkte und Dienstleistungen befinden sich auf einem niedrigeren TRL-Level und der Transfer dieser Technologien von der Forschung in die Anwendung erfolgt nur zögerlich. Eine detaillierte Auswertung der Befähigertechnologiefelder sowie deren Anwendungen ist im Kapitel zur *Analyse der weltweiten Aktivitäten* zu finden. Dies wird zusätzlich durch ein umfangreiches deutsches Regulierungssystem und hohe

bürokratische Hürden für die Markteinführung und der Skalierung erschwert. Auch im Bereich des Unternehmenswachstums stellen sich in Deutschland häufig Regulierungen, langwierige Zulassungsprozesse sowie bürokratische Hürden auf dem europäischen Markt als Hindernisse dar. Die bislang unzureichende politische Unterstützung in Form von Forschungsprogrammen und Fördermöglichkeiten begrenzt die Möglichkeiten zur weiteren Entwicklung des Themas im Hinblick auf die Umsetzung der Marktreife von biointelligenten Technologien, Produkten und Dienstleistungen in Deutschland zusätzlich.

<sup>18</sup> „Vorhersehbarkeit und Weitsicht in Regulierung und Politik sind von größter Bedeutung. Stabilität ist nicht auf einen konservativen Kontext beschränkt, sondern auch in einem progressiven Sinne von zentraler Bedeutung. Eine Vorausschau auf die Entwicklung von Regulierung und Politik über einen Zeitraum von mindestens fünf, besser zehn Jahren ist unabdingbar.“ (Dr. Sebastian Beblawy, Umwelttechnik BW)

<sup>19</sup> „Die australische Wirtschaft ist stark von ihren natürlichen Ressourcen geprägt, was sich in umfangreichen Exporten von Mineralien und landwirtschaftlichen Produkten niederschlägt. Darüber hinaus legt das Land großen Wert auf den Dienstleistungs- und Finanzsektor.“ (Prof. Esteban Marcellin, Universität Queensland)

<sup>20</sup> „Der Markt entwickelt sich ständig weiter und die Präferenzen der Nutzer ändern sich. Führungskräfte müssen die Marktdynamik erfassen, Kundenbedürfnisse antizipieren und proaktive Lösungen anbieten, um Unternehmen zu führen, statt auf Veränderungen zu reagieren.“ (Matija Zulj, AGRIV)

<sup>21</sup> „Die Besorgnis über den begrenzten Umfang der Innovation behindert die Entwicklung eines robusten Wirtschaftssektors. Ein Mangel an vielfältigem Wissen, Ideen und qualifizierten Menschen ist die Ursache für diese Besorgnis. Für den Aufbau eines florierenden Wirtschaftssektors ist ein Netzwerk von Unternehmen und Akteuren unerlässlich, das eine erstklassige Grundlage für nachhaltigen Erfolg schafft.“ (Sari Tasa, Econo)

<sup>22</sup> „Bio-digitale Technologien sind unglaublich anpassungsfähig. Es gibt keinen bestimmten Sektor, der am meisten von ihnen profitiert.“ (Marcus Ballinger, Canada Horizons GC)

<sup>23</sup> „Um wirklich erfolgreich zu sein, vor allem im digitalen Bereich, könnte ein stärker international ausgerichtetes und kollaboratives Modell erforderlich sein, das den Bedarf an globaler Expertise in bestimmten Bereichen wie Videospiele anerkennt. Bestehende Finanzierungsstrukturen und Strategien für Wissenschaftsparks müssen möglicherweise neu bewertet werden, um einen flexibleren und globaleren Ansatz zu ermöglichen.“ (Johan Kask, CREDS)

<sup>24</sup> „Unternehmen stehen vor der Herausforderung sich verändernder Geschäftsmodelle, insbesondere im Hinblick auf den Schutz des bestehenden Geschäfts. Es ist von entscheidender Bedeutung, die Notwendigkeit einer Neuausrichtung und Umstrukturierung zu erkennen. Dazu gehört mehr als nur die Änderung der Preisgestaltung, sondern auch um die Neugestaltung von Arbeitsabläufen und Organisationsstrukturen sowie die Identifizierung wertvoller Kompetenzen.“ (Tom Brennan, McKinsey)

<sup>25</sup> „Bei der Diskussion über Veränderungen in den Produktionsmethoden ist die Betonung auch kleinerer dezentraler Einheiten und der Zirkularität entscheidend. Die Auswirkungen auf bestimmte Wertschöpfungsketten können erheblich sein.“ (Jussi Jäntti, VTT)

<sup>26</sup> Wir haben das Potenzial der Biokonvergenz erforscht [...]. Unser Schwerpunkt liegt auf multidisziplinären Ansätzen, einschließlich der Biologie, ohne auf einen bestimmten Markt abzielen. Das enorme Potenzial, das wir beobachtet haben, erstreckt sich auf Bereiche wie Klima, Lebensmittel, Technologie, Agrartechnologie, Energie und mehr.“ (Zachi Schnarch, IIA)

<sup>27</sup> „Wir konzentrieren uns auf Nachhaltigkeit und stimmen uns mit staatlichen Initiativen ab. Unser Zentrum, BioZone, hat die Transformation von Biologie und Technologie für eine nachhaltige Gesellschaft zum Ziel. Die Betonung der Nachhaltigkeit ist auf Provinz- und Bundesebene in Kanada von entscheidender Bedeutung, da das Land eine reiche Geschichte des Naturschutzes hat.“ (Prof. Radhakrishnan Mahadevan, Universität Toronto)

<sup>28</sup> „Die Gleichwertigkeit von Hochschulbildung und Berufsbildung ist eine häufig, auch von der Politik, erhobene Forderung. Während die Hochschulbildung über Jahrzehnte hinweg Stabilität und finanzielle Sicherheit genossen hat, wurde die berufliche Weiterbildung fast ohne Unterlass reformiert, es wurden neue Qualifikationen eingeführt und Vorschriften geändert, ohne dass die notwendigen Investitionen getätigt wurden, um diese Änderungen umzusetzen.“ (Dr. Helen Ewles, Royal Academy of Engineering)

## 6. AUF DEM WEG ZUR BIOINTELLIGENTEN WERTSCHÖPFUNG: VIER SZENARIEN FÜR DEUTSCHLAND

# SZENARIEN EINER BIOINTELLIGENTEN WERTSCHÖPFUNG

In diesem Kapitel werden vier Szenarien einer biointelligenten Wertschöpfung in Deutschland 2040 dargestellt. Die Szenarien sind das Ergebnis eines visionären, gestalterischen Austauschprozesses des prinzipiell Möglichen. *Abbildung 34* gibt einen Überblick über die Annahmenkombinationen, aus denen die Szenarien abgeleitet und im Folgenden beschrieben werden.

EINFLUSSFAKTOR	ANNAHME A	ANNAHME B	ANNAHME C	ANNAHME D
<b>Zugang zu den Märkten</b>	Technologieführerschaft	Preisführerschaft	Keine Teilnahme am Markt der biointelligenten Wertschöpfung	einer von mehreren Akteuren
<b>Zugang zu Finanzkapital</b>	Risikokapitalstruktur wie in den USA	Risikoaverse Einstellung	Unternehmerischer Fokus bewirkt Förderung	Keine Förderung für biointelligente Wertschöpfung
<b>Zugang zu Ressourcen</b>	Guter Zugang zu allen Ressourcen	Zugang zu biologischen Komponenten, Abhängigkeit bei anderen	Status quo bleibt erhalten	extrem beschränkt
<b>Politische Stabilität</b>	Effizienzsteigerung durch Digitalisierung und Modernisierung	starke politische Steuerung	Staat fokussiert ausgewählte Partnerschaften	geopolitische Instabilität
<b>Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten</b>	In einzelnen Technologien/Anwendungsfeldern (Aufholjagd)	Forschung und Transfer gleichwertig und gehen ineinander über	Forschung und Umsetzung gehemmt durch Regulatorik	Forschungspeak, Umsetzung im Fokus
<b>Innovationsnetzwerke</b>	Missionsorientierte internationale Zusammenarbeit	Ausgewählte Kooperation um eigene Lücken zu schließen	Experimentierräume werden geschaffen	Staat ist allwissend (top-down) und kontrolliert Netzwerke
<b>Unternehmertum</b>	nachhaltigkeitsgetrieben	Biointelligente Wertschöpfung als Risiko	Kenntnis und Wissen fehlen, erschwerte Zugang	wirtschaftlicher Wert erkannt und vorangetrieben
<b>Ethische Erwägungen und Akzeptanz</b>	Gesellschaft ist stark positiv eingestellt	Globaler Existenzkampf (Moral tritt zurück)	Gesellschaft ist gespalten	Gesellschaft ist extrem negativ eingestellt
<b>Geschäftsmodelle</b>	erfolgreiche internationale Geschäftsmodelle	Technologieentwicklung eilt Geschäftsmodellen voraus	Fokus auf bestehende	Markt nimmt neue Geschäftsmodelle nicht an
<b>Biointelligente Technologien</b>	Weltmarktführer, stark in der Anwendung	Viele Anwendung, aber wenig Tiefe	Fokus auf ausgewählte Technologien	Zweiklang, aber keine biointelligente Wertschöpfung
<b>Einfluss auf die Nachhaltigkeit</b>	Technologien als Stellhebel	regionale Unterschiede durch unterschiedliche Zielsetzung	kein Einfluss	
<b>Struktur von Wertschöpfungsnetzwerken</b>	sinnvoll, freiwillig und funktionieren auch international	fremdgesteuert	lineare Wertschöpfung (keine Netzwerke)	regional (Wertschöpfung nur innerhalb lokaler Netzwerke)
<b>Bildung und Qualifikation</b>	Deutschland als Honeypot	Fachkräfte sind Generalisten oder Spezialisten	Abwanderung von Fachkräften	Zusammenführung von Fachkräften für biointelligente Wertschöpfung

Abbildung 34: Übersicht der Annahmen und Szenarienbildung. Unter der Fragestellung, wie sich die biointelligente Wertschöpfung in Deutschland im Jahr 2040 darstellt, sind Annahmen zu den identifizierten Einflussfaktoren gebildet worden. Aus der konsistenten Verbindung der Annahmen durch Fäden leiten sich Zukunftsbilder ab, welche jeweils mit einem Symboltier gekennzeichnet sind.



## Deutschland als Rennpferd: Im vollen Galopp in eine nachhaltige, biointelligente Zukunft (Szenario I)

In diesem Szenario ist Deutschland 2040 Vorreiter im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung, wobei die Entwicklung biointelligenter Technologien, Produkte und Dienstleistungen wie ein galoppierendes Rennpferd weiter an Dynamik gewinnt. Deutschland ist über die Jahre Herausforderungen aktiv angegangen und hat sie erfolgreich bewältigt, um eine innovative und nachhaltige biointelligente Zukunft zu gestalten. Im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung ist Deutschland in bestimmten Bereichen, wie dem Ernährungs- und Energiesektor, Weltmarktführer.

Diesem Erfolg liegt Deutschlands Technologieführerschaft zugrunde. Das Land hat mehrere Schlüsseltechnologien entwickelt, die als Türöffner zu internationalen Absatzmärkten dienen. Die biointelligenten Technologien „Made in Germany“ zeichnen sich durch hohe Qualität aus und sind international anerkannt. Deutschland hat sich insgesamt zu einem Innovationskraftwerk entwickelt und dadurch von anderen Ländern weitgehend unabhängig gemacht. Weltweit wird auf biointelligente Technologien deutscher Anbieter zurückgegriffen. Durch angepasste staatliche Rahmenbedingungen wurde ein gut funktionierendes Innovationsökosystem für biointelligente Wertschöpfung geschaffen.

Es hat sich, ähnlich wie in den USA, eine Risikokapitalstruktur durch förderliche Maßnahmen und Anreize

etabliert. Damit sind junge Unternehmen unabhängiger von staatlicher Förderung und können sich die benötigten Mittel für den Aufbau oder das Wachstum ihrer Geschäftstätigkeit über den privaten Kapitalmarkt beschaffen. Staatliche Förderung konzentriert sich vor allem auf Grundlagenforschung und den Wissens- sowie Innovationstransfer an Universitäten, Hochschulen und anderen Forschungseinrichtungen. In Deutschland wurde dabei bislang auf Bereiche und Technologien gesetzt, für die bereits entsprechende Kompetenzen vorhanden sind, bspw. Fermentation und Recycling. Nun fokussiert sich die öffentliche als auch private Forschung und Entwicklung in Deutschland auf eine Aufholjagd in den Bereichen, in denen das Land bislang noch nicht führend ist, bspw. die personalisierte Medizin.

In Deutschland besteht zudem ein guter Zugang zu wichtigen biologischen Ressourcen und die deutsche Wirtschaft hat sich erfolgreich zu einer vollständigen Kreislaufwirtschaft gewandelt. Die Unabhängigkeit von Importen und der Ersatz von fossilen Ressourcen durch biologische Alternativen stärken die Versorgungssicherheit.

Die deutsche Regierung hat bürokratische Hürden abgebaut und durch eine umfangreiche Modernisierung und vollständige Digitalisierung die Umsetzung biointelligenter Wertschöpfung beschleunigt. Insgesamt ist die internationale politische Landschaft von Stabilität und Zusammenarbeit, die über die Grenzen der EU hinaus geht, geprägt. Eine besonders enge Zusammenarbeit in der europäischen Gemeinschaft beschleunigt die Etablierung biointelligenter Innovationen, zumal das Thema zentraler Bestandteil der politischen Agenda ist. Internationale Zusammenarbeit in missionsorientierten Innovationsnetzwerken mit Fokus auf eine gemeinsame Bewältigung globaler gesellschaftlicher Herausforderungen steht im Vordergrund.

Durch die erfolgreiche Konvergenz von KI und Biologie in verschiedenen technologischen Anwendungen wird ein hoher Grad an Nachhaltigkeit in den zentralen Bedürfnisfeldern erzielt. Biointelligente Wertschöpfungsnetzwerke sind nicht mehr nur effizient, sondern auch zweckbestimmt und setzen bspw. auf Zirkularität. Sie funktionieren über die gesamte Wert-

schöpfungskette hinweg, sind dezentralisiert und orientieren sich an biologischen Vorbildern, was zu einer optimalen Nutzung von Ressourcen führt.

Die positive gesellschaftliche Einstellung gegenüber einer biointelligenten Wertschöpfung führt zu einer weitreichenden Akzeptanz dieser und nährt den florierenden Markt für nachhaltige Produkte, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle. Das Bestreben, globale gesellschaftliche Herausforderungen zu bewältigen, motiviert Startups und etablierte Unternehmen gleichermaßen, neue nachhaltige, biointelligente Lösungen auf den Markt zu bringen. Diese Bemühungen werden durch gezielte staatliche Förderung, wie bspw. über eine benötigte Infrastruktur oder Anschubfinanzierung, unterstützt, wodurch eine Synchronisation der Ziele von Politik und Wirtschaft erreicht wird. Die Etablierung von Innovationsplattformen fördert darüber hinaus Kooperationen und Partnerschaften zwischen Wissenschaft, Industrie und Investoren, was die Entwicklung innovativer biointelligenter Lösungen und international erfolgreicher Geschäftsmodelle weiter vorantreibt.

Die gute Bildung und Qualifikation von Arbeitskräften haben einen Honeypot-Effekt ausgelöst: Deutschland ist zu einem attraktiven Ziel für Fachkräfte geworden und zieht qualifizierte Menschen aus aller Welt an. In Bezug auf die Fachkräftezuwanderung wurden bürokratische Hürden abgebaut. In den für eine biointelligente Wertschöpfung relevanten Wirtschaftssektoren sind Studium und berufliche Ausbildung gleichermaßen attraktiv. Die für Biointelligenz benötigten Kompetenzen sind zum einen in interdisziplinäre Curricula in den MINT-Fächern integriert und zum anderen sind passende Aus- sowie Weiterbildungsmöglichkeiten vorhanden.

Insgesamt entfaltet dieses Szenario eine transformative Kraft in Richtung einer nachhaltigen und innovationsgetriebenen biointelligenten Zukunft. Die verschiedenen Faktoren verstärken sich gegenseitig. Rahmenbedingungen wurden durch die Politik innovationsförderlich gestaltet, sodass die Entwicklung und Etablierung biointelligenter Technologien, Produkte und Dienstleistungen in Deutschland signifikant beschleunigt werden. Hochschulen und Forschungsein-

richtungen setzen auf Transfer und Interdisziplinarität. Unternehmertum wird dadurch mehr forciert und Ergebnisse aus vorfinanzierten interdisziplinären Forschungsprojekten in marktreife Innovationen übertragen. Die Schaffung gezielter Rahmenbedingungen haben die tendenzielle Zurückhaltung der deutschen Gesellschaft gegenüber Risiken überwunden. Durch den neu entstandenen ausgeprägten Gründungswillen und die erfolgreiche Umsetzung neuer tragfähiger Geschäftsmodelle entstehen neue Unternehmen und Arbeitsplätze im Land.



### Deutschlands beharrlicher Kurs eines Ochsens: Sicherung der Position in einer biointelligenten Zukunft (Szenario II)

In diesem Szenario ist Deutschland ein etablierter Anbieter biointelligenter Technologien, Produkte und Dienstleistungen, der, vergleichbar mit einem Ochsen, Ausdauer, Stärke und Kontinuität zeigt, während er beharrlich einen Acker bearbeitet, jedoch seine Grenzen nicht überschreitet. Die Etablierung einer biointelligenten Wertschöpfung in Deutschland wird in diesem Szenario maßgeblich durch den Zugang zum Markt über die Preisführerschaft geprägt. Obwohl Deutschland bis 2040 nicht unbedingt als Technologieführer auftritt, positioniert es sich durch effiziente Produktionsprozesse als Preisführer. Diese Strategie eröffnet einen breiten Absatzmarkt und auch den Zugang zu einkommensschwächeren Regionen.

Deutschland verfügt außerdem über einen guten Zugang zu biologischen Ressourcen, zeigt jedoch Abhängigkeitsverhältnisse im hochtechnisierten Bereich sowie für bestimmte Schlüsseltechnologien. Durch Importe ist zwar ausreichend Energie vorhanden, jedoch schreitet der Ausbau für erneuerbare Energien und alternative Energiequellen für eine dezentrale Energieversorgung nur langsam voran, was auf die Abhängigkeit von Schlüsseltechnologien zurückzuführen sein kann.

In Deutschland werden außerdem regionale Nachhaltigkeitsziele gesetzt. Diese spezifische Umrahmung führt im internationalen Vergleich zu erheblichen Unterschieden in den Nachhaltigkeitsbestrebungen.

Die Herausforderung einer fehlenden globalen Strategie zur Erreichung weltweiter Ziele, wie etwa die Senkung von Treibhausgasemissionen, wird dadurch zusätzlich erschwert.

Eine rigorose staatliche Steuerung legt die Biointelligenz als strategisches Thema für Deutschland fest, wobei der Staat die Hauptverantwortung für die Förderung einer biointelligenten Wertschöpfung trägt. Ähnlich wie in China werden hierbei bestimmte Richtlinien und Strategien festgelegt. Die Entwicklung von biointelligenten Technologien, Produkten und Dienstleistungen wird deshalb vor allem durch staatliche Subventionen unterstützt, um die Marktposition zu sichern. Dabei liegt ein besonderer Fokus darauf, Experimentierräume zu schaffen, um die Innovationskraft zu stärken. Jedoch wird die schnelle Entwicklung und breite Umsetzung einer biointelligenten Wertschöpfung durch eine risikoaverse Einstellung privater inländischer Investoren gehemmt, während ausländisches Kapital die Investitionskultur maßgeblich prägt.

Die Struktur von Wertschöpfungsnetzwerken ist in diesem Szenario fremdgesteuert und wird durch den Staat sowie ausländische Kapitalgeber gelenkt. Da sich Deutschland in diesem Szenario eher auf theoretisch diskutierte Ausprägungsformen von Wertschöpfungsnetzwerken fokussiert, rückt die Umsetzung durch anwendungsorientierte Forschung und Kooperationen zwischen Wissenschaft und Industrie in den Hintergrund, was langfristig zu Herausforderungen führt. Zusätzlich behindert die langsame Entwicklung geeigneter Geschäftsmodelle den Transfer neu entwickelter Technologien in die industrielle Umsetzung. Hinzukommend erschweren Wissenslücken sowie ein Mangel an Fachkräften in MINT-Fächern die Entwicklung einer sich selbst verstärkenden biointelligenten Wertschöpfung in Deutschland. Wenn auch viele Technologien bereits in der Anwendung sind, fehlt oft ein tiefes Verständnis. Fachkräfte sind entweder reine Spezialisten oder Generalisten, da keine expliziten interdisziplinären Biointelligenzbildungsprogramme angeboten werden. Diese ausgeprägte disziplinäre Forschung und Forschungsförderung beeinträchtigen die Entwicklung systemischer Lösungsansätze langfristig.

Ethisch ist die Gesellschaft in diesem Szenario gespalten. Zermürbende kontroverse Diskussion und wenig konstruktive, simplifizierende Kommunikation führen zu einem Abnutzungseffekt und wirken sich nachteilig auf den Standort Deutschland aus. Dies trägt zu einem schlechten Image bei und hemmt das Potenzial biointelligenter Technologien, Produkte und Dienstleistungen.

Zusammenfassend ist in diesem Szenario die Entwicklung einer biointelligenten Wertschöpfung in Deutschland hauptsächlich durch den Zugang zum Markt über die Preisführerschaft geprägt, wobei effiziente Produktionsprozesse eine bedeutende Rolle spielen und einen breiten Absatzmarkt ermöglichen. Trotz gutem Zugang zu biologischen Ressourcen bestehen Abhängigkeitsverhältnisse im hochtechnisierten Bereich und für bestimmte Schlüsseltechnologien. Eine rigorose staatliche Steuerung legt biointelligente Wertschöpfung als strategisches Thema fest, während die Investitionskultur maßgeblich durch ausländisches Kapital geprägt wird. Die Umsetzung von biointelligenten Technologien wird durch fehlende etablierte Geschäftsmodelle und Wissenslücken erschwert. Des Weiteren erschwert eine gesplante Gesellschaft die breite Umsetzung und Etablierung einer biointelligenten Wertschöpfung.



### Schlummernde Potenziale: Deutschlands Faultierblick auf eine biointelligente Zukunft (Szenario III)

In diesem Szenario nimmt Deutschland eine passive Haltung gegenüber biointelligenten Technologien, Produkten und Dienstleistungen ein. Trotz des wachsenden internationalen Interesses und den weltweit steigenden Investitionen in biointelligente Technologien beteiligt sich Deutschland nicht aktiv am Markt für biointelligente Wertschöpfung, weder an der Produktion noch am Import biointelligenter Produkte oder Technologien. Diese Zurückhaltung ist das Ergebnis eines komplexen Zusammenspiels von politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Faktoren. Der Mangel an Initiativen zur Entwicklung und Implementierung biointelligenter Technologien führt dazu, dass Chancen für Innovationen und wirtschaftliches Wachstum in diesem Bereich ungenutzt bleiben. Die Entwicklung der biointelligenten Wertschöpfung in Deutschland wird maßgeblich durch den begrenzten Zugang zu Finanzkapital gehemmt. Dies wird durch die politische Ausrichtung des Landes verschärft, welche einen Schwerpunkt auf traditionelle Industrien legt, wodurch die nationale öffentliche Förderung von Biointelligenzprojekten vernachlässigt wird.

Die Herausforderungen erstrecken sich jedoch nicht nur auf politische Entscheidungen, denn Deutschland hat keinen nennenswerten Zugang zu den benötigten Ressourcen der biointelligenten Wertschöpfung im eigenen Land und ist daher auf Importe angewiesen. Die Verfügbarkeit von Ressourcen ist auch in anderen

Ländern begrenzt. Die Konkurrenz auf dem Weltmarkt ist groß, was zu einer starken Abhängigkeit von externen Quellen führt und die Versorgungssicherheit Deutschlands gefährdet. Dies wirkt sich auf die Verfügbarkeit und den Import von Materialien aus, die zur Entwicklung oder Produktion von biointelligenten Technologien benötigt werden.

Die Innovationsfähigkeit des Landes wird durch eine übermäßige Regulierung und die staatliche Kontrolle von Netzwerken der biointelligenten Wertschöpfung beeinträchtigt. Regulatorische Hürden und übermäßige Bürokratie stehen der Entwicklung innovativer Technologien, Produkte und Dienstleistungen entgegen und führen dazu, dass andere Länder Deutschland überholen. Diese übermäßige Kontrolle eines vermeintlich allwissenden Staatsapparates hemmt neue Ideen und Technologien und vernachlässigt die Entwicklung regionaler oder nationaler Netzwerke und internationaler Kooperationen. Die Innovationslandschaft leidet unter einem Mangel an Zusammenarbeit und einem übermäßigen Fokus auf den Erhalt etablierter Industrien, was die Entwicklung und Einführung biointelligenter Technologien ausbremst.

Ins Gesamtbild passt, dass die Gesellschaft die biointelligente Wertschöpfung als Risiko betrachtet und ethische, finanzielle und regulatorische Herausforderungen sieht, die mit ihrer Entwicklung verbunden sind. Die negative Einstellung gegenüber biointelligenter Wertschöpfung in Deutschland wird verstärkt durch die allgemeine Skepsis gegenüber KI und die Angst vor den potenziellen Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt und die deutsche Gesellschaft. Eine negative gesellschaftliche Einstellung und ethische Bedenken gegenüber Biointelligenz wirken sich hinderlich auf die unternehmerische Aktivität und die Akzeptanz neuer Geschäftsmodelle aus. Ausgeprägte Vorbehalte hemmen die Investitionsbereitschaft und führen dazu, dass Deutschland im internationalen Wettbewerb hintenansteht und neue Geschäftsmodelle auf dem deutschen Markt schlecht angenommen werden.

Die aufgeführten Herausforderungen, denen Deutschland gegenübersteht, haben auch Auswirkungen auf die Struktur der Wertschöpfungsnetzwerke und die Bildung und Qualifikation von Arbeitskräften. Die

lineare Struktur der Wertschöpfungskette bleibt bestehen, und innovative Ansätze werden nicht ausreichend gefördert. Die Abwanderung von Fachkräften führt zu einer Verschärfung des Fachkräftemangels und behindert die Innovationsfähigkeit und Wettbewerbsfähigkeit des Landes. Es herrscht ein Mangel an qualifizierten Arbeitskräften, wodurch die Entwicklung und Umsetzung biointelligenter Technologien und Produkte in Deutschland gehemmt wird.

Insgesamt zeigt dieses Szenario viele negative, miteinander verflochtene Faktoren, die sich gegenseitig verstärken und so einen großen negativen Effekt auf die Entwicklung und Umsetzung biointelligenter Technologien in Deutschland haben. Deutschland hat eine passive Haltung gegenüber biointelligenten Technologien, wodurch potenzielle Chancen für Innovationen und wirtschaftliches Wachstum ungenutzt bleiben. Politische Ausrichtung, begrenzter Zugang zu Finanzkapital und übermäßige Regulierung behindern die Entwicklung. Die negative gesellschaftliche Einstellung verstärkt ethische Bedenken und regulatorische Herausforderungen, hemmt Investitionen und beeinträchtigt die Akzeptanz neuer Geschäftsmodelle. Dies führt zu einem Fachkräftemangel und einer stagnierenden Innovationsfähigkeit, die Deutschlands Wettbewerbsfähigkeit beeinträchtigen.



### Das deutsche Huhn und die Körner der biointelligenten Wertschöpfung in nächster Umgebung (Szenario IV)

Die biointelligente Wertschöpfung wird im Jahr 2040 maßgeblich durch die Unternehmen vorangetrieben. Diese haben das unternehmerische Potenzial der biointelligenten Wertschöpfung erkannt. Nachhaltigkeitsaspekte spielen weniger eine Rolle, die wirtschaftliche Attraktivität ist die treibende Kraft. Ähnlich einem hungrigen Huhn liegt ihr Fokus dabei auf den Körnern, die sich in nächster Nähe befinden, d.h. auf ausgewählten biointelligenten Technologien, Produkten und Dienstleistungen, die sich wirtschaftlich bewährt haben und zu denen Kompetenzen und Wissen aufgebaut werden konnte. Diese finden sich zumeist in den lebensnahen Bereichen, in denen biointelligente Technologien bereits heute vertreten sind, wie Nahrungsmittel, Medizin und Pharmazie. Unternehmen skalieren zudem in der notwendigen Produktionstechnik (z. B. Fabrikausrüstung) und erzeugen sogenannte Quick Wins, um (internationale) Abnehmer von ihren Leistungen zu überzeugen und Mut bei anderen für das Thema zu wecken. Die bekannten Geschäftsmodelle bleiben dabei bestehen, es entwickeln sich aber keine neuen.

Die Fokussierung auf spezifische Bereiche der biointelligenten Wertschöpfung positioniert Deutschland international als Anbieter, der in diesen Bereichen exportiert, und als Abnehmer, der importiert. Die Situation ist international vergleichbar, so dass Deutschland als einer von mehreren führenden Akteuren auf dem Markt gilt. Der so zutage tretende internationale Wett-

bewerb schafft einerseits den Druck, in den etablierten Bereichen weiterhin führend zu bleiben. Andererseits spornt diese Situation deutsche Unternehmen an und inspiriert zu Innovation und der Erschließung neuer Technologieanwendungen. Während einige Unternehmen dem Druck standhalten und florieren, verlieren andere den Anschluss: Es entwickelt sich eine auseinandergehende Unternehmensschere.

Ähnlich verhält es sich beim Zugang zu den notwendigen Ressourcen. Während die biologischen Komponenten im Land verfügbar sind, bleibt Deutschland im hochtechnisierten Bereich und aufgrund von Ressourcenknappheit, z. B. bei den benötigten Edelmetallen, auf den internationalen Handel angewiesen. Auch die hohen Kosten für Energie bleiben bestehen, da der Ausbau der erneuerbaren Energien schleppend vorangeht. Teilweise sind hier Zulieferungen aus dem Ausland notwendig.

Um auszugleichen, was Deutschland aufgrund des Portfolios seiner engagierten Unternehmen in der Biointelligenz nicht zu bedienen vermag, wird die internationale Zusammenarbeit in der Forschung und Entwicklung sowohl unternehmensseitig als auch in der Wissenschaft mit ausgewählten Partnern aus Eigenantrieb und mit unterstützenden Maßnahmen des Staates vorgebracht. Es entwickeln sich voneinander profitierende themenspezifische Innovationsnetzwerke, die sich auf die dominanten Forschungsfelder biobasierte Materialien, biobasierte Strukturen und Bioinformatik fokussieren. Der Aufbau von Inkubatoren oder Forschungscamps und Zukunftsclustern wird zudem durch entsprechende Rahmenbedingungen aus der Politik gefördert. Dabei werden Forschung und Transfer gleich gewichtet. Es ist besonders vorteilhaft für die Unternehmen, dass die Politik den Ergebnis- und Know-how-Transfer von den Hochschulen in die Industrie, von der Forschung in die Anwendung gleichwertig unterstützt – in ähnlicher Weise wie die Forschung selbst. So wird das „Valley of Death“ für Innovation vermieden.

Darüber hinaus werden internationale Partnerschaften angestrebt, um Ressourcen in Form von Material und Wissen auszutauschen. Auch wenn Nachhaltigkeit kein Treiber für das Unternehmertum ist – sie

gehört auch in diesem Szenario zum Wertekanon der EU und bildet bei aller Konkurrenz die Basis für wertezentrierte Kooperation. Die Technologien der biointelligenten Wertschöpfung werden als Stellhebel für eine gemeinsame Zielerreichung gesehen. Deutschland ist entsprechend international verzweigt aufgestellt, versucht aber große Abhängigkeiten zu vermeiden. Dies gelingt, indem es seine fehlenden Ressourcen aus verschiedenen Ländern bezieht und zudem die Kontakte innerhalb der EU, welche durch räumliche Nähe und ähnliche Zielsetzungen und Werte verbunden sind, festigt.

Biointelligente Wertschöpfungsnetzwerke, die auf eine Kreislaufwirtschaft hinwirken, fokussieren sich 2040 regional. Regional bedeutet in diesem Fall auch EU-weit regional. Kreislauf- und Abfallführung finden sich dort, wo Akteure, Ressourcen und notwendige Einrichtungen verfügbar sind. Es bilden sich Cluster, die international kooperieren und miteinander handeln.

Die Gesellschaft akzeptiert den Einsatz biointelligenter Technologien als Mittel zum Zweck. Zum einen liegt die Motivation in der Befürwortung eines nachhaltigen Wertschöpfungsansatzes, zum anderen in der Notwendigkeit für die Erhaltung des Lebensstandards und der wirtschaftlichen Relevanz Deutschlands. Ethische Bedenken, bspw. in Bezug auf kultiviertes Fleisch, Gentechnologie und kostenintensive personalisierte Medizin, werden demnach außer Acht gelassen.

Benötigte Fachkräfte sind 2040 in Deutschland vorhanden. Es finden sich jedoch noch nicht viele speziell für Biointelligenz ausgebildete Experten. Während sich interdisziplinäre Studiengänge und Ausbildungsberufe nun etablieren, nehmen Unternehmen die Ausbildung von Fachpersonal aktuell in die eigene Hand. Sie führen ihre vorhandenen Fachkräfte in Biologie, Informationstechnologie und Produktionstechnologie zusammen und investieren in entsprechende Schulungen und interdisziplinäre Zusammenarbeit. Dies und die konstante Weiterentwicklung der biointelligenten Wertschöpfung führen zu kontinuierlichen Weiterbildungsmaßnahmen innerhalb bestehender Berufsbilder.

Das Szenario zeigt vor allem Unternehmen als die treibenden Kräfte hinter der Entwicklung und Etab-

lierung der Biointelligenz, politisch unterstützt durch entsprechende Rahmenbedingungen und begleitenden Initiativen. Die Fokussierung auf spezielle Technologien macht Deutschland international sowohl zu einem erfolgreichen Exporteur als auch zu einem kooperationsabhängigen Importeur, insbesondere im Bereich der Ressourcen. Entsprechend spaltet sich die Unternehmenslandschaft in solche Unternehmen, die den Wandel überstehen, und solche, die in der Biointelligenz keinen Halt finden und langfristig vom Markt verschwinden. Der Aufbau und die Pflege internationaler Partnerschaften sind in diesem Kontext nicht nur politisch, sondern auch auf Seiten der verschiedenen Akteure aus Industrie und Wissenschaft relevant. Es gilt Wissenslücken zu füllen und die eigenen Schwächen in internationalen Kooperationen auszugleichen oder zumindest zu minimieren.

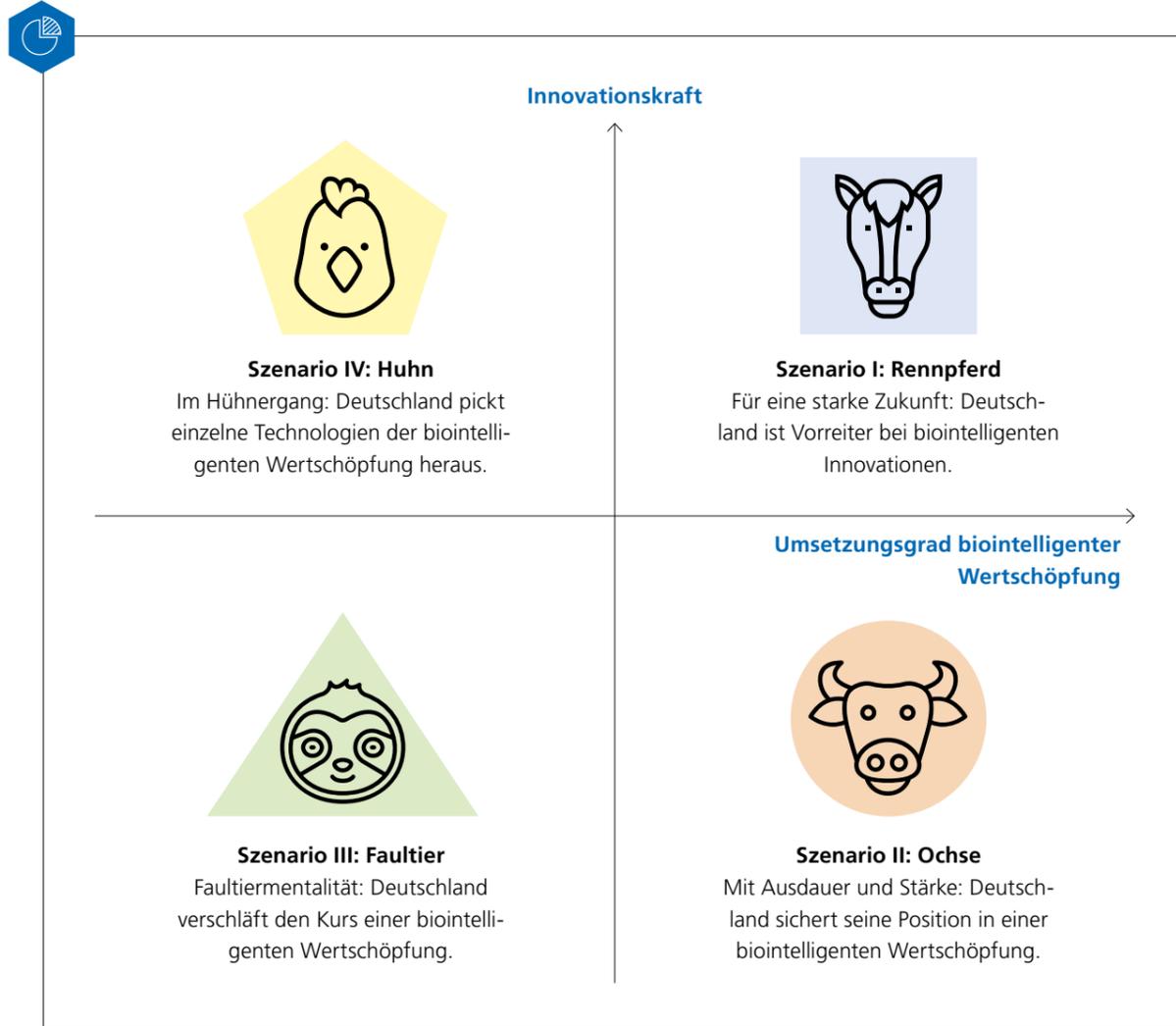


Abbildung 35: Einordnung der Szenarien in verschiedene Entwicklungswege für die Implementierung einer biointelligenten Wertschöpfung in Deutschland.

### Zwischenfazit: Zukunftsszenarien einer biointelligenten Wertschöpfung in Deutschland

Die vier beschriebenen Szenarien lassen sich in einer Übersichtsmatrix einordnen und machen so die verschiedenen Entwicklungswege für die Implementierung einer biointelligenten Wertschöpfung in Deutschland deutlich. Die horizontale Achse dieser Matrix repräsentiert den Umsetzungsgrad biointelligenter Wertschöpfung, während die vertikale Achse die Innovationskraft darstellt (Abbildung 35).

In Szenario III (Faultier) zeigt sich eine passive, indifferente Haltung gegenüber dem Biointelligenzmarkt, während traditionelle Industrien im Fokus bleiben. Die begrenzte finanzielle Unterstützung und

die Abhängigkeit von Ressourcen und Fachkräften wirken als Hemmnisse. Innovationskraft und Umsetzungsgrad der biointelligenten Wertschöpfung leiden gleichermaßen. Eine gewisse Zurückhaltung bei der Umsetzung der biointelligenten Wertschöpfung ist in Szenario IV (Huhn) prägend, jedoch mit einem unternehmerischen Kalkül. Es wird sich bewusst auf Bewährtes und Nahliegendes konzentriert. Infolge von verschiedenen Abhängigkeiten und wegen der leicht erreichbaren Wirtschaftlichkeit liegt der Technologiefokus hier auf spezifischen Bereichen. Wissens- und Ressourcenlücken müssen über (internationale) Kooperationen geschlossen werden. Zusammen mit einer politischen Unterstützung, die günstige Rahmenbedingungen schafft, werden Innovationskraft

und ein Fortschritt möglich, sie steht jedoch stets in internationaler Konkurrenz.

Szenario I und II bieten eine umsetzungsorientiertere Perspektive. Szenario II (Ochse) betont den Zugang zum Markt über Preisführerschaft und staatliche Lenkung, jedoch unterstreicht es auch Herausforderungen im Innovationsfeld aufgrund der langsamen Entwicklung neuer Geschäftsmodelle sowie einer gespaltenen Gesellschaft. In Szenario I (Rennpferd) wird Deutschland als Technologieführer in bestimmten Bereichen dargestellt, mit einem klaren Fokus auf Innovation und Qualität. Eine geplante Aufholjagd ab 2040 in den Bereichen, in denen Deutschland bis dahin noch nicht führend ist, und die Schaffung eines förderlichen Innovationsökosystems kennzeichnen dieses Szenario als sehr dynamisch.

Die Positionierung der Szenarien innerhalb der Matrix reflektiert den Umsetzungsgrad biointelligenter Technologien, Produkte und Dienstleistungen sowie die Innovationskraft. Während Szenario II und III auf der unteren Hälfte der Innovationskraftachse platziert sind, zeichnen sich Szenario I und IV durch eine höhere Innovationskraft aus – auch, wenn ihre Treiber sich unterscheiden. Die Unterschiede in der Umsetzungsgeschwindigkeit und Technologiebreite spiegeln sich entlang der horizontalen Achse wider, wobei Szenario I die höchste Vielfalt an Technologien und die höchste Transfergeschwindigkeit aufweist.

Diese Einordnung bietet Ansätze für die Ableitung von Potenzialen und Herausforderungen, mit denen Deutschland konfrontiert ist, während es sich in Richtung der biointelligenten Wertschöpfung bewegt. Sie verdeutlicht die vielfältigen Wege und Strategien, die zur Maximierung des Potenzials biointelligenter Technologien in Deutschland beitragen können. Die Entwicklung und Etablierung einer biointelligenten Wertschöpfung werden dabei von einem komplexen Geflecht von Faktoren beeinflusst, die sowohl fördernd als auch hemmend wirken können.

Über alle Szenarien hinweg lässt sich beobachten, dass die Ausgestaltung biointelligenter Wertschöpfung maßgeblich von den vorhandenen und neu geschaffenen Rahmenbedingungen beeinflusst wird, die

je nach Ausprägung eine fördernde oder hemmende Wirkung entfalten können. Dies zeigt sich besonders deutlich im Bereich der Aktivierung von Kapital und unternehmerischen Aktivitäten im Biointelligenz-Sektor. Rahmenbedingungen, die Investitionen anziehen und unternehmerische Initiativen unterstützen, können die Entwicklung und Etablierung biointelligenter Wertschöpfung erheblich erleichtern (siehe Szenario I und IV). Im Gegensatz dazu können hohe bürokratische Hürden und fehlende Rahmenbedingungen die Innovations- und unternehmerischen Aktivitäten in einem Land stark beeinträchtigen (siehe Szenario III).

Die Gestaltung eines klaren Narrativs ist enorm relevant. So kann biointelligente Wertschöpfung als Lösungsansatz für globale gesellschaftliche Herausforderungen sowie als Stellhebel für Nachhaltigkeit verstanden werden. Eine klare Kommunikation der Vorteile für die Umwelt und die Gesellschaft könnte treibende Kraft für die Entwicklung und Etablierung biointelligenter Wertschöpfung sein (siehe Szenario I). Hingegen kann eine gesplante beziehungsweise unklare Sichtweise oder gar eine grundlegend negative Haltung gegenüber dem Thema einen zentralen hemmenden Faktor darstellen (siehe Szenario II und III).

Ein weiterer Faktor ist die treibende Kraft innerhalb der Szenarien. Hier unterscheiden sich die Szenarien dahingehend, welche Akteursgruppe das Thema primär vorantreibt. Während biointelligente Wertschöpfung in Szenario I von allen Akteuren gleichermaßen verfolgt wird, wird das Thema in Szenario II vor allem durch den Staat und in Szenario IV primär durch private Unternehmen vorangebracht. Insbesondere in Szenario I und IV verlässt das Thema die Expertise und wird darüber hinaus betrachtet.

Der Blick auf die verfolgten Technologiebereiche, wie die Fokussierung auf Kernkompetenzen (Szenario IV) oder den Versuch, alle Bereiche aus eigener Kraft zu bedienen (Szenario I), verdeutlicht, dass eine strategische Betrachtung des Themas innerhalb eines Landes oder einer Region die Etablierung und Entwicklung biointelligenter Innovations- und Wertschöpfungsnetzwerke beeinflussen kann. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach der Rolle internationaler Zusam-

menarbeit und Kooperation ebenfalls als entscheidend heraus, da diese die Ausgestaltung biointelligenter Innovationstätigkeit und Wertschöpfung sowie den Zugang zu wichtigen Ressourcen (siehe Szenario II–IV) beeinflussen kann. Sie gewinnt vor dem Hintergrund geopolitischer Konflikte zunehmend an Relevanz.

Ferner wird das Thema der (Weiter-)Bildung und Qualifikation, insbesondere in den MINT-Bereichen, zu einem entscheidenden Faktor für biointelligente Wertschöpfung. Für jegliches Engagement im Rahmen biointelligenter Wertschöpfung sind ausgebildete Fachkräfte notwendig – unabhängig davon, ob sie an staatlichen Institutionen ausgebildet (Szenario I) oder eigeninitiativ durch die Unternehmen aus- und weitergebildet werden (Szenario IV). Es ist essenziell, die Komplexität der naturwissenschaftlichen Bereiche, die sich in der biointelligenten Wertschöpfung kreuzen, zu erfassen und zu verstehen, damit Innovation im Konvergenzbereich möglich und durch konstante Weiterbildung sowie einen starken Innovationsgeist vorangebracht wird.

## 7. FAZIT UND AUSBlick

# KERNERGEBNISSE

Zum Abschluss der vorliegenden Untersuchung Internationaler Benchmark Biointelligenz werden hier die wesentlichen Kernergebnisse zusammengefasst. Anschließend werden die Grenzen der Untersuchung aufgezeigt, um die Interpretation der Ergebnisse in einen angemessenen Kontext zu stellen sowie ein Ausblick gegeben.

## Biointelligente Wertschöpfung als ein Treiber der ökologischen und ökonomischen Erneuerung

Die Transformation der traditionellen Wirtschaft in eine nachhaltige Wirtschaft ist sowohl für die Gesellschaft als auch für die Unternehmen von zentraler Bedeutung, um die aktuellen Herausforderungen unserer Zeit zu bewältigen. Die zunehmende Instabilität komplexer globaler Lieferketten aufgrund geopolitischer Krisen, Umwelt- und Naturkatastrophen oder Pandemien erschwert die Gewährleistung von zuverlässigen und nachhaltigen Lieferketten. Die Bewältigung des steigenden Abfallaufkommens und die Sicherstellung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung, insbesondere für Hochtechnologien, sind ebenfalls drängende Themen. Die Entkopplung des Ressourcenverbrauchs von der Wirtschaftsleistung ist für ein nachhaltiges Wirtschaften unerlässlich. Dies erfordert den Übergang zu kreislauforientierten Wirtschaftsmodellen und die Entwicklung neuer Technologien zur Wiederverwertung und effizienten Nutzung von Ressourcen. Ein weiterer Engpass ist der zunehmende Fachkräftemangel, der die Fähigkeit der Unternehmen einschränkt, innovative Lösungen für diese komplexen Probleme zu entwickeln und umzusetzen. Darüber hinaus stellen die Auswirkungen eines ungesunden Lebensstils und Umwelteinflüsse auf die Gesundheit eine wachsende Herausforderung dar. Der demografische Wandel verschärft diese Probleme zusätzlich und erfordert einen ganzheitlichen Ansatz in der Gesundheitsversorgung. Gleichzeitig verändern sich die Bedürfnisse, Konsummuster und Verhaltensweisen der Menschen, so dass auch auf Seiten der Nachfrage ein erheblicher Veränderungsdruck entsteht. Diese vielschichtigen Herausforderungen werden zudem im aktuellen Global Risk Report für

das nächste Jahrzehnt hervorgehoben. Dieser identifiziert insbesondere die Verschärfung von Umweltproblemen wie Klimawandel und Ressourcenknappheit als drängende Risiken für die Zukunft.

Diese globalen Dynamiken haben zur Folge, dass auch in der Vergangenheit hochinnovative Wirtschaftszweige in Deutschland einem massiven Veränderungsdruck ausgesetzt sind und ein akuter Handlungsbedarf für eine zukunftsorientierte Transformation der Wirtschaft in Richtung einer nachhaltigen Wertschöpfung nicht von der Hand zu weisen ist. Biointelligente Wertschöpfung stellt einen der meistversprechenden Innovationspfade dar, um dieses Ziel zu erreichen.

Biointelligente Systeme haben ein erhebliches Potenzial, die heute vorherrschenden Produktionsmuster in den Bedürfnisfeldern Energie, Konsum, Ernährung, Wohnen und Gesundheit zu verändern und mit innovativen Ansätzen zur Lösung der elementaren Herausforderungen beizutragen. Als Querschnittstechnologie erschließen sie neue Wirtschaftszweige, die zur regionalen Resilienz und Ressourcenschonung beitragen, indem sie in sogenannten Nicht-Expertensystemen nahezu verschwendungsfrei hochindividualisierte Güter autonom vor Ort produzieren können. Sie nutzen u. a. biogene Ressourcen, die häufig in Form von Abfallströmen vorliegen, realisieren die Verlagerung der Wertschöpfung zum Nutzer und können damit auch den Fachkräftemangel mildern.

## Die Biointelligente Wertschöpfung im internationalen Wettlauf

Nachdem das Konzept der Biointelligenz in Deutschland maßgeblich durch die vom BMBF geförderte Voruntersuchung BIOTRAIN geprägt wurde, zeigt sich

inzwischen eine internationale Dynamik mit vielfältigen neuen Untersuchungen und Studien.

Die Szenariostudie „Biologisierung der Industrie 2035“ des VDMA ordnet das Potenzial der biologischen Transformation, ihre internationale Bedeutung und die Herausforderungen für Wettbewerb, Bildung, Gesellschaft und Regulierung ein und gibt Handlungsempfehlungen für Unternehmen, Forschung und Politik. Ebenso untersucht das McKinsey Global Institute die Innovationskraft und das wirtschaftliche Potenzial der biologischen Transformation auf globaler Ebene. Insbesondere wurden bereits das zukünftige Marktpotenzial und -volumen u. a. von Verbraucherprodukten und Dienstleistungen, Gesundheit und Landwirtschaft modelliert sowie jährliche potenzielle direkte wirtschaftliche Auswirkungen im Jahr 2030-2040 bestimmt. Das Whitepaper der ManuFUTURE-Subplattform BIM zeigt die Schaffung eines Innovationsraumes durch biointelligente Wertschöpfung auf und schlägt Maßnahmen zu dessen strukturierter Erschließung vor. Die acatech Diskussion „Materialforschung: Impulsgeber Natur“ beschreibt das Innovationspotenzial biologisch inspirierter Materialien und Werkstoffe und zeigt anhand ausgewählter Interviews eine internationale Perspektive der bioinspirierten Materialforschung auf.

Die bisherigen Untersuchungen und Studien sind eine gute Grundlage und geben wertvolle Impulse für den Internationalen Benchmark Biointelligenz. Während die bisherigen Veröffentlichungen meist einen spezifischen Fokus auf eine Branche oder Region hatten oder generisch die globale Ebene betrachteten, fehlte ein länderspezifischer internationaler Vergleich und eine systematische Analyse der internationalen Industrie- und Forschungslandschaft sowie deren Technologien, Produkte und Dienstleistungen. All dies wurde in dieser Untersuchung aufgegriffen. Damit stellt InBenBio eine Erweiterung und Ergänzung vorliegender Studien und Untersuchungen dar.

## Globale Perspektiven: Benchmark-Analyse biointelligenter Wertschöpfungssysteme

Der Untersuchungsrahmen der vorliegenden Untersuchung umfasst eine Bewertung der Aktivitäten Deutschlands im Vergleich zu zehn Leitländern, da-

runter Australien, China, Finnland, dem Vereinigten Königreich und Irland, Israel, Kanada, die Niederlande, Norwegen, Schweden und die USA. Dazu wurden relevante Rahmenbedingungen und die Innovationsfähigkeit der einzelnen Länder sowie die aktuelle Umsetzung biointelligenter Wertschöpfung analysiert. Teil dieser Analyse war die Untersuchung der jeweiligen Forschungs- und Industrielandschaft, wobei alle relevanten Akteure sowie biointelligente Technologien, Produkte und Dienstleistungen einschließlich wesentlicher wissenschaftlicher Publikationen und Patente identifiziert wurden. Um die Erkenntnisse aus der Analyse der weltweiten Aktivitäten zu erweitern und zu vertiefen, wurden insgesamt 79 persönliche Interviews Experten aus den Bereichen Forschung, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft geführt. Mit Hilfe einer eigens entwickelten Benchmark-Systematik wurden die Potenziale der Leitländer in 14 Fokusthemenfeldern bewertet, um eine mögliche zukünftige Schlüsselrolle im Kontext der biointelligenten Wertschöpfung zu identifizieren. Diese umfasst die Analyse der institutionellen und finanziellen Rahmenbedingungen je Leitland. Darüber hinaus wurden mögliche Entwicklungspfade bis zum Jahr 2040 in Deutschland skizziert. Die kontinuierliche Einbindung eines Expertenbeirats sowie zahlreiche Fachgespräche und Workshops stellten eine umfassende Beteiligung unterschiedlicher Interessengruppen und die Integration spezifischen Fachwissens sicher.

## Eine neue Dimension der Hochtechnologie und ihre globale Verbreitung

Insgesamt wurden 691 Akteure mit direktem Bezug zur biointelligenten Wertschöpfung in den Leitländern identifiziert. Davon entfallen 15% auf Hochschulen und Forschungseinrichtungen, 2% auf Netzwerke und 83% auf Unternehmen. Die Analyse der Industrie- und Forschungslandschaft zeigt eine Zunahme der Akteure im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung um 417% seit dem Jahr 2000. Eine Mehrheit von 53% aller Akteure gehört zur Kategorie der Kleinst- und Kleinunternehmen. Besonders prominent sind die Akteure im Bedürfnisfeld Gesundheit mit über 60% vertreten. An zweiter Stelle steht der Bereich Ernährung mit rund 27%, gefolgt vom Bereich Konsum mit 23%. Vergleichsweise geringe Anteile haben dagegen der Bereich Energie mit 17% und der Bereich

Bauen und Wohnen mit 11 %. Spitzenreiter bei den Ländern sind die USA mit mehr als einem Drittel der Akteure, wobei sich im Silicon Valley, in Massachusetts und in New York Zentren der biointelligenten Wertschöpfung herausgebildet haben. Deutschland liegt mit einer signifikanten Anzahl von Akteuren an zweiter Stelle, wobei ein überdurchschnittlicher Anteil an Forschungseinrichtungen zu verzeichnen ist. Schwerpunktregionen wurden in Stuttgart, München und Berlin identifiziert. Neben den genannten führenden Ländern zeichnen sich weitere Länder wie Italien, Singapur oder Südkorea durch erste Ansätze aus, zukünftig eine tragende Rolle einzunehmen.

Im Rahmen der Technologieanalyse wurden 17 wesentliche Befähigertechnologiefelder definiert und für eine Marktanalyse in insgesamt 83 Marktsegmente unterteilt und hinsichtlich des Marktvolumens, des Marktwachstums bis 2030 und 2040 und des notwendigen Anfangsinvestitionsvolumens untersucht. Insgesamt wurden 414 Technologien, Produktionssysteme, Produkte und Dienstleistungen im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung in den Leitländern identifiziert. Davon können 259 bereits als (nahezu) biointelligent bezeichnet werden. Den größten Anteil an diesen identifizierten Technologien, Produktionssystemen, Produkten und Dienstleistungen haben wiederum die USA mit 34 %. Deutschland folgt den USA mit einem Anteil von 21 % der Technologien, Produktionssysteme, Produkte und Dienstleistungen. Im Rahmen der Literaturrecherche konnten insgesamt 15.229 Publikationen zu allen Befähigertechnologiefeldern in den Leitländern identifiziert werden (weltweit ca. 19.904). Die Publikationen zu biointelligenten Technologien, Produkten und Dienstleistungen wachsen erst seit dem Jahr 2017 exponentiell. Die Befähigertechnologiefelder lassen sich anhand der Verteilung von Patentanmeldungen und -erteilungen sowie Publikationen in zwei Gruppen einteilen. Die applikationsorientierten Befähigertechnologiefelder finden bereits heute verstärkt Anwendung in der Praxis. Beispiele hierfür sind Bio-(Hybrid-) und Soft-Robotik, biobasierte Energieerzeugung und -speicherung, biobasierte Mikro- und Nanotechnologie oder Bioprinting und additives Biomanufacturing. Andererseits konnten sehr forschungsorientierte Befähigertechnologiefelder wie Human-Biomachine-Interfaces,

Bio-Computing und Data Storage oder Soft-Sensorik und KI identifiziert werden, die sich genau umgekehrt verhalten. Alle 17 Befähigertechnologiefelder lassen sich in 32 Anwendungskontexte hinsichtlich der Entwicklung, Herstellung und Nutzung des Technologiefelds in den Bedürfnisfeldern Energie, Ernährung, Konsum, Gesundheit und Wohnen einordnen. Der größte Anwendungsfokus liegt derzeit im Bedürfnisfeld Gesundheit.

Deutschland ist in vielen Technologiefeldern Vorreiter in der Grundlagenforschung und bei der Entwicklung wesentlicher Aspekte der biointelligenten Wertschöpfung. Dazu zählen, neben vielen anderen, Smart Greenhouse und Smart Farming, biobasierte Energieerzeugung und -speicherung sowie Bioraffinerien und Bioreaktoren. Die interviewten Experten sind sich einig, dass es in diesem hochdynamischen Umfeld entscheidend ist, das deutsche Engagement kontinuierlich zu stärken und die Lücke zu den USA zu schließen.

Die Marktanalyse zeigt, dass das Gesamtmarktvolumen derzeit 139,9 Mrd. USD beträgt und bis 2030 voraussichtlich auf 402 Mrd. USD anwachsen wird, was einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 12,4 % entspricht. Bis 2040 wird ein Gesamtwachstum von 10 % pro Jahr erwartet, wodurch das Marktvolumen auf 849,3 Mrd. USD ansteigen wird. Die größten Marktsegmente von zunehmend konvergierenden Befähigertechnologien sind Bioraffinerien und Bioreaktoren, Biosensoren und Bioaktoren, Metabolic Engineering und Synthetische Biologie sowie Smart Greenhouse und Smart Farming. Die geringsten Marktvolumina weisen derzeit Biofoundries und Hochdurchsatz-Screening durch Laborautomatisierung, Human-Biomachine-Interfaces sowie Bio-Computing und Data Storage auf. Dabei ist zu beachten, dass sich insbesondere die letztgenannten Befähigertechnologien aktuell stark in der Entwicklung befinden. Für Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Volkswirtschaften ist es daher entscheidend, rechtzeitig in die biointelligente Wertschöpfung zu investieren, um wettbewerbsfähig zu bleiben. In der Regel sind hierzu Anfangsinvestitionen in grundlegende Forschung, Infrastruktur und den Aufbau von Wertschöpfungsketten notwendig.

## Globaler Standpunkt: Das Ergebnis der Benchmark-Analyse biointelligenter Wertschöpfungssysteme

Aus den Ergebnissen des Benchmarkings wird deutlich, dass die USA derzeit das größte Potenzial haben, zukünftig eine Schlüsselrolle in der biointelligenten Wertschöpfung einzunehmen, gefolgt von Deutschland und Schweden. Auf den Plätzen vier bis sieben folgen Finnland, das Vereinigte Königreich und Irland, die Niederlande und Kanada. Die Stärke Deutschlands liegt in seiner vielfältigen Forschungslandschaft, die sich insbesondere durch eine ausgeprägte Grundlagenforschung im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung auszeichnet. Die Entwicklung interdisziplinärer Studiengänge und Ausbildungsberufe trägt dazu bei, qualifizierte Fachkräfte für den Transfer in die industrielle Praxis zu entwickeln. Durch eine geschickte Anpassung an globale Marktveränderungen und ein ausgeprägtes Bewusstsein für die Bedeutung der Wertschöpfung im Bereich der biointelligenten Wertschöpfung hat Deutschland die Chance, seine führende Position weiter auszubauen. Trotz einer breiten Basis an Akteuren und Technologien in diesem Bereich, gibt es deutliche Schwächen bei der Markteinführung von biointelligenten Technologien, Produkten und Dienstleistungen, da diese meist noch auf einem niedrigen TRL-Niveau angesiedelt sind und der Transfer in die Anwendung nur langsam erfolgt bzw. Potenziale nicht vollständig ausgeschöpft werden. Dies wird durch das komplexe deutsche Regulierungssystem und hohe bürokratische Hürden zusätzlich erschwert. Regulierungen, langwierige Zulassungsprozesse und weitere bürokratische Hürden im europäischen Markt werden auch in Deutschland häufig als Hemmnisse für das Unternehmenswachstum wahrgenommen. Neben den in dieser Untersuchung näher betrachteten Ländern gibt es weitere aufstrebende Länder wie Indien, Südkorea, Japan, Frankreich, Italien oder Singapur. Diese gilt es auch in Zukunft, im Auge zu behalten.

Im Rahmen der BIOTRAIN-Voruntersuchung wurde der Status quo in Deutschland im Kontext der Biologischen Transformation bereits erhoben. Ein detaillierter Vergleich der Ergebnisse ist aufgrund des unterschiedlichen Untersuchungsrahmens und des umfassenden methodischen Ansatzes der vorliegenden Untersuchung nicht möglich. Dennoch lässt sich

festhalten, dass sich seit der Veröffentlichung im Jahr 2019 insbesondere die Startup-Szene für eine biointelligente Wertschöpfung in Deutschland gestärkt hat und sich der Abstand in der Anzahl der Akteure zu den USA verringert hat. Zudem wurden grundlegende Forschungsbereiche nochmals vertieft und die Grundlagenforschung gestärkt. InBenBio vertieft die BIOTRAIN-Voruntersuchung besonders durch den internationalen Charakter, systematische Analysen der weltweiten Forschungs- und Industrielandschaft sowie die Einordnung Deutschlands in den internationalen Kontext.

Mit dieser Untersuchung werden Perspektiven für eine zukunftsfähige Gestaltung biointelligenter Wertschöpfungsnetzwerke aufgezeigt. Sie unterstreicht die Dringlichkeit, innovative Lösungen zu entwickeln und umzusetzen, um den ökologischen, ökonomischen und sozialen Herausforderungen unserer Zeit zu begegnen.

# AUSBLICK

## Eine erstrebenswerte Zukunftsperspektive für die biointelligente Wertschöpfung in Deutschland

Die biointelligente Wertschöpfung ist ein entscheidender Baustein für die Etablierung nachhaltiger Wertschöpfungssysteme. Sie bietet nicht nur eine Antwort auf aktuelle Herausforderungen (Vergleiche Kapitel *Aktuelle Trends und Herausforderungen*), sondern eröffnet auch völlig neue Innovationsräume. Durch biointelligente Wertschöpfung können neue Materialien und (biogene) Rohstoffe genutzt, innovative Produktionsverfahren und -technologien entwickelt und neue Produkte geschaffen werden. Darüber hinaus ermöglicht sie die Schaffung völlig neuartiger kreislauffähiger Wertschöpfungsarchitekturen, die sich über alle Branchen erstrecken und damit einen umfassenden Wandel der Wirtschaft ermöglichen.

Eine erstrebenswerte Zukunftsperspektive, die eine biointelligente Wertschöpfung in Deutschland bereithält, wird in einer Kombination aus Szenario I (Rennpferd) und Szenario IV (Huhn) entworfen. Eine detaillierte Beschreibung der Szenarien ist im Abschnitt *Auf dem Weg zur biointelligenten Wertschöpfung: Vier Szenarien für Deutschland* zu finden.

Das für die Etablierung der biointelligenten Wertschöpfung grundlegende florierende Innovationsökosystem, das auf geeigneten regulatorischen Rahmenbedingungen fußt, wird in Deutschland rasch aufgebaut. Junge Unternehmen können ihre Entwicklungschancen durch eine Vielzahl neuer Fördermöglichkeiten für Transfer oder Gründungen aus der Wissenschaft verbessern. Alternativ können sich junge Unternehmen auch Kapital über einen erweiterten privaten Risikokapitalmarkt beschaffen. Durch eine intensive internationale Zusammenarbeit in Innovationsnetzwerken, die alle systemischen Akteure – einschließlich Gesellschaft, Wirtschaft, Forschung und Politik – einbezieht und Aspekte wie Zielorientierung,

Legitimität und Verantwortung berücksichtigt, bilden sich neuartige, nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke. Die Zusammenarbeit zielt insbesondere darauf ab, globale gesellschaftliche Herausforderungen gemeinsam zu bewältigen. Die internationale Zusammenarbeit in Forschung und Entwicklung wird durch den Aufbau von Partnerschaften zwischen Wirtschaft und Wissenschaft sowie durch einen aktiven Transfer von Forschung in Anwendung und Know-how unterstützt. Diese Zusammenarbeit wird durch Initiativen wie die Einrichtung von Gründer- und Translationszentren gestärkt, die eng mit Forschungseinrichtungen, Risikokapitalgebern, Industrie und Gesellschaft vernetzt sind. Es wurde ein Narrativ etabliert, das die Relevanz, die ökologischen und ökonomischen Vorteile der biointelligenten Wertschöpfung für alle Akteure herausstellt und klare Anwendungsfelder exemplarisch aufzeigt. Eine breite gesellschaftliche Akzeptanz der biointelligenten Wertschöpfung stärkt einen Markt für biointelligente Produkte und Dienstleistungen. Attraktive Aus- und Weiterbildungsangebote erhöhen die Attraktivität Deutschlands für (ausländische) Fachkräfte. Biointelligente Wertschöpfungsnetzwerke ermöglichen eine optimale Ressourcennutzung entlang der Wertschöpfungskette sowie eine Verlagerung der Produktion hin zum Nutzer. Ein zentraler Aspekt ist dabei ein hoher Nachhaltigkeitsgrad in den fünf Bedürfnisfeldern Energie, Gesundheit, Konsum, Ernährung und Wohnen. Deutschland positioniert sich international als führender Marktteilnehmer, strebt eine Spitzenposition in etablierten Bereichen an und verstärkt die Erschließung neuer Technologieanwendungen.

Vor diesem Hintergrund bietet die vorliegende internationale Benchmark-Untersuchung einen Überblick über den aktuellen Stand der Entwicklung biointelligenter Wertschöpfungssysteme auf globaler Ebene.

## Ausbau der Position Deutschlands im weltweiten Vergleich

Die Ergebnisse der Untersuchung InBenBio zeigen auf, dass es für Industrie, Wissenschaft, Gesellschaft und Politik gleichermaßen Handlungsbedarf gibt, um Deutschlands gegenwärtige Position zu stärken und im globalen Kontext der biointelligenten Wertschöpfung eine führende Rolle zu übernehmen.

In diesem Zusammenhang zeigt sich im internationalen Vergleich, dass eine offene Kommunikation der Chancen einer biointelligenten Wertschöpfung erstrebenswert ist. Die Möglichkeiten biointelligenter Wertschöpfung beschränken sich nicht auf einen Industriezweig. Vielmehr werden zahlreiche verschiedene Branchen auf unterschiedlichen Ebenen der internationalen Wertschöpfungsnetzwerke von den technologischen Möglichkeiten biointelligenter Technologien beeinflusst. Die zu erwartenden Wettbewerbsvorteile biointelligenter Technologien, wie die Effizienzsteigerung in der Produktion oder die verbesserte Produktqualität durch maßgeschneiderte biologische Ansätze, unterstreichen die Notwendigkeit, den Wissensstand aller beteiligten Akteure zu verbessern. Nur durch ein umfassendes Verständnis biointelligenter Technologien können Unternehmen und die Gesellschaft die Chancen dieser Innovationen erkennen und sinnvoll nutzen. Dieses vertiefte Wissen ermöglicht es, eine frühzeitige strategische Planung und Einführung technologischer Neuausrichtungen voranzutreiben und damit auf die Herausforderungen des sich wandelnden Markts effektiv zu reagieren. Das erfordert eine ganzheitliche Herangehensweise, die auf offener Kommunikation basiert, den Querschnittstechnologiecharakter einer biointelligenten Wertschöpfung und verschiedene Akteure durch unterschiedliche Beteiligungsformate sowie einer klaren Kommunikationsstrategie miteinbezieht. Dies schließt auch die Berücksichtigung ethischer Fragestellungen und die Verankerung in Unternehmenskulturen ein.

Zudem heben die Ergebnisse hervor, dass eine enge Verknüpfung von Forschung und Wirtschaft, nicht nur national, sondern auch international von entscheidender Bedeutung sein kann. Durch diese Zusammenarbeit können Forschungsergebnisse schnell in marktfähige Produkte oder Dienstleistungen umgesetzt werden, was zur Schaffung innovativer Ökosysteme beiträgt und

die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands stärkt. Durch frühzeitiges Engagement von der Industrie unternehmensinterne Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten voranzutreiben und Investitionen in Forschung, Entwicklung und Infrastruktur zu tätigen, können sie nicht nur von den wirtschaftlichen Chancen der biointelligenten Wertschöpfung profitieren, sondern auch einen nachhaltigen Beitrag zur Lösung globaler Herausforderungen leisten. Bspw. bieten Translationszentren eine ideale Plattform, um den gesamten Entwicklungsprozess von der initialen Idee bis hin zum marktreifen Produkt abzudecken, indem sie als Knotenpunkt für gemeinsame Forschungsprojekte fungieren und eine Plattform für die Kooperation zwischen Unternehmen, Startups sowie Forschungs- und Wissenschaftseinrichtungen bieten. Darüber hinaus tragen sie dazu bei, Akteure aus allen drei Disziplinen Bio-, Hard, und Software der Biointelligenz zusammenzubringen um den Austausch von Ideen und Wissen zwischen verschiedenen Disziplinen zu unterstützen. Durch diese Zusammenarbeit können Forschungsergebnisse schnell in marktfähige Produkte oder Dienstleistungen umgesetzt werden, was zur Schaffung innovativer Ökosysteme beiträgt und die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands stärkt. Die Untersuchung hebt ebenfalls die Bedeutung von Bildungs- und Qualifizierungsprogrammen hervor, die dazu beitragen, Fachkräfte für die Anforderungen einer biointelligenten Wertschöpfung zu qualifizieren. Dies umfasst nicht nur die Schulung von Mitarbeitern in Unternehmen, sondern auch die Stärkung praxisorientierter Ausbildungswege und die Schaffung interdisziplinärer Studiengänge, um den wachsenden Anforderungen gerecht zu werden. Dies gilt für die Mitarbeitende in den Unternehmen, aber auch für den verstärkten Ausbau praxisorientierter Ausbildungswege sowie die Etablierung interdisziplinärer Studiengänge.

Angesichts der vielversprechenden Perspektiven, die die biointelligente Wertschöpfung bietet und der aktuellen Position Deutschlands, ist es unerlässlich, dass alle Akteure – von der Gesellschaft über die Forschungseinrichtungen und die Industrie bis hin zur Politik – an einem Strang ziehen und gemeinsam handeln. Es ist an der Zeit, diese nachhaltige Form der industriellen Wertschöpfung anzunehmen und sich dafür zu engagieren. Es liegt an uns allen, die Zukunft zu gestalten und biointelligente Wertschöpfung zu einem zentralen Bestandteil unserer Wirtschaft zu machen.

# GRENZEN DER UNTERSUCHUNG

Die durchgeführte Untersuchung unterliegt einigen Limitationen. Im Folgenden werden diese Grenzen entsprechend aufgeführt und näher erläutert. Die Ausführungen haben das Ziel, die Transparenz der Untersuchung zu maximieren und eine vollständige Darstellung zu ermöglichen.

## Grenzen der Recherche biointelligenter Technologien, Produkte und Dienstleistungen sowie Akteure

Für diese Untersuchung wurden die Recherchemethoden zu Technologien, Akteuren, Literatur und Patenten gezielt so ausgewählt, dass ein umfassendes Bild der biointelligenten Wertschöpfung gezeichnet werden kann. Dennoch unterliegt auch diese Vorgehensweise und ihrer Recherchemethodik bestimmten Einschränkungen.

Insbesondere bei der Akteurs- und Technologierecherche mit der Unternehmensdatenbank Delphai traten zwei wesentliche Herausforderungen auf. Delphai übersetzt zwar automatisch aus den meisten Sprachen der Welt ins Englische und liefert dementsprechend auch englische Ergebnisse. Stimmt die automatische Übersetzung der Inhalte jedoch nicht mit den im Englischen definierten Suchbegriffen überein, werden diese von Delphai nicht erfasst. Dies betrifft maßgeblich auch die Ergebnisse für China. Zudem führte die vorläufige Festlegung von Leitländern zu Einschränkungen. Die Vorgehensweise ermöglichte zwar eine fokussierte Analyse, aber insbesondere die Akteursrecherche war mit wenigen Ausnahmen auf die Leitländer beschränkt, entweder durch gezielte Einzelsuchen oder aufgrund der Bekanntheit, und gestattet keine Verallgemeinerungen über diesen Rahmen hinaus. Delphi verwendet einen Algorithmus, der auf eine Vielzahl spezifischer Quellen zugreift, aber keine Vollständigkeit der Ergebnisse garantieren kann, da nur auf öffentlich zugängliche Quellen zugegriffen wird. So können nur Akteure gefunden werden, die öffentlich kommunizieren, dass sie in bestimmten Technologiefeldern aktiv sind oder bereits Produkte oder Dienstleistungen im Bereiche der bio-

intelligenten Wertschöpfung anbieten. Die Datenbank enthält ca. 25 Mio. Unternehmensprofile, während die Zahl der Unternehmen weltweit auf ca. 330 Mio. geschätzt wird. Damit sind nur etwa 7,5 % der Unternehmen weltweit in der Datenbank enthalten. Um diese Einschränkung auszugleichen, wurde versucht, diese Lücke durch eine zusätzliche manuelle Suche nach Forschungseinrichtungen und Unternehmen so weit wie möglich zu schließen.

Diese Herausforderung zeigt sich auch bei der Analyse der TRL, die im Durchschnitt recht hoch sind. Dies liegt jedoch in der Natur der Suchmaschine und hat nicht zwingend etwas damit zu tun, dass die biointelligenten Technologien, Produkte und Dienstleistungen, die gefunden wurden, generell schon ausgereift sind. Da jedoch der Anteil der Geschäftsprofile relativ zur Bevölkerungsanzahl annähernd repräsentativ ist (mit Ausnahme von China), kann der Umfang der Datenbank als Stichprobe betrachtet werden. Somit sind zumindest relative Aussagen möglich. Die absolute Anzahl der gefundenen Technologien ist jedoch wahrscheinlich wesentlich geringer. Alle in der Untersuchung aufgelisteten Akteure, Technologien, Produkte, Dienstleistungen und Konzepte sind als Best Practices zu verstehen, die erst einen kurzen Weg auf dem Konvergenzpfad aus Lebens-, Ingenieur- und Informationswissenschaften zurückgelegt haben.

Auch die Literaturrecherche weist Grenzen auf. Obwohl Web of Science einen erheblichen Umfang hat, insbesondere im Bereich der Naturwissenschaften, umfasst es dennoch nicht sämtliche weltweit veröffentlichten Daten. Eine allgemeine Grenze ist die Beschränkung der Suchsprache auf Englisch und Deutsch. Nichtsdestotrotz ermöglicht die Analyse Aus-

sagen über Steigerungen und Verteilungen der Veröffentlichungen im Kontext der Befähigungstechnologien und in den Ländern.

## Grenzen der Marktvolumen-Analyse

Die Abschätzung der initialen Marktkennzahlen erfolgte mittels ChatGPT, da sich die betrachteten Technologien, Produkte und Dienstleistungen größtenteils noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden und bisher nur wenig valide Erkenntnisse über die aktuellen und zukünftigen Märkte vorliegen. Die definierten Marktsegmente sind zudem sehr spezifisch und nur in wenigen Fällen direkt durch Marktberichte oder ähnliche Veröffentlichungen abgebildet. Zudem gibt es derzeit noch zu wenige Akteure, die sich mit biointelligenter Wertschöpfung beschäftigen, so dass herkömmliche Analysen (Bottom-up-Berechnungen, Proxy-Werte etc.) nur schwer durchführbar sind. Vor diesem Hintergrund dient die Schätzung durch ChatGPT als Ausgangspunkt für weitere Prognosen durch Experten und die Validierung durch möglichst repräsentative Marktberichte. In der Vergangenheit konnte bereits gezeigt werden, dass der Einsatz von ChatGPT bei der Prognose von Finanzkennzahlen zu besseren Vorhersagen führen kann als klassische Methoden. Dabei werden statistische Wahrscheinlichkeiten und Mustererkennung genutzt, die zu validen Ergebnissen bei der Prognose zukünftiger Daten führen (184). Dennoch ist die initiale Abschätzung durch ChatGPT mit Unsicherheiten behaftet. Dies resultiert aus der eingeschränkten Fähigkeit des Modells, präzise Informationen zu spezifischen Sachverhalten zu generieren. Ungenaue Eingabeaufforderungen und die begrenzte Datenbasis bis zum Trainingszeitpunkt tragen zu dieser Unsicherheit bei. Daher ist eine vorsichtige Interpretation und Anwendung der von ChatGPT gelieferten Werte in Forschungskontexten ratsam.

## Grenzen des Benchmarkings

Neben der im Kapitel genannten Hinweise, unterliegt das Benchmarking weiteren Limitationen. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Expertenbefragung keine gleichmäßige Verteilung der teilnehmenden Länder und Themenfelder aufweist, was potenziell zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen könnte. Hier ist insbesondere China zu nennen. Aber auch für andere Länder muss auf die Einschränkung der Repräsen-

tativität aufgrund der Beschränkungen in der Zusammensetzung der Stichprobe hingewiesen werden. Dies betrifft u. a. die Ergebnisse für Norwegen sowie für die Niederlande. Hier besteht ein besonderes Forschungspotenzial für weiterführende Analysen. Zur Verbesserung der Datenbasis wird hier insbesondere die Plausibilisierung über verschiedene Datenbankwerte durchgeführt.

Die Beschränkung des Untersuchungsrahmens auf zehn Leitländer könnte auch dazu geführt haben, dass andere aufstrebende Staaten in dieser Untersuchung nicht ausreichend berücksichtigt wurden. Trotz dieser Grenzen bietet diese Untersuchung wertvolle Erkenntnisse und Einblicke in die aktuelle Umsetzung einer biointelligenten Wertschöpfung sowie des Potenzials der Leitländer, zukünftig eine Schlüsselrolle einzunehmen.

## Grenzen der Szenariotechnik

Die Erkenntnisse der Szenario-Analyse dienen nicht einer Vorhersage oder Vorausschau, sondern der systematischen Auseinandersetzung mit möglichen Zukünften.

Die identifizierten Einflussfaktoren, die im Workshop gebildeten Annahmen sowie die Befüllung der Konsistenzmatrix und die Beschreibung der Szenarien unterliegen subjektiven Einschätzungen und Vorstellungen. Hier wurde durch die Beteiligung des Industrie- und Expertenbeirats Sorge getragen, diese Subjektivität zu relativieren.

Die Szenariotechnik wurde im Rahmen dieser Untersuchung mit der Zielsetzung einer Betrachtung der biointelligenten Wertschöpfung mit dem Fokus auf Technologien, Produkte und Dienstleistungen in Deutschland angesetzt. In der Folge wurden andere Aspekte, die Einfluss nehmen könnten, nicht betrachtet. Trotz des Fokus auf Deutschland wurden auch Entwicklungen im Kontext der EU und des internationalen Marktes und der Politik angeschaut. Eine umfassende Abbildung der möglichen zukünftigen Geschehnisse in den weiter betrachteten Ländern wurde jedoch vor dem Hintergrund der zunehmenden Komplexität außen vorgelassen.

# LITERATURVERZEICHNIS

- Richardson K, Steffen W, Lucht W, Bendtsen J, Cornell SE, Donges JF et al. Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science advances*, 2023, 9, 37. DOI: 10.1126/sciadv.adh2458.
- International Resource Panel, Stefan Brinzeu, Anu Ramaswami, Heinz Schandl, Meghan O'Brien, Rylie Pelton et al. *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want*; United Nations: New York, 2020; ISBN 9789280737417.
- Prognos AG, Z\_punkt GmbH, The Foresight Company. *Studie – Zukunft von Wertvorstellungen der Menschen in unserem Land*: Köln, Deutschland, 2020.
- Boston Consulting Group, *Hello Tomorrow. Nature Co-Design: A Revolution in the Making*: Berlin, Deutschland, 2021.
- Chui, M., Evers, M., Zheng A, Manyika J, Nisbet T. *The Bio Revolution: Innovations transforming economies, societies, and our lives*, 2020.
- Grinin LE, Grinin AL, Korotayev A. Forthcoming Kondratieff wave, Cybernetic Revolution, and global ageing. *Technological Forecasting and Social Change*, 2017, 115. DOI: 10.1016/j.techfore.2016.09.017.
- Miehe R, Bauernhansl T, Schwarz O, Traube A, Lorenzoni A, Waltersmann L et al. The biological transformation of the manufacturing industry – envisioning biointelligent value adding. *Procedia CIRP*, 2018, 72. DOI: 10.1016/j.procir.2018.04.085.
- Byrne G, Dimitrov D, Monostori L, Teti R, van Houten F, Wertheim R. Biologicalisation: Biological transformation in manufacturing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2018, 21. DOI: 10.1016/j.cirpj.2018.03.003.
- Miehe R, Waltersmann L, Sauer A, Bauernhansl T. Sustainable production and the role of digital twins – Basic reflections and perspectives. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*, 2021, 3, 2. DOI: 10.1002/amp2.10078.
- Hauff V. *Unsere gemeinsame Zukunft*; Eggenkamp Verlag: Greven, Deutschland, 1987; ISBN 9783923166169.
- Acemoglu D, Johnson S. *Power and progress: Our thousand-year struggle over technology and prosperity*; PublicAffairs: New York, USA, 2023; ISBN 9781541702530.
- Edquist C. *The Systems of Innovation Approach and Innovation Policy: An Account of the State of the Art*; DRUID Conference: Aalborg, Dänemark, 2001.
- Lundvall B, Vang J, Joseph KJ. *Innovation System Research and Developing Countries*. In: Lundvall B, Joseph KJ, Chaminade C, Vang J, editors. *Handbook of Innovation Systems and Developing Countries*. Edward Elgar Publishing; 2009.
- Markard J. The life cycle of technological innovation systems. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 153. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.07.045.
- Carlsson B, Jacobsson S, Holmén M, Rickne A. Innovation systems: analytical and methodological issues. *Research Policy*, 2002, 31, 2. DOI: 10.1016/S0048-7333(01)00138-X.
- Carlsson B, Stankiewicz R. On the nature, function and composition of technological systems. *Journal of Evolutionary Economics*, 1991, 1, 2. DOI: 10.1007/BF01224915.
- Archibugi D, Lundvall B-<sup>o</sup>, editors. *The globalizing learning economy*. publ. new as pbk. Oxford, Vereinigtes Königreich: Oxford University Press; 2002.
- Linstone HA. When is a need a need? *Technological Forecasting*, 1969, 1, 1. DOI: 10.1016/0099-3964(69)90006-4.
- Edquist C. *Systems of Innovation: Perspectives and Challenges*. In: Fagerberg J, Mowery DC, Nelson RR, editors. *The Oxford handbook of innovation*. Reprinted. Oxford: Oxford Univ. Press; 2005. p. 181–208.
- Alkemade F, Kleinschmidt C, Hekkert M. Analysing emerging innovation systems: a functions approach to foresight. *International Journal of Foresight and Innovation Policy*, 2007, 3, 2. DOI: 10.1504/IJFIP.2007.011622.
- Geels FW. From sectoral systems of innovation to socio-technical systems. *Research Policy*, 2004, 33, 6-7. DOI: 10.1016/j.respol.2004.01.015.
- Hekkert MP, Suurs R, Negro SO, Kuhlmann S, Smits R. Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change. *Technological Forecasting and Social Change*, 2007, 74, 4. DOI: 10.1016/j.techfore.2006.03.002.
- Dutta S, Lanvin B, Wunsch-Vincent S, León LR, World Intellectual Property Organization. *Global innovation index 2022*; Global Innovation Index: Genf, Schweiz, 2022.
- World Economic Forum. *Energy Transition Index Report*: Genf, Schweiz, 2021.
- World Economic Forum. *Global Competitiveness Report 2019*: Genf, Schweiz, 2019.
- Bruno I, Lobo G, Covino BV, Donarelli A, Marchetti V, Panni AS et al. Technology readiness revisited. *ICEGOV ,20: Proceedings of the 13th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance*. DOI: 10.1145/3428502.3428552.
- Paun F. "Demand Readiness Level" (DRL), a new tool to hybridize Market Pull and Technology Push approaches: Evolution of practices and actors of eco-innovation.; ANR ERANET Workshop: Paris, Frankreich, 2011.
- Solberg Hjorth S, Brem A. How to Assess Market Readiness for an Innovative Solution: The Case of Heat Recovery Technologies for SMEs. *Sustainability*, 2016, 8, 11. DOI: 10.3390/su8111152.
- Sausser B, Verma D, Ramírez-Márquez J, Gove R. From TRL to SRL: The Concept of Systems Readiness Levels. *Proceedings of the Conference on Systems Engineering Research (CSER)*, 2006.
- Innovation Fund Denmark. *Societal Readiness Levels (SRL) defined according to Innovation Fund Denmark*: Kopenhagen, Dänemark, 2018.
- Bernstein MJ, Nielsen MW, Alnor E, Brasil A, Birkving AL, Chan TT et al. The Societal Readiness Thinking Tool: A Practical Resource for Maturing the Societal Readiness of Research Projects. *Science and engineering ethics*, 2022, 28, 1. DOI: 10.1007/s11948-021-00360-3.
- Hallstedt SI. Sustainability criteria and sustainability compliance index for decision support in product development. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.06.068.
- Alqudaib OA. A quick way to measure sustainability. Verfügbar auf: <https://www.supplychainquarterly.com/articles/5705-a-quick-way-to-measure-sustainability> (Letzter Zugriff am 15.02.2024).
- Ellen Macarthur Foundation. *Towards a Circular Economy: Business rationale for an accelerated transition*, 2015.
- Pyka A. Innovation networks in economics: from the incentive-based to the knowledge-based approaches. *European Journal of Innovation Management*, 2002, 5, 3. DOI: 10.1108/14601060210436727.
- Dosi G. Technological paradigms and technological trajectories. *Research Policy*, 1982, 11, 3. DOI: 10.1016/0048-7333(82)90016-6.
- Europäische Kommission. *Empfehlung der Kommission vom 6. Mai 2003 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen (2003/361/EG)*; Amtsblatt der Europäischen Union: Brüssel, Belgien, 2003.
- Startup-Verband. *Startup-Verband – Die Unternehmen der Zukunft*, 2023. Verfügbar auf: <https://startupverband.de/> (Letzter Zugriff am 18.12.2023).
- Europäische Kommission. *Technology readiness level; Horizon 2020 – Work Programme*, 2014.

40. Dönitz EJ. Effizientere Szenariotechnik durch teilautomatische Generierung von Konsistenzmatrizen: Empirie, Konzeption, Fuzzy- und Neuro-Fuzzy-Ansätze; Gabler: Wiesbaden, 2009; ISBN 978-3-8349-1668-6.
41. Gausemeier J, Plass C. Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung: Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen; Hanser: München, Deutschland, 2014; ISBN 978-3-446-43631-2.
42. Pyka A, Prettner K. Economic Growth, Development, and Innovation: The Transformation Towards a Knowledge-Based Bioeconomy. In: Lewandowski I, Lask J, Maier J, Tchouga B, Vargas-Carpintero R, editors. Bioeconomy: Shaping the transition to a sustainable, biobased economy. 1st edition 2018. Cham, Switzerland, Hohenheim: Springer Open; University of Hohenheim; 2018. p. 331–42.
43. Global Footprint Network. Earth Overshoot Day home – #Move-TheDate, 2023. Verfügbar auf: <https://overshoot.footprintnetwork.org/> (Letzter Zugriff am 22.11.2023).
44. Umweltbundesamt. Konsum und Produkte, 2022. Verfügbar auf: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/konsum-produkte> (Letzter Zugriff am 22.11.2023).
45. Terlau W, Hirsch D. Sustainable Consumption and the Attitude-Behaviour-Gap Phenomenon – Causes and Measurements towards a Sustainable Development, 2015.
46. Lehmann K, Renz D, Huber F. Nun sag', wie hast du's mit der Nachhaltigkeit? Verfügbar auf: [https://www.ey.com/de\\_de/consumer-products-retail/studie-nachhaltigkeit-deutscher-konsumentinnen](https://www.ey.com/de_de/consumer-products-retail/studie-nachhaltigkeit-deutscher-konsumentinnen) (Letzter Zugriff am 15.02.2024).
47. Kraas V, Bauske B. Mikroplastik in der Umwelt: Hintergrundpapier; WWF Deutschland: Berlin, Deutschland, 2022.
48. Full J, Shoshi A, Gamero E, Baumgarten Y, Protte K, Kiemel S et al. Biointelligent Waste-to-X systems: A novel concept for sustainable, decentralized and interconnected value creation. *Procedia CIRP*, 2023, 116. DOI: 10.1016/j.procir.2023.02.097.
49. ifo Institut – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e. V., Flach L, Teti F, Gouverich I, Scheckenhofer L, Grandum L. Wie abhängig ist Deutschland von Rohstoffimporten?: Eine Analyse für die Produktion von Schlüsseltechnologien: München, Deutschland, 2022.
50. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ). Lieferketten: Globalisierung gerecht gestalten, 2023. Verfügbar auf: <https://www.bmz.de/de/themen/lieferketten> (Letzter Zugriff am 15.02.2024).
51. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ). Lieferketten und Wertschöpfungsketten, 2023. Verfügbar auf: <https://www.bmz.de/de/themen/lieferketten> (Letzter Zugriff am 15.02.2024).
52. Welsby D, Price J, Pye S, Ekins P. Unextractable fossil fuels in a 1.5°C world. *Nature*, 2021, 597, 7875. DOI: 10.1038/s41586-021-03821-8.
53. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ). Energie und Klima, 2022. Verfügbar auf: <https://www.bmz.de/de/themen/klimawandel-und-entwicklung/energie-und-klima#:~:text=Der%20Energiesektor%20hat%20einen%20gro%C3%9Fen,Ausstieg%20aus%20fossilen%20Energien%20erfordert> (Letzter Zugriff am 15.02.2024).
54. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen – Status Quo in Deutschland; Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe.
55. Fraunhofer Gesellschaft. Grüner Wasserstoff aus Pflanzenresten, 2022. Verfügbar auf: <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2022/juli-2022/gruener-wasserstoff-aus-pflanzenresten.html> (Letzter Zugriff am 15.02.2024).
56. Deutsche Energie-Agentur GmbH. Biomass to Liquid – BtL: Realisierungsstudie: Berlin, Deutschland, 2006.
57. Wietschel M, Plötz P, Pfluger B, Klobasa M, Eßer A, Haendel M et al. Sektorkopplung: Definition, Chancen und Herausforderungen; Working Paper Sustainability and Innovation: Karlsruhe, Deutschland, 2018.
58. Laroussi I, Huan L, Xiusheng Z. How will the internet of energy (IoE) revolutionize the electricity sector? A techno-economic review. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 72. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.07.323.
59. Jörß W, Emele L, Moosmann L, Graichen J. Challenges for the accounting of emerging negative and zero/low emission technologies; Öko-Institut Working Paper: Freiburg, Deutschland, 2022.
60. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Habeck gibt Startschuss für wichtige Nord-Süd-Stromtrasse „SuedLink“, 2023. Verfügbar auf: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/07/20230727-habeck-gibt-startschuss-fur-wichtige-nord-sud-stromtrasse.html> (Letzter Zugriff am 15.11.2023).
61. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Intelligente Netze. Verfügbar auf: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/intelligente-netze.html> (Letzter Zugriff am 13.12.2023).
62. Ouboter HT, Berben T, Berger S, Jetten MSM, Sleutels T, Heijne A ter et al. Methane-Dependent Extracellular Electron Transfer at the Bioanode by the Anaerobic Archaeal Methanotroph „Candidatus Methanoperedens“. *Frontiers in microbiology*, 2022, 13. DOI: 10.3389/fmicb.2022.820989.
63. Umweltbundesamt. Wohnen, 2023. Verfügbar auf: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen> (Letzter Zugriff am 22.11.2023).
64. Kahlenborn W, Porst L, Voß M, Fritsch U, Renner K, Zebisch M et al. Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021 (Kurzfassung); *Climate Change*, 2021.
65. Deutsche Gesellschaft für die Vereinten Nationen e.V. Die Verstärkung der Welt, 2022. Verfügbar auf: [https://nachhaltig-entwickeln.dgvn.de/meldung/im-smog-der-staedte?pk\\_campaign=cpc&pk\\_kwd=megatrend%20urbanisierung](https://nachhaltig-entwickeln.dgvn.de/meldung/im-smog-der-staedte?pk_campaign=cpc&pk_kwd=megatrend%20urbanisierung) (Letzter Zugriff am 22.11.2023).
66. United Nations. World Population Prospects 2022: Summary of Results; United Nations: Erscheinungsort nicht ermittelbar, 2022; ISBN 9789210014380.
67. Wahlberg D, Gniechwitz T, Paare K, Schulze T. Wohnungsbau: Die Zukunft des Bestandes: Studie zur aktuellen Bewertung des Wohngebäudebestands in Deutschland und seiner Potenziale, Modernisierungs- und Anpassungsfähigkeit; Bauforschungsbericht: Kiel, Deutschland, 2022.
68. Ellis LD, Badel AF, Chiang ML, Park RJ-Y, Chiang Y-M. Toward electrochemical synthesis of cement – An electrolyzer-based process for decarbonating CaCO<sub>3</sub> while producing useful gas streams. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117, 23. DOI: 10.1073/pnas.1821673116.
69. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. Bauprodukte im Blick der Nachhaltigkeit: Stuttgart, Deutschland, 2022.
70. Thiebaut C. Innovative Baustoffe: Die Materialien der Zukunft, 2020. Verfügbar auf: <https://www.algeco.de/blog/innovative-baustoffe-die-materialien-der-zukunft/> (Letzter Zugriff am 22.11.2023).
71. Tziviloglou E, van Tittelboom K, Palin D, Wang J, Sierra-Beltrán MG, Erşan YÇ et al. Bio-based self-healing concrete: from research to field application. In: Hager M, van der Zwaag S, Schubert US, editors. Self-healing materials. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer; 2016. p. 345–85 (Materials science/Chemistry; vol. 273).
72. BayernHeim GmbH. Studie Nachhaltig Wohnen: Zehn Handlungsempfehlungen für die Wohnungswirtschaft: München, Deutschland, 2023.
73. United Nations Environment Programme. 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector: Nairobi, Kenya, 2020.
74. interhyp. Ökohaus, Tiny House und Co.: Studie zeigt Trend zu nachhaltigen und alternativen Wohnformen – Baubiologie Magazin, 2019. Verfügbar auf: <https://www.interhyp.de/ueber-interhyp/presse/oekohaus-tiny-house-und-co-studie-zeigt-trend-zu-nachhaltigen-und-alternativen-wohnformen/> (Letzter Zugriff am 15.12.2023).
75. Fernández T, Schroeder S, Stöffler S, Eufrazio Lucio, D., Ordóñez JA et al. Summary Report of the full technical City Profile Piura within the Morgenstadt Global Initiative: Piura, Peru, 2021.

76. Robert Koch-Institut. Internationale Zusammenarbeit im Bereich der Nicht-übertragbaren Erkrankungen (Non-communicable Diseases), 2021. Verfügbar auf: [https://www.rki.de/DE/Content/Institut/Internationales/NCD/NCD\\_node.html](https://www.rki.de/DE/Content/Institut/Internationales/NCD/NCD_node.html) (Letzter Zugriff am 15.12.2023).
77. Song M, Fung TT, Hu FB, Willett WC, Longo VD, Chan AT et al. Association of Animal and Plant Protein Intake With All-Cause and Cause-Specific Mortality. *JAMA internal medicine*, 2016, 176, 10. DOI: 10.1001/jamainternmed.2016.4182.
78. Orlich MJ, Singh PN, Sabaté J, Jaceldo-Siegl K, Fan J, Knutsen S et al. Vegetarian dietary patterns and mortality in Adventist Health Study 2. *JAMA internal medicine*, 2013, 173, 13. DOI: 10.1001/jamainternmed.2013.6473.
79. Fung TT, van Dam RM, Hankinson SE, Stampfer M, Willett WC, Hu FB. Low-carbohydrate diets and all-cause and cause-specific mortality: two cohort studies. *Annals of internal medicine*, 2010, 153, 5. DOI: 10.7326/0003-4819-153-5-201009070-00003.
80. Deloitte, Allen S. 2022 Global Health Care Outlook: Are we finally seeing the long-promised transformation?, 2021.
81. BIOPRO Baden-Württemberg GmbH. Mit molekularer Diagnostik zur Biomarker-basierten personalisierten Therapie, 2018. Verfügbar auf: <https://www.gesundheitsindustrie-bw.de/fachbeitrag/dossier/mit-molekularer-diagnostik-zur-biomarker-basierten-personalisierten-therapie> (Letzter Zugriff am 15.11.2023).
82. Goula A, Gkioka V, Michalopoulos E, Katsimpoulas M, Noutsias M, Sarri EF et al. Advanced Therapy Medicinal Products Challenges and Perspectives in Regenerative Medicine. *Journal of clinical medicine research*, 2020, 12, 12. DOI: 10.14740/jocmr3964.
83. Werner JA. So krank ist das Krankenhaus: Ein Weg zu mehr Menschlichkeit, Qualität und Nachhaltigkeit in der Medizin; Klartext Verlag: Essen, 2022; ISBN 9783837525502.
84. Werner JA, Forsting M, Kaatze T, Schmidt-Rumpoosch A, editors. *Smart Hospital: Digitale und empathische Zukunftsmedizin*. 1st ed. Berlin: Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft; 2020.
85. PwC Deutschland. Fachkräftemangel im deutschen Gesundheitswesen 2022, 2022.
86. Both U von, Birzele LT. mRNA: Neue Technologie – neue Impfmöglichkeiten. *MMW – Fortschritte der Medizin*, 2022, 164, 8. DOI: 10.1007/s15006-022-0926-8.
87. Wei H-H, Zheng L, Wang Z. mRNA therapeutics: New vaccination and beyond. *Fundamental Research*, 2023, 3, 5. DOI: 10.1016/j.fmre.2023.02.022.
88. Personalized Medicine Coalition (PMC). *The Personalized Medicine Report: 2017 Opportunity, Challenges, and the Future*: Washington, USA, 2017.
89. Jetzke T, Richter S, Keppner B, Domröse L, Wunder S, Ferrari A. *Die Zukunft im Blick: Fleisch der Zukunft – Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen von pflanzlichen Fleischersatzprodukten, essbaren Insekten und In-vitro-Fleisch*: Dessau-Roßlau, Deutschland, 2019.
90. Statistisches Bundesamt. *Lebensmittelabfälle in Deutschland, 2022*. Verfügbar auf: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/lebensmittelabfaelle.html#fussnote-1-615778> (Letzter Zugriff am 22.11.2023).
91. Climate Watch. *Data Explorer*. Verfügbar auf: [https://www.climatewatchdata.org/data-explorer/historical-emissions?historical-emissions-data-sources=climate-watch&historical-emissions-gases=all-ghg&historical-emissions-regions=WORLD&historical-emissions-sectors=All%20Selected&page=1&sort\\_col=country&sort\\_dir=DESC#data](https://www.climatewatchdata.org/data-explorer/historical-emissions?historical-emissions-data-sources=climate-watch&historical-emissions-gases=all-ghg&historical-emissions-regions=WORLD&historical-emissions-sectors=All%20Selected&page=1&sort_col=country&sort_dir=DESC#data) (Letzter Zugriff am 19.12.2023).
92. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). *Agrarmeteorologie, 2015*. Verfügbar auf: <https://www.ble-medien-service.de/1651-1-agrarmeteorologie.html> (Letzter Zugriff am 15.12.2023).
93. Fritsch J, editor. *Wege zu einer wissenschaftlich begründeten, differenzierten Regulierung genomeditierter Pflanzen in der EU: Stellungnahme = Towards a scientifically justified, differentiated regulation of genome edited plants in the EU : statement*. Halle (Saale): Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V. – Nationale Akademie der Wissenschaften; 2019.
94. Foley J. *Serie: Der 5-Punkte-Plan zur Ernährung der Welt* | National Geographic. Verfügbar auf: <https://www.nationalgeographic.de/umwelt/serie-der-5-punkte-plan-zur-ernaehrung-der-welt> (Letzter Zugriff am 22.11.2023).
95. McKinsey. *Pandemie verändert Lebensmitteleinzelhandel – Deutsche wollen sich gesünder und nachhaltiger ernähren, mehr online einkaufen und mehr sparen*, 2021. Verfügbar auf: <https://www.mckinsey.com/de/news/presse/2021-03-29-state-of-grocery> (Letzter Zugriff am 15.12.2023).
96. Terefe NS. *Recent developments in fermentation technology: toward the next revolution in food production*. In: Juliano, Buckow et al. (Hg.) 2022 – *Food Engineering Innovations Across the Food Supply Chain*. p. 89–106.
97. Bundeszentrum für Ernährung (bzfe). *Foodtrend Fermentation*. Verfügbar auf: <https://www.bzfe.de/service/news/aktuelle-meldungen/news-archiv/meldungen-2023/maerz/foodtrend-fermentation/> (Letzter Zugriff am 22.11.2023).
98. Gouseti O, Larsen ME, Amin A, Bakalis S, Petersen IL, Lametsch R et al. *Applications of Enzyme Technology to Enhance Transition to Plant Proteins: A Review*. *Foods* (Basel, Switzerland), 2023, 12, 13. DOI: 10.3390/foods12132518.
99. IPCC. *Special Report: Global Warming of 1.5 °C – FAQ Chapter 1*, 2018. Verfügbar auf: <https://www.ipcc.ch/sr15/faq/faq-chapter-1/> (Letzter Zugriff am 15.12.2023).
100. Hornik A, Klose G, Stehnen T, Spalthoff F, Glockhner H, Grünwald C et al. *Zukunft von Wertvorstellungen der Menschen in unserem Land*: Berlin, Deutschland, 2020.
101. International Resource Panel, Oberle B, Bringezu S, Hatfield-Dodds S, Hellweg S, Schandl H et al. *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want – Summary for Policymakers*; United Nations Environment Programme, 2019.
102. Demary V, Matthes J, Plünnecke A, Schaefer T. *Gleichzeitig: Wie vier Disruptionen die deutsche Wirtschaft verändern. Herausforderungen und Lösungen*; Institut der deutschen Wirtschaft Köln e.V.: Köln, Deutschland, 2021; ISBN 3602456439.
103. Lübckemeier E, Ondarza N von. *Im Schatten der Poly-Krise. Leitlinien für eine Erneuerung der EU nach dem Jubiläumsgipfel in Rom*; SWP-Aktuell, 2017.
104. Mieke R, Full J, Scholz P, Demmer A, Bauernhansl T, Sauer A et al. *The Biological Transformation of Industrial Manufacturing-Future Fields of Action in Bioinspired and Bio-based Production Technologies and Organization*. *Procedia Manufacturing*, 2019, 39. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.01.437.
105. Lin D-Y, Yeoh R, Namratha Rayavarapu S, Tadjeddine K. *Beyond financials: Helping small and medium-size enterprises thrive*, 2022. Verfügbar auf: <https://www.mckinsey.com/industries/public-sector/our-insights/beyond-financials-helping-small-and-medium-size-enterprises-thrive> (Letzter Zugriff am 24.11.2023).
106. Bronsema V, Serrano Minar P, Arnold N. *Biotechnologie in Deutschland: Argumente für die Stärkung des innovativen Mittelstandes*; Konrad-Adenauer-Stiftung: Sankt Augustin, Deutschland, 2009; ISBN 9783940955784.
107. Hinz A, Hübscher U, Brähler E, Berth H. *Ist Gesundheit das höchste Gut? – Ergebnisse einer bevölkerungsrepräsentativen Umfrage zur subjektiven Bedeutung von Gesundheit*. *Gesundheitswesen* (Bundesverband der Ärzte des Öffentlichen Gesundheitsdienstes Deutschland), 2010, 72, 12. DOI: 10.1055/s-0029-1246151.
108. OECD. *Health at a Glance 2023*; OECD Publishing: Paris, Frankreich, 2023; ISBN 9789264957930.
109. Bataille C. *OECD Green Growth Papers: Barriers, technologies and policies*. *OECD Green Growth Papers*, 2020, 2020/02. DOI: 10.1787/5ccf8e33-en.
110. Röhl K-H. *Unternehmensgründungen: Mehr innovative Start-ups durch einen Kulturwandel für Entrepreneurship?*; IW Policy Paper: Köln, Deutschland, 2016.
111. Kennedy J. *Monopoly Myths: Is Big Tech Creating “Kill Zones”?*; Information Technology and Innovation Foundation (ITIF): Washington, USA, 2020.
112. Kreuz A, Rühren N von der, Brameier U. *Fundamente – Geographie, Oberstufe*; Klett: Stuttgart, Leipzig, 2009; ISBN 9783623292601.
113. California Institute of Technology. *Bioengineering Research Areas*. Verfügbar auf: <https://www.bbe.caltech.edu/academics/bioengineering/research> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).

114. Brinkhoff T. City Population of Massachusetts, 2023. Verfügbar auf: [https://www.citypopulation.de/de/usa/admin/MA\\_\\_massachusetts/](https://www.citypopulation.de/de/usa/admin/MA__massachusetts/) (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
115. Brandt M. New York ist der wichtigste Finanzplatz der Welt, 2022. Verfügbar auf: <https://de.statista.com/infografik/24487/ranking-der-wichtigsten-finanzzentren-weltweit/> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
116. CNBC. Silicon Valley's share of venture capital expected to drop below 20 % for the first time this year. Verfügbar auf: <https://www.cnbc.com/2021/01/14/silicon-valleys-share-of-venture-capital-may-drop-below-20percent-in-2021.html> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
117. United States Census Bureau. QuickFacts: New York. Verfügbar auf: <https://www.census.gov/quickfacts/fact/table/NY/PST045222> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
118. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Die Exzellenzstrategie. Verfügbar auf: [https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/das-wissenschaftssystem/die-exzellenzstrategie/die-exzellenzstrategie\\_node.html](https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/das-wissenschaftssystem/die-exzellenzstrategie/die-exzellenzstrategie_node.html) (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
119. Forbes. The 2024 Best World Universities, Oxford At The Top, Ranked By Times Higher Education. Verfügbar auf: <https://www.forbes.com/sites/ceciliarodriguez/2023/09/27/the-2024-best-world-universities-oxford-at-the-top-ranked-by-times-higher-education/> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
120. BIO.NRW. Der Biotech Standort Nordrhein-Westfalen. Verfügbar auf: <https://bio.nrw.de/standort-nrw/> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
121. Huss R. München ist ein führender Biotechnologie-Standort. Verfügbar auf: <https://www.bio-m.org/zahlen-und-fakten/muenchner-biotech-cluster.html> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
122. EY. Startup Barometer Deutschland 2023, 2023. Verfügbar auf: [https://www.ey.com/de\\_de/news/2023/07/ey-startup-barometer-juli-2023](https://www.ey.com/de_de/news/2023/07/ey-startup-barometer-juli-2023) (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
123. Charité. Charité – Universitätsmedizin Berlin. Verfügbar auf: <https://www.charite.de/> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
124. Faber Futures. Scale, Void. Verfügbar auf: <http://faberfutures.com/projects/project-coelicolor/scale-void-print/> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
125. BIA. TechBio 2023. Verfügbar auf: <https://techbio.org.uk/> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
126. Forbes. The Best International MBAs: One-Year Programs. Verfügbar auf: <https://www.forbes.com/business-schools/list/international-1-year/> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
127. University of Cambridge. OpenPlant – major boost for synthetic biology. Verfügbar auf: <https://www.cam.ac.uk/research/news/openplant-major-boost-for-synthetic-biology> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
128. Freie Universität Berlin. Unterwegs in der „Start-up-Nation“ Israel. Verfügbar auf: <https://www.fu-berlin.de/campusleben/campus/2015/150629-start-up-exist-israel-deutschland/index.html> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
129. GINsum. 119 Chancen von Israel als Investitionsstandort und Exportmarkt. Verfügbar auf: <https://www.ginsum.eu/de/chancen-von-israel-als-investitionsstandort-und-exportmarkt/> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
130. The Times of Israel. Israel Startup Founder Concerns: Challenges Faced by Entrepreneurs. Verfügbar auf: <https://blogs.timesofisrael.com/israel-startup-founder-concerns-challenges-faced-by-entrepreneurs/> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
131. OECD. Price level indices. Verfügbar auf: <https://data.oecd.org/price/price-level-indices.htm> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
132. Council for Higher Education. „the Galilee, Israel: Self-Evaluation Report“, OECD Reviews of Higher Education in Regional and City Development, IMHE, 2009.
133. Times Higher Education. World University Rankings: University of Toronto. Verfügbar auf: <https://www.timeshighereducation.com/world-university-rankings/university-toronto> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
134. BIOQuébec. 2022 Annual Report, 2022. Verfügbar auf: [https://static1.squarespace.com/static/57c496ac6b8f5bb965c464d3/t/646d09420774893e73a77a80/1684867399492/RA\\_BioQu%C3%A9bec\\_EN\\_2022\\_Final.pdf](https://static1.squarespace.com/static/57c496ac6b8f5bb965c464d3/t/646d09420774893e73a77a80/1684867399492/RA_BioQu%C3%A9bec_EN_2022_Final.pdf) (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
135. Schweizer Eidgenossenschaft. Wirtschaftsbericht 2022/23 Kanada: Ottawa, Canada, 2023.
136. Québec. Utiliser notre ingéniosité pour faire évoluer la santé: Stratégie québécoise des sciences de la vie 2022-2025; Direction des communications du Ministère de l'économie et de l'innovation: Québec (Québec), 2022; ISBN 978-2-550-91675-8.
137. Filion M. BioMed Propulsion Program: Québec grants \$ 4 million loan to Alethia Biotherapeutics. Verfügbar auf: <https://www.linkedin.com/pulse/biomed-propulsion-program-qu%C3%A9bec-grants-4-million-loan-mario-filion/> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
138. Vancouver Public Library. Overview of the Biotechnology & Life Sciences Industry. Verfügbar auf: <https://www.vpl.ca/siic/guide/industry-profiles/fastest-growing-industries-biotechnology-life-sciences/overview-biotechnology-life> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
139. Die Bundesregierung (BReg). Neuer Kompass: Die China-Strategie. Verfügbar auf: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/gesetzsvorhaben/china-strategie-2202212> (Letzter Zugriff am 18.12.2023).
140. Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB) – iMOVE: Training – Made in Germany. Marktstudie China für den Export beruflicher Aus- und Weiterbildung: Bonn, Deutschland, 2021.
141. The End of Publish or Perish? China's New Policy on Research Evaluation | MPIWG. Verfügbar auf: <https://www.mpiwg-berlin.mpg.de/observations/1/end-publish-or-perish-chinas-new-policy-research-evaluation> (Letzter Zugriff am 18.12.2023).
142. China Briefing News. China's Booming Biopharma Industry: Market Prospects, Investment Paths, 2022. Verfügbar auf: <https://www.china-briefing.com/news/china-booming-biopharmaceuticals-market-innovation-investment-opportunities/> (Letzter Zugriff am 18.12.2023).
143. China Biotech Stumbles Despite \$220 Billion Investment. Bloomberg 2023 May 15 Letzter Zugriff am 18.12.2023. Verfügbar auf: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-05-15/china-biotech-stumbles-despite-220-billion-investment?leadSource=verify%20wall>.
144. Matthes J. Entwicklung des Konkurrenzdrucks durch China auf dem EU-Markt: Köln, Deutschland, 2023.
145. Zhang X, Zhao C, Shao M-W, Chen Y-L, Liu P, Chen G-Q. The roadmap of bioeconomy in China. Engineering biology, 2022, 6, 4. DOI: 10.1049/enb2.12026.
146. Luo Y, Zhang J, Fan S, Yang K, Wu Y, Qiao M et al. BioMedGPT: Open Multimodal Generative Pre-trained Transformer for BioMedicine, 2023.
147. Frost & Sullivan. Market size of biological medicines in China from 2013 to 2020, with a forecast until 2025, 2022.
148. Global X. The Evolution of China's BioTech Industry: New York, USA, 2020.
149. eurostat. BIP pro Kopf im Jahr 2015 in 276 Regionen der EU, 2017. Verfügbar auf: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/7962769/1-30032017-AP-DE.pdf/b94f014e-7ae0-4c09-858c-d417c699ba0f> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
150. DNHK. Wirtschaftsstandort Niederlande. Verfügbar auf: <https://www.dnhk.org/beratung/marktinformationen/wirtschaftsstandort-niederlande> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
151. ABS. National, state and territory population: Reference period March 2023. Verfügbar auf: <https://www.abs.gov.au/statistics/people/population/national-state-and-territory-population/mar-2023> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).
152. Easton MG, Saldais M, Smith R, Dumovic V, Conti L. Humanities 8: Western Australian curriculum; Oxford University Press: South Melbourne, Vic., 2016; ISBN 9780190307608.
153. World Bank Open Data. Australien: Anteile der Wirtschaftssektoren<sup>1</sup> am Bruttoinlandsprodukt (BIP) von 2012 bis 2022. Verfügbar auf: <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=world-development-indicators> (Letzter Zugriff am 27.11.2023).

154. Salonen AO, Fredriksson L, Järvinen S, Korteniemi P, Danielsson J. Sustainable Consumption in Finland—The Phenomenon, Consumer Profiles, and Future Scenarios. *International Journal of Marketing Studies*, 2014, 6, 4. DOI: 10.5539/ijms.v6n4p59.
155. Lehtikoinen E, Salonen A. Food Preferences in Finland: Sustainable Diets and their Differences between Groups. *Sustainability*, 2019, 11, 5. DOI: 10.3390/su11051259.
156. Dinesh C. Sharma. Indiens IT-Industrie: Software und Dienstleistungen für die ganze Welt, 2014. Verfügbar auf: <https://www.bpb.de/themen/asien/indien/189895/indiens-it-industrie/> (Letzter Zugriff am 14.12.2023).
157. Agentur für Wirtschaft und Entwicklung. Indiens Wirtschaft: Entwicklung, Wachstum und Perspektiven: Marktinformationen für Unternehmen, 2023. Verfügbar auf: <https://www.leverist.de/de/insights/indiens-wirtschaft-entwicklung-wachstum-und-perspektiven> (Letzter Zugriff am 14.12.2023).
158. Kroll H, Schüller M, Conlé, Marcus. Monitoring des Asiatisch-Pazifischen Forschungsraums (APRA): Schwerpunkt Indien: New York, USA, 2020.
159. Privacy Shield Framework. Korea – Artificial Intelligence. Verfügbar auf: <https://www.privacyshield.gov/ps/article?id=Korea-Artificial-Intelligence> (Letzter Zugriff am 18.12.2023).
160. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Südkorea: Ein exzellenter Partner für die Zukunft. Verfügbar auf: [https://www.bmbf.de/bmbf/de/europa-und-die-welt/vernetzung-weltweit/asiatisch-pazifischer-raum/suedkorea/suedkorea\\_node.html](https://www.bmbf.de/bmbf/de/europa-und-die-welt/vernetzung-weltweit/asiatisch-pazifischer-raum/suedkorea/suedkorea_node.html) (Letzter Zugriff am 14.12.2023).
161. Kooperation international. Fachliche Stärken des Forschungssystems: Republik Korea (Südkorea), 2023. Verfügbar auf: <https://www.kooperation-international.de/laender/asien/republik-korea-suedkorea/bildungs-forschungs-und-innovationslandschaft-und-politik/fachliche-staerken-des-forschungssystems> (Letzter Zugriff am 14.12.2023).
162. NEOM. NEOM launches infrastructure work for the world's leading cognitive cities, 2020. Verfügbar auf: <https://www.neom.com/en-us/newsroom/neom-cognitive-cities> (Letzter Zugriff am 18.12.2023).
163. Strategy & Middle East. Accelerating Saudi Arabia's biotechnology sector: Four enablers to support a Saudi biotech hub: Dubai, 2023.
164. Devan J. Singapore's Rise to Prosperity, and Its Evolving Relationship with the World Bank Group. In: Koh T, Chang LL, Koh J, editors. 50 Years of Singapore and the United Nations. WORLD SCIENTIFIC; 2015. p. 181–9.
165. Hawksford GuideMeSingapore. What makes the Singapore economy tick? Verfügbar auf: <https://www.guidemesingapore.com/business-guides/incorporation/why-singapore-singapore-economy---a-brief-introduction> (Letzter Zugriff am 18.12.2023).
166. National Research Foundation Singapur. Research, Innovation and Enterprise 2025 Plan: Singapur, 2020.
167. Singapore Economic Development Board. Pharmaceuticals & Biotechnology, 2023. Verfügbar auf: <https://www.edb.gov.sg/en/our-industries/pharmaceuticals-and-biotechnology.html> (Letzter Zugriff am 18.12.2023).
168. Singapore Food Agency. 30 by 30: Strengthening our food security, 2023. Verfügbar auf: <https://www.ourfoodfuture.gov.sg/30by30/> (Letzter Zugriff am 18.12.2023).
169. Singapore Economic Development Board. From precision fermentation to aquaculture, how Singapore is driving innovation in food production, 2023. Verfügbar auf: [https://www.edb.gov.sg/en/business-insights/insights/from-precision-fermentation-to-aquaculture-how-singapore-is-driving-innovation-in-food-production.html?cid=disp-businessinsider-usfy23-bau-mkt-202305-us-article-release2fermentation-1x1&utm\\_medium=banner&utm\\_source=businessinsider&utm\\_campaign=bau\\_edb\\_markets\\_usfy23\\_usa\\_202305&utm\\_content=1x1\\_article-release2fermentation&source=pp-usfy23-insider](https://www.edb.gov.sg/en/business-insights/insights/from-precision-fermentation-to-aquaculture-how-singapore-is-driving-innovation-in-food-production.html?cid=disp-businessinsider-usfy23-bau-mkt-202305-us-article-release2fermentation-1x1&utm_medium=banner&utm_source=businessinsider&utm_campaign=bau_edb_markets_usfy23_usa_202305&utm_content=1x1_article-release2fermentation&source=pp-usfy23-insider) (Letzter Zugriff am 18.12.2023).
170. Marsh N. Why Singapore is the only place in the world selling lab-grown meat, 2023. Verfügbar auf: <https://www.bbc.com/news/business-65784505> (Letzter Zugriff am 18.12.2023).
171. Baker McKenzie Resource Hub. Asia Pacific Food Law Guide: Singapore – Food product and safety regulation. Verfügbar auf: <https://resourcehub.bakermckenzie.com/en/resources/asia-pacific-food-law-guide/asia-pacific/singapore/topics/food-product-and-safety-regulation> (Letzter Zugriff am 18.12.2023).
172. Europäische Kommission, Exekutivagentur für kleine und mittlere Unternehmen, Micheletti G, Shauchuk P. Advanced technologies for industry: International reports: Report on Japan: technological capacities and key policy measures; Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union: Luxemburg, 2021; ISBN 9789294607911.
173. Neppalli S, Jones B, McMahan W, Chitrakaran V, Walker I, Pritts M et al. OctArm – A soft robotic manipulator, 2007. DOI: 10.1109/IROS.2007.4399146.
174. International Monetary Fund (IMF), Schneider T, Hong GH, van Le A. Land of the rising robots, 2018. Verfügbar auf: <https://www.imf.org/en/Publications/fandd/issues/2018/06/japan-labor-force-artificial-intelligence-and-robots-schneider> (Letzter Zugriff am 15.02.2024).
175. EU-Japan Centre for Industrial Cooperation. Japan Bioeconomy Strategy. Verfügbar auf: <https://www.eu-japan.eu/news/japan-bioeconomy-strategy> (Letzter Zugriff am 15.12.2023).
176. International Trade Administration. Japan Bioeconomy Strategy, 2021. Verfügbar auf: <https://www.trade.gov/market-intelligence/japan-bioeconomy-strategy> (Letzter Zugriff am 15.12.2023).
177. bioökonomie.de. Südafrika, 2016. Verfügbar auf: <https://bioökonomie.de/themen/laenderdossiers-weltweit/suedafrika> (Letzter Zugriff am 18.12.2023).
178. Cloete TE, Nel LH, Theron J. Biotechnology in South Africa. *Trends in Biotechnology*, 2006, 24, 12. DOI: 10.1016/j.tibtech.2006.10.009.
179. BioSpace, Asanga P. As Its Domestic Market Grows, South Africa Moves Toward Greater Local Biopharmaceutical Production, 2023. Verfügbar auf: <https://www.biospace.com/article/as-its-domestic-market-grows-south-africa-moves-toward-greater-local-biopharmaceutical-production/> (Letzter Zugriff am 18.12.2023).
180. Miehle R, Gross E, Ackermann T, Gamero E, Baumgarten Y. Learning factories for biointelligent production – design aspects and required competencies. *SSRN Electronic Journal*, 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4458036.
181. Normile D. China rolls out 'radical' change to its research enterprise, 2023. Verfügbar auf: <https://www.science.org/content/article/china-rolls-out-radical-change-its-research-enterprise> (Letzter Zugriff am 18.12.2023).
182. World Bio Market Insights. China's bio-based future – World Bio Market Insights, 2022. Verfügbar auf: <https://worldbiomarketinsights.com/chinas-bio-based-future/> (Letzter Zugriff am 18.12.2023).
183. Max Planck Institut für Intelligente Systeme. Soft Robotics. Verfügbar auf: [https://rm.is.mpg.de/research\\_fields/bioinspired-soft-actuators-sensors-robots-and-machines](https://rm.is.mpg.de/research_fields/bioinspired-soft-actuators-sensors-robots-and-machines) (Letzter Zugriff am 19.12.2023).
184. Grand View Research. Biotechnology Market Size, Share & Trend Analysis By Technology (Nanobiotechnology, DNA Sequencing, Cell-based Assays), By Application (Health, Bioinformatics), By Region, And Segment Forecasts, 2024–2030. Verfügbar auf: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/biotechnology-market> (Letzter Zugriff am 18.01.2024).
185. World Bank Open Data. GDP (current US\$), 2022. Verfügbar auf: [https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?most\\_recent\\_value\\_desc=true](https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?most_recent_value_desc=true) (Letzter Zugriff am 24.01.2024).
186. OECD. GDP and spending: Real GDP long-term forecast (indicator). OECD iLibrary, 2024. DOI: 10.1787/d927bc18-en.
187. Statistisches Bundesamt. Strukturhebung im Dienstleistungsbereich; Erbringung von sonstigen wirtschaftlichen Dienstleistungen – Fachserie 9 Reihe 4.5: Wiesbaden, Deutschland, 2019.
188. World Economics. GDP Compound Annual Growth Rates, 2024. Verfügbar auf: <https://www.worldeconomics.com/Countries-With-Highest-Growth/> (Letzter Zugriff am 24.01.2024).

# GLOSSAR

## Anfangsinvestitionsvolumen

Beschreibt die gesamte Menge an Kapital, welche in einen Markt investiert werden muss, um die anfängliche Entwicklungsphase zu überwinden und in die Wachstumsphase zu gelangen.

## Bedürfnisfeld

Umfasst alle Aktivitäten, die mit der Befriedigung eines Bedürfnisses verbunden sind. Die Bedürfnisfelder sind Gesundheit, Wohnen, Konsum, Energie und Ernährung.

## BTF BefähigterTechnologieFeld

Umfasst einen für die identifizierten Einzeltechnologien kritischen Kernaspekt, der wesentlich zur Realisierung einer biointelligenten Wertschöpfung beiträgt.

## Bioconvergence

Bioconvergence (dt. Bio-Konvergenz) ist ein transdisziplinäres Forschungsgebiet, das Ingenieur- und Biowissenschaften miteinander verbindet.

## BioDigital Convergence

BioDigital Convergence (dt. Bio-Digitale-Konvergenz) ist die interaktive Kombination, bis hin zur Verschmelzung, von digitalen und biologischen Technologien und Systemen.

## Biologisierung

Biologisierung beschreibt die Nutzung und Integration von biologischen und bio-inspirierten Prinzipien, Materialien, Funktionen, Strukturen und Ressourcen für intelligente und nachhaltige Fertigungstechnologien und -systeme.

## Bio-Revolution

Bio-Revolution beschreibt das Zusammentreffen von Fortschritten in der Biowissenschaft und von Computern, Automatisierung sowie künstlicher Intelligenz, die eine neue Innovationswelle auslöst.

## Bioökonomie

Bioökonomie ist die Vision einer künftigen Wirtschaftsform, die durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Biologie und Technik, um praktische Probleme über die funktionsmorphologische Analyse biologischer Systeme, ihre Abstraktion zu Modellen und die Übertragung und Anwendung der daraus abgeleiteten biologischen Prinzipien zu lösen.

## Bioengineering

Bioengineering ist eine Disziplin, die die ingenieurwissenschaftlichen Prinzipien von Design und Analyse auf biologische Systeme und biomedizinische Technologien anwendet.

## Bioproduktion

Bioproduktion ist eine Art der Herstellung, bei der biologische Systeme (z. B. lebende Mikroorganismen, tierische Zellen, pflanzliche Zellen, Gewebe, Enzyme oder in-vitro-synthetische (enzymatische) Systeme) verwendet werden, um kommerziell wichtige Biomoleküle für die Verwendung in der Agrar-, Lebensmittel-, Material-, Energie- und Pharmaindustrie herzustellen.

## Biointelligenz

Biointelligenz ist das Ergebnis der Konvergenz von Bio-, Hard- und Software. Diese gegenseitige Ergänzung von Wissen in den Biowissenschaften, den Ingenieurwissenschaften und den Informationswissenschaften hat das Potenzial, ein neues technologisches Paradigma auszulösen, das innovative Transformationspfade in vielen Bereichen eröffnet.

## Biointelligente Systeme

Biointelligente Systeme enthalten eine technische und eine biologische Komponente sowie eine Rückkopplungsschleife und weisen allgemein anerkannte Merkmale von (künstlicher) Intelligenz auf. Biointelligente Systeme sollen zu einer nachhaltigen Gestaltung von Produkten und Produktion in verschiedenen Bereichen menschlicher Bedürfnisse beitragen, darunter Gesundheit, Ernährung, Energie, Wohnen und Konsum. Dementsprechend wird ein System nur dann biointelligent, wenn es die biologischen Ressourcen sinnvoll nutzt und danach strebt, sich sowohl mit seiner natürlichen Umwelt als auch mit den Systemen in seiner Umgebung in Einklang zu bringen.

## Biointelligente Wertschöpfung

Biointelligente Wertschöpfung beschreibt eine durch Interaktion biologischer, technischer und informationstechnischer Prozesse angepasste Wertschöpfung mit dem Ziel, wesentliche Bedürfnisse des Menschen auf makro- und mikroökonomischer Ebene zu lösen.

## Biointelligenz-Wert

Beschreibt das Potenzial eines Landes, eine zukünftige Schlüsselrolle im Rahmen einer biointelligenten Wertschöpfung einzunehmen. Dazu wurden relevante Rahmenbedingungen, die Innovationsfähigkeit eines Landes sowie der derzeitige Umsetzungsstand einer biointelligenten Wertschöpfung analysiert. Je höher der Wert, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass das betreffende Land eine Schlüsselrolle im Kontext der biointelligenten Wertschöpfung einnehmen kann.

## Fokusthemenfeld

Ermöglicht eine differenzierte Betrachtung eines Aspektes der Biointelligenz. Es fasst ein quantitatives und/oder qualitatives Kriterien-Set zusammen, um einen vollumfänglichen länderspezifischen Vergleich zu ermöglichen.

## Kleinstunternehmen, kleine und mittlere Unternehmen (KMU).

Die KMU-Definition gliedert sich in vier Klassen: Kleinstunternehmen (1–9 Mitarbeiter), Kleinunternehmen (10–49 Mitarbeiter), mittlere Unternehmen (50–249 Mitarbeiter) und Großunternehmen (über 250 Mitarbeiter).

## Kreislaufwirtschaft

Beschreibt den Zielzustand eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems aus stofflicher Sicht. Sämtliche eingesetzte Rohstoffe werden über den Lebenszyklus einer Ware hinaus wieder vollständig in den Produktionsprozess zurückgeführt. Teilaspekte der Kreislaufwirtschaft sind u. a. Reuse, Recycling, Mehrfachnutzung, Verlängerung der Lebensdauer von Produkten.

## Leitland

Ein Land, das eine führende Rolle bei der Förderung, Entwicklung und Etablierung der biointelligenten Wertschöpfung einnimmt oder ideale Rahmenbedingungen / Voraussetzungen dafür aufweist.

## Marktsegment

Definiert einen Teilbereich eines relevanten Marktes, auf dem eine bestimmte (biointelligente) Technologie oder ein bestimmtes (biointelligentes) Produkt oder eine (biointelligente) Dienstleistung angeboten wird und auf spezifische Kundengruppen und Kundentypen als Nachfragende trifft.

## Marktvolumen

Summe aller Umsätze eines bestimmten Marktes innerhalb eines Betrachtungszeitraumes (i. d. R. ein Jahr) zusammen. Das Marktvolumen kann auf unterschiedliche Regionen oder Länder heruntergebrochen werden.

## Paradigma

Gesamtheit von Denk- und/oder Handlungsweisen einer Wissenschaftsdisziplin mit dem Ziel, eine Wertschöpfungsaufgabe zu lösen.

## Paradigmenwechsel

Tiefgreifender wissenschaftstheoretischer und historischer Wandel grundlegender Rahmenbedingungen in einem Fachgebiet / einer Wissenschaftsdisziplin.

## Technologisches (Innovations-)System (TIS)

Grundlegender Ansatz der Innovationsökonomik, der ein Netzwerk von Akteuren betrachtet, die im wirtschaftlichen/industriellen Bereich innerhalb einer bestimmten institutionellen Infrastruktur interagieren und an der Produktion, Verbreitung und Nutzung von generischen Technologien beteiligt sind. Dem liegen die Annahmen zugrunde, dass es in dem als dynamisch betrachteten System unbegrenzte (globale) technologische Möglichkeiten gibt und dass jeder Akteur (Komponente) im System mit begrenzter Rationalität handelt.

## Wachstumsrate (WR)

Beschreibt den jährlichen Zuwachs eines Marktes innerhalb eines bestimmten Zeitraumes. Als Kennzahl kann die jährliche WR genutzt werden.

## Wertschöpfungseinheit

Eine Einheit (Technologie, Unternehmen) in einem Wertschöpfungssystem.

## Wertschöpfungsnetzwerk

Zusammenschluss von Unternehmen und anderen Akteuren, die in einer gemeinsamen Wertschöpfungskette zusammenarbeiten, um Produkte oder Dienstleistungen zu produzieren und zu vermarkten. Das Netzwerk umfasst alle Aktivitäten, die zur Herstellung und Vermarktung des Produkts oder der Dienstleistung erforderlich sind, einschließlich Beschaffung, Produktion und Vertrieb.

## Wertschöpfungssystem

Gesamtheit aller Elemente und Einheiten eines gerichteten Wertschöpfungsnetzwerks zum Zweck der Realisierung einer Mehrwertgenerierung.

# BETEILIGTE

## Für die Unterstützung im Industrie- und Expertenbeirat danken wir ...

Dr. Patrick Flagmeier, Engagement Manager, McKinsey & Company; Dr.-Ing. Gerhard Hammann, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG; Olaf Koch, Partner, ZINTINUS GmbH; Tim Kunze, CEO & Co-Gründer, Fusion Bionic GmbH; Raphael Rettig, Partner, McKinsey & Company; Christian Stich, Leiter der Abteilung Vorentwicklung Digital Engineering, Festo SE & Co. KG; Erika Stanzl, Partner, McKinsey & Company; Dr. Matthias Stier, CEO & Co-Gründer, Variolytics GmbH; Nicole Szlezak, Partner, McKinsey & Company; Michael Totzeck, Fellow, Carl Zeiss AG; Franziska Lausenmeyer, Senior Innovation Manager Manufacturing, Carl Zeiss AG und weiteren.

## Für die inhaltliche Mitarbeit danken wir ...

Mauricio Acuna, Research Professor of Automation and AI in Forest Operations, Natural Resources Institute Finland (LUKE); Osh. Agabi, CEO & Gründer, Koniku Inc.; Ian Archer, CEO, BioConnect Innovation Centre; Marcus Ballinger, Manager, Policy Horizons Canada, Government of Canada; Dr. Sebastian Beblawy, Projektleiter Bioökonomie und Betriebsleiter, Umwelttechnik BW und EveryCarbon; Prof. Thomas Bergs, Bereichsleiter, Fraunhofer IPT und Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen; Dr. Tom Brennan, Partner, McKinsey & Company; Prof. Rivka Carmi, Chairwoman, the Scientific Advisory Council to the Bio-convergence National Program, Israel Innovation Authority and the TELEM Forum; Pierre-Olivier Desmarchais, Senior Foresight Analyst, Policy Horizons Canada, Government of Canada; Dr. Helen Ewles, Head of Innovation, Analysis and Public Affairs at the Royal Academy of Engineering; Dr. Jean-Loup Faulon, Director of Research Exceptio-

nal, INRA French National Institute for Agricultural Research; Dr. Miriam Filippi, Senior Researcher, ETH Zürich; Dr. Marion Früchtl, Leiterin des Kernkompetenzbereichs Biologische Transformation und F&E Bio-inspirierte Lösungen & Strategie, Fraunhofer IGCV; Dr. Ljiljana Fruk, Reader in BioNano Engineering, Department of Chemical Engineering and Biotechnology, University of Cambridge; Dr. Enrique Garcia, Postdoctoral Researcher, Wageningen University; Dr. Steven Gedeon, Associate Professor, Toronto Metropolitan University; Francesco Gentili, Researcher at the Department of Forest Biomaterials and Technology, SLU – Swedish University of Agricultural Sciences; Prof. Weibo Gong, University of Massachusetts; Dr. Alvaro Goyanes, CEO & Co-Gründer, FabRx Ltd.; Dr. phil. Jürgen Hampel, Senior Dozent, Universität Stuttgart; Dr.-Ing. Matthias Harsch, Managing Director, LCS Life Cycle Simulation GmbH; Dr.-Ing. Simon Harst, Geschäftsfeldleiter kognitive Produktion, Fraunhofer IWU; Prof. Christoph Herrmann, Director, Sustainable Manufacturing & Life Cycle Engineering, Fraunhofer IST; Dominic Hillerkuss, Business Development Manager – Technology and Projects, Isansys Lifecare; Dr. Yousif Hussin, Associate Professor of Remote Sensing and GIS, University of Twente; Dr. phil. Petri Ihalainen, Customer Account Lead, VTT Technical Research Centre of Finland; Dr. phil. Jussi Jäntti, Principal Scientist/Lead, Industrial Biotechnology, VTT Technical Research Centre of Finland; Dr. Brett Kagan, Chief Scientific Officer, Cortical Labs; Prof. Jyrki Kangas, Professor, University of Eastern Finland; Jukka Kantola, Gründer und CEO, World BioEconomy Forum; Prof. Johan Kask, CREDS/Inland Norway University of Applied Sciences; Dr. Tuomo Kauranne, President/Chairman, Arbonaut Ltd.; Tatjana Krampitz, Head of

Technology Management New Food, GEA Group; Dr. Cornelius Lahme, Marketing und Kommunikation, Bluu Seafood; Evan Lampard, Foresight Analyst, Policy Horizons Canada, Government of Canada; Ludwig Lehner, Geschäftsführung, Technikum Laubholz GmbH; Prof. Radhakrishnan Mahadevan, Laboratory Principal Investigator, University of Toronto; Jussi Manninen, Executive Vice President, VTT Technical Research Centre of Finland; Dr. phil. Esteban Marcellin, Biosustainability Hub Director, University of Queensland; Dr. Pedro Xavier Miranda La Hera, Research and Development Specialist, SLU – Swedish University of Agricultural Sciences; Prof. László Monostori, Director, MTA SZTAKI Institut für Informatik und Steuerung; Bernhard Münzing, Geschäftsführer, BePaMü GmbH; Tomas Nauclér, McKinsey & Company; Jonny Ohlson, Executive Chair & Gründer, Touchlight; Prof. Brian F. Pflieger, University of Wisconsin-Madison; Prof. Thomas Potthast, Direktor des Internationalen Zentrums für Ethik in den Wissenschaften, Universität Tübingen; Dr. Sylvain Pouzet, Gründer in residence, Marble; Prof. Günther Proll, Technology and Innovation Management, Reutlingen University; Dr. Janet Reid, Manager, CSIRO BioFoundry; Marcus Remmers, Partner, Novo Holdings; Dr. Roberts Rimša, CTO & Co-Gründer, Cellbox Labs; Steven Robinette, Venture Partner, Atlas Venture; Dr. Phil. Devin Scanell, Senior Principal, Flagship Pioneering; Maximilian Scheu, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Entrepreneurship Research Group Universität Hohenheim; Zachi Schnarch, Deputy CEO, Head of Technological Division, Israel Innovation Authority (IIA); Maayan Schreiber, Director of Corporate Investment, OurCrowd; Prof. Ulrich Schwaneberg, RWTH Aachen Universität; Dr. Ido Sella, CEO & Co-Gründer, EConcrete Tech Ltd.; Prof. Oded Shoseyov, Chief Scientific Officer, The Hebrew University of Jerusalem; Sari Tasa, Senior Advisor, The Ministry of Economic Affairs and Employment, Finland; Andreas Tschiesner, Senior Partner, McKinsey & Company; Dr. Vesa Turkki, Head of Viral Vector, NecstGen; Prof. Riikka Virkkunen, Professor of Practice and Co-chair of the Made In Europe partnership board, VTT Technical Research Centre of Finland; Prof. rer. nat. Elke von Seggern, Laborleiterin, Hochschule Esslingen; Dr. Zhichong Wang, Post-doc im Projekt ‚Pattern Management in China‘, Universi-

tät Hohenheim und China Agricultural University; Koenraad Wiedhaup, CEO & Gründer, Leyden Labs; Dr. Shaojun Xiong, Researcher at the Department of Forest Biomaterials, SLU – Swedish University of Agricultural Sciences; Matija Zulj, CEO & Gründer, AGRIVI und vielen weiteren.

Namentlich genannt wurden nur Personen, die einer Veröffentlichung zugestimmt haben.



