

# BIOINTELLIGENZ

## EINE NEUE PERSPEKTIVE FÜR NACHHALTIGE INDUSTRIELLE WERTSCHÖPFUNG

ERGEBNISSE DER VORUNTERSUCHUNG ZUR BIOLOGISCHEN  
TRANSFORMATION DER INDUSTRIELLEN WERTSCHÖPFUNG (BIOTRAIN)



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



# BIOINTELLIGENZ

EINE NEUE PERSPEKTIVE FÜR NACHHALTIGE  
INDUSTRIELLE WERTSCHÖPFUNG

ERGEBNISSE DER VORUNTERSUCHUNG ZUR BIOLOGISCHEN  
TRANSFORMATION DER INDUSTRIELLEN WERTSCHÖPFUNG (BIOTRAIN)

# IMPRESSUM

*Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt mit dem Förderkennzeichen 02P17D000 ff wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm »Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen« gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.*

## **Biointelligenz – Eine neue Perspektive für nachhaltige industrielle Wertschöpfung**

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-8396-1433-4

#### **Layout und Infografiken**

Rainer Bressel

#### **Titelbild und 3D-Visualisierungen**

Elisabeth Drache

#### **Verlag**

Fraunhofer-Verlag  
Nobelstr. 12  
70569 Stuttgart

#### **© 2019 Fraunhofer-Gesellschaft**

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.  
Hansastraße 27c  
80686 München

Printed in Germany

**Erscheinungsjahr**

2019

**Erscheinungsort**

Aachen, Dortmund, Dresden, Freiburg, Stuttgart

**Herausgeber**

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl, Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, Prof. Dr.-Ing. Welf-Guntram Drossel, Prof. Dr. rer. nat. Peter Gumbsch, Prof. Dr. Dr. h. c. Michael ten Hompel, Dr. rer. nat. Markus Wolperdinger (Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.)

**Verfasser**

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl, M.Sc. Marc Beckett, Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, Dipl.-Ing. Axel Demmer, Prof. Dr.-Ing. Welf-Guntram Drossel, M.Sc. Patrik Elfert, M.Sc. Johannes Full, Dr.-Ing. Arvid Hellmich, Dipl.-Biol. Katharina Hien, M.Sc. Julian Hinxlage, Dr. rer. nat. Jessica Horbelt, Dr. rer. nat. Günther Jutz, Dipl. Agr.Biol. Sabine Krieg, MBA, Ph.D. Christophe Maufroy, Dr.-Ing. Robert Mieke, Dipl.-Ing. Marian Noack, Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer, Dr.-Dr.-Ing. Ursula Schließmann, M.Sc. Patrick Scholz, Dr. rer. nat. Oliver Schwarz, Prof. Dr. Dr. h. c. Michael ten Hompel, Dr. rer. nat. Markus Wolperdinger, M.Sc. Philipp Wrycza

**Download der Broschüre**

<http://s.fhg.de/nyD>

# VORWORT

## VORWORT DER HERAUSGEBER

Die Biologische Transformation der industriellen Wertschöpfung Deutschlands kann in den nächsten Jahrzehnten die gesamte Industrie und Gesellschaft revolutionieren. Nahezu alle industriellen und gesellschaftlichen Bereiche und auch entsprechende Forschungsinstitutionen werden von der Etablierung einer biointelligenten Wertschöpfung massiv beeinflusst werden. Derzeit wird der Begriff der Nachhaltigkeit noch vorwiegend mit ökonomischen Einbußen und Einschränkungen für Unternehmen bis hin zu jeder einzelnen Person assoziiert. Die Biologische Transformation soll genau hier ansetzen und Nachhaltigkeit durch neue Konzepte und Innovationen wirtschaftlich und attraktiv machen. Das Potenzial der Biologischen Transformation erweist sich als vielfältig – von disruptiven Innovationen über die Modernisierung der deutschen Unternehmens- und Bildungskultur bis hin zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise. Man muss es nur annehmen und ausschöpfen.

Die vorliegende Voruntersuchung zur Biologischen Transformation hat das Ziel, aus den Recherchen und Diskussionen ein fundiertes und nachhaltiges Zukunftsbild der deutschen Industrie und Gesellschaft abzuleiten und anschaulich zu skizzieren. Im Mittelpunkt der Untersuchung stand dabei stets die Frage, ob Deutschland als herausragender Wirtschaftsstandort bestehen bleiben kann und ob es Leitmarkt bzw. unter den Leitانبietern einer biointelligenten Wertschöpfung sein wird. Zu diesem Zweck wurde zunächst eine umfassende Stärken-Schwächen-Analyse durchgeführt und aus dieser Grundlage anschließend drei verschiedene Entwicklungspfade der Biologischen Transformation abgeleitet. Betrachtet wurde dabei ein Zeithorizont bis zum Jahr 2035 und darüber hinaus. Abschließend wurden zehn Handlungsfelder und umfangreiche Handlungsempfehlungen für ein Gelingen der Transformation formuliert.

Die erfolgreiche Umsetzung einer so extensiven Untersuchung erfordert das Mitwirken mehrerer Projektpartner im effizienten Zusammenspiel mit externen Experten. Unter der Projektleitung des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA interviewten die Projektpartner zahlreiche Experten aus Industrie, Forschung, Politik, sowie Repräsentanten gesellschaftlicher Gruppen – die Expertise von 123 Fachleuten floss hier zusammen. Darüber hinaus wurden zehn Workshops mit insgesamt über 200 Teilnehmern veranstaltet, die wertvolle Ergebnisse und Anregungen lieferten. 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 Kritiken haben das BIOTRAIN-Projekt bedeutend vorangetrieben. Weiterer Dank gilt allen beteiligten Projektpartnern, Beiräten sowie Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die sich monatelang sowohl mit inhaltlichen wie auch organisatorischen Aufgaben auseinandergesetzt haben.

Wir haben versucht, die Fülle der zusammengetragenen Ergebnisse kompakt und anschaulich darzustellen und wünschen Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, eine ansprechende und aufschlussreiche Lektüre.

*Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl, Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, Prof. Dr.-Ing. Welf-Guntram Drossel, Prof. Dr. rer. nat. Peter Gumbsch, Prof. Dr. Dr. h. c. Michael ten Hompel, Dr. rer. nat. Markus Wolperdinger*

## VORWORT DES FÖRDERERS

Die wirtschaftliche Stärke Deutschlands – vor allem im Vergleich zu den übrigen europäischen Ländern – ist bemerkenswert: In den vergangenen 25 Jahren war Deutschland zahlreiche Male Exportweltmeister, und es gibt eine große Zahl von Unternehmen, die Weltmarktführer sind. Diese Position zu stärken und auszubauen, ist Ziel der neuen Hightech-Strategie (HTS) der Bundesregierung. In der HTS wurden Missionen definiert, mit denen wir Beiträge zur Lösung der globalen Herausforderungen leisten und damit mehr Lebensqualität für jeden Einzelnen schaffen werden. Dazu gehört auch, dass »die Art und Weise, wie wir produzieren und konsumieren, ... ressourcenschonender, umweltfreundlicher, sozialverträglicher und damit nachhaltiger werden« soll.

Bei der Transformation zu einer biobasierten, nachhaltigen Wirtschaftsweise kann Deutschland als »Land der Ideen« global eine Vorreiterrolle einnehmen: Deutsche Unternehmen können zu Lösungsanbietern für die anstehenden Herausforderungen werden und so den Wettbewerb um den Markt der »Grünen Technologien« für sich entscheiden: also Produkte anbieten, die so weit wie möglich biobasiert und kreislauffähig sind sowie auch in ihrer Herstellung und Nutzung weniger Ressourcen und Energie verbrauchen.

Die hierfür notwendigen Werkzeuge, Methoden und Vorgehensweisen zu untersuchen und Wege zu einer Transformation der Wertschöpfungskette aufzuzeigen, war Zielstellung dieser »Voruntersuchung zur biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung (BIOTRAIN)«, die mit Mitteln des BMBF gefördert wurde.

Unternehmer investieren dann, wenn sie einen betriebswirtschaftlichen Nutzen sehen. Die kurzfristige Optimierung nach monetären Größen allein reicht heute jedoch nicht mehr aus. Eine ganzheitliche Betrachtung der Wertschöpfung ist zukünftig geprägt durch die Entwicklung neuer biobasierter intelligenter Systeme mit dem Ziel der Nachhaltigkeit und Resilienz. Produktionssysteme und Produktionsprozesse in den Unternehmen werden dadurch in ihrer Wandlungsfähigkeit gegenüber sich ändernden Rahmenbedingungen – wie beispielsweise durch neue Normen, Richtlinien, Gesetze oder neue Anforderungen der Märkte – gestärkt.

Wichtige Fragen werden in der aktuellen Diskussion oft vernachlässigt. Zum Beispiel, wie der industrielle Wandel für die Gesellschaft nachhaltig gestaltet werden kann, wie zukünftige Wertschöpfungssysteme bzw. -netzwerke im Detail zu konzipieren sind, und welche Rolle der Mensch in einem zukünftigen bio-intelligenten Wertschöpfungssystem einnimmt. Wie wollen wir in Zukunft arbeiten und wie verändern sich die Arbeitsplätze, und damit Ausbildungsinhalte? Welche Wege führen zu einer nachhaltigen Entwicklung der Wirtschaft für eine zukunftsfähige Gesellschaft? Auf diese Fragen hat die vorliegende Voruntersuchung versucht, eine Antwort zu finden.

Nachhaltige Entwicklung heißt, mit Visionen, Fantasie und Kreativität die Zukunft gestalten, Neues wagen und unbekannte Wege erkunden. Es geht darum, wie wir in Zukunft leben wollen, wie wir auf die Herausforderungen der globalisierten Welt in Wirtschaft und Gesellschaft antworten wollen. Neue Wege zu beschreiten, hin zu einer ökonomisch, ökologisch und sozial zukunftsfähigen Gesellschaft, liegen in unserer Verantwortung gegenüber nachfolgenden Generationen. Wie solche neuen Wege aussehen können, zeigt diese Untersuchung. Ich danke all denen, die an dem Vorhaben mitgewirkt haben, und wünsche den Partnern weiterhin viel Erfolg.

*Ministerialdirektor Prof. Dr. Wolf-Dieter Lukas, Abteilungsleiter Forschung für Digitalisierung und Innovation im Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)*

# INHALT



ZUSAMMENFASSUNG .....	8
EXECUTIVE SUMMARY .....	10
1 EINLEITUNG .....	12
2 METHODIK .....	18
3 STATUS QUO .....	20
3.1 SWOT-Analyse .....	21
3.2 Deutschland im internationalen Vergleich .....	29
4 VORAUSSCHAU .....	36
4.1 Basistechnologien .....	36
4.2 Entwicklungspfade .....	41
5 VISION UND EMPFEHLUNG .....	46
5.1 Entwicklung der Vision .....	46
5.2 Gestaltung der Vision .....	46
5.3 Handlungsfelder .....	53
6 FAZIT UND EMPFEHLUNG .....	88
GLOSSAR .....	92
BETEILIGTE .....	95

# ZUSAMMENFASSUNG

» Die größte Ressource, die wir haben, ist die menschliche Vorstellungskraft.«

– Osh. Agabi, Founder and CEO, Koniku Inc.

**BIOTRAIN** ist eine **breit angelegte Voruntersuchung** zum aktuellen Stand, den Potenzialen, den Bedarfen und den Hemmnissen der Biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung mit einem Zeithorizont bis zum Jahr 2035 und darüber hinaus. Die Biologische Transformation der industriellen Wertschöpfung wird dabei als systematische Anwendung des Wissens über biologische Prozesse zum Zweck der ganzheitlichen Optimierung von Produktionssystemen verstanden. Das Vorhaben wurde zwischen November 2017 und November 2018 von sechs Fraunhofer-Instituten durchgeführt, die von 15 industriellen und wissenschaftlichen Beiräten, dem hauseigenen Think Tank und dem Hauptstadtbüro der Fraunhofer-Gesellschaft beraten wurden. Mit Hilfe intensiver Literaturrecherchen, **123 Experteninterviews** und **zehn Workshops** (mit insg. über **200 Teilnehmern**) konnten die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken Deutschlands (**Status-Quo**), die Basistechnologien sowie mögliche Entwicklungspfade einer zukünftigen Entwicklung (**Vorausschau**) identifiziert werden. Schließlich wurden die gesammelten Ergebnisse in **zehn Handlungsfeldern** aggregiert, für die wiederum **über 200 Forschungs- und 150 Gestaltungsthemen** formuliert wurden. Die Ergebnisse dienen der Formulierung konkreter Handlungsempfehlungen an die Fraunhofer-Gesellschaft und die Bundesregierung. Die Ergebnisse der Untersuchung wurden im Juni 2018 im Rahmen einer **Abschlusskonferenz** in Berlin den **85 Teilnehmern** vorgestellt.

Die Status-Quo-Analyse zeigt, dass deutsche Unternehmen derzeit in vielen relevanten Bereichen der Biologischen Transformation, wie der Biotechnologie und der Informationstechnik nicht führend, aber in einer aussichtsreichen Position sind, wenn nun die richtigen Maßnahmen ergriffen werden. Zu den **Stärken** Deutschlands im internationalen Vergleich zählen beispielsweise die ausgeprägte Forschungslandschaft sowohl in der Grundlagen- als auch in der angewandten Forschung sowie eine privilegierte Stellung im Internationalen Handel, u. a. durch eine gute Reputation deutscher Produkte (Made in Germany). Als **Schwächen** wurden z. B. eine Aversion gegenüber potenziellen Risiken und disruptiven Veränderungen in der deutschen Gesellschaft bescheinigt, die zu einer restriktiven Gesetzgebung geführt hat. Als **Chancen** wurden unter anderem die Sicherung des Industriestandortes Deutschlands und die Eindämmung der Umweltbelastungen gesehen – beispielsweise durch neue/neuartige Arbeitsplätze und -bedingungen – sowie Regionalisierung und Ressourceneffizienz. Als Risiko sehen die befragten Experten u. a. eine nicht beherrschbare, steigende Komplexität durch künstliche Intelligenz und autonome Systeme. Weitere Risiken, die hier auch als Hemmnisse verstanden werden, sind neue Gefahren am Arbeitsplatz sowie Bürokratisierung und Überregulation. Damit könnte die Verlangsamung des Transformationsprozesses einhergehen.

Die Vorausschau entwirft drei mögliche Entwicklungspfade für Deutschland im Kontext der Biologischen Transformation. Während das Land in den Szenarien »marginale« und »moderate« Biologische Transformation als Antagonist oder fremdbestimmter Mitläufer auftritt, skizziert das Szenario umfassende Biologische Transformation den Weg Deutschlands zum Vorreiter und Leitmarkt. Entsprechend basiert die unten skizzierte Vision der Biologischen Transformation Deutschlands maßgeblich auf letzterem Szenario. Dabei findet die Biologie umfassenden Einzug in die Wertschöpfung und ermöglicht den Menschen eine ökologisch ausbalancierte

Befriedigung ihrer Bedürfnisse. Mit Hilfe von sog. Smart Biomanufacturing Devices (intelligenten, dezentralen Bioproduktionszellen) vollzieht sich der Wandel hin zu einer biobasierten, personalisierten und dezentralen Herstellung von Konsumgütern und Nahrungsmitteln. Obgleich nicht alle Produkte dezentral hergestellt werden können, entwickelt sich aus der technischen Erneuerung der industriellen Wertschöpfung eine fortschrittliche Wirtschaftsform, die die physikalischen Grenzen unseres Planeten berücksichtigt: Die technologiebasierte Bedarfswirtschaft. Produkte werden erst dann produziert, wenn sie gebraucht werden (just-in-time). Abfall existiert nicht mehr, da jedweder Output den Input für etwas Neues darstellt. Weltweit wird Deutschland das erste Land sein, das sich einer **biointelligenten Wertschöpfung** verschreibt. Mitte des 21. Jahrhunderts gilt Deutschland als Vorreiter einer nachhaltigen und zugleich wohlstandsorientierten Volkswirtschaft und wird zum globalen Leitbild.

Im Vergleich zur Digitalisierung sind für eine solche umfassende Biologische Transformation tiefere und längerfristige Fördermaßnahmen notwendig, da hierfür beispielsweise zunächst ein umfangreiches **interdisziplinäres Netzwerk** aufgebaut werden muss. Die Weiterentwicklung der identifizierten Basistechnologien, der interdisziplinäre Wissensaufbau und der **Transfer in die Industrie** können nur durch eine tiefgehende Vernetzung und möglichst breite Wissensbasis erfolgreich sein. Die Fortschritte, die durch die Umsetzung des Entwicklungspfades einer umfassenden Biologischen Transformation erreicht werden können, wiegen diesen Mehraufwand jedoch um ein Vielfaches auf. Darüber waren sich die im Rahmen der Voruntersuchung BIO-TRAIN befragten Experten einig. Zu den weiteren wesentlichen Maßnahmen für eine umfassende Biologische Transformation in Deutschland zählen die **Erforschung und Entwicklung der Basistechnologien**, ein **differenzierter gesellschaftlicher und interdisziplinärer Diskurs** sowie die **Ausarbeitung interdisziplinärer Qualifikations- und Ausbildungsformen**. Ziel muss es sein, die Basistechnologien im Hinblick auf den Transformationsprozess zu stärken, um deutschen Unternehmen auch in Zukunft eine führende Position zu sichern. Derzeit entwickelt sich die Chance, ein gesellschaftliches und politisches Momentum zu nutzen, um eine weitere Verbreitung konkreter Möglichkeiten und Konzepte analog zur Digitalisierung (Industrie 4.0) voranzutreiben. Mögliche Risiken die mit den neuen Technologien einhergehen, aber auch hemmende Rahmenbedingungen (bspw. restriktive Gesetzgebung) sollten hierbei berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Voruntersuchung liefern die **Grundlage zur Ausgestaltung eines umfassenden Transformationsprogramms**, das beispielsweise durch die in Arbeit befindliche Agenda »Von der Biologie zur Innovation« der Bundesregierung geleistet werden kann. Dazu gehört in einem ersten Schritt die Etablierung eines beratenden Organs für die Bundesregierung und die Ministerien sowie die Ausarbeitung einer nationalen Strategie zur Biologischen Transformation. Als »politisches Signal« werden darüber hinaus Bekanntmachungen zu interdisziplinären Verbundvorhaben in den Handlungsfeldern der Biologischen Transformation empfohlen. Langfristig sollten **Forschungs- und Transferzentren in den Handlungsfeldern** aufgebaut werden, die neben einer intensivierten Grundlagenforschung bzw. Unterstützung des Technologietransfers eine **richtungsweisende Funktion** übernehmen, um den Prozess ganzheitlich unter **Berücksichtigung aller Bedürfnisfelder** gestalten zu können. Der Aufbau von Expertenkreisen und Forschungsclustern zur Stärkung der interdisziplinären Zusammenarbeit im Kontext der Biologischen Transformation ist für diese Mammutaufgabe unverzichtbar. Auch für die **Verbreitung der Vision** der Biologischen Transformation in Gesellschaft und Industrie ist es zunächst notwendig, **interdisziplinäre Kompetenzen zu sammeln**.

»Die Biologische Transformation wird nur dann ein Erfolg, wenn wir mit ihr die großen Herausforderungen der Menschen besser lösen können.«

– Dr.-Ing. E.h. Manfred Wittenstein, Vorsitzender des Aufsichtsrats der WITTENSTEIN SE

# EXECUTIVE SUMMARY

»The greatest resource we have is human imagination.«  
– Osh. Agabi, Gründer und CEO, Koniku Inc.

**BIOTRAIN** is a broad preliminary study on the current state, potential, needs and barriers of the biological transformation of industrial value creation with a time horizon up to the year 2035 and beyond. The project was carried out between November 2017 and July 2018 by six Fraunhofer institutes, which were advised by 15 industrial and scientific advisory councils, the in-house Think Tank and the capital office of the Fraunhofer-Gesellschaft. With the help of extensive literature research, **123 expert interviews** and **10 workshops** (with a total of more than **200 participants**), the strengths, weaknesses, opportunities and risks of Germany, the basic technologies as well as possible development paths of a future development could be identified. Finally, the collected results were aggregated into **10 fields of action**, for which more than **200 research and 150 design topics** were formulated. The results of the study were presented to 85 participants in June 2018 during a **final conference** in Berlin. The main findings of the study are a comprehensive analysis of the strengths, weaknesses, opportunities and risks of the German economy in the course of the biological transformation process (**status quo**), a **foresight** on the essential technologies that can serve as facilitators of this process and possible development paths of the process **vision** as a desirable target state, which can be realized with **recommendations** for research and design.

The status quo analysis showed that German companies are currently not in a leading position in many relevant areas of biological transformation, such as biotechnology and information technology. However, the country is in a promising position. At present, there is an opportunity to exploit **social and political momentum** in order to promote the further dissemination of concrete possibilities and concepts analogous to digitization. Potential risks associated with the new technologies but also constraints (e. g. restrictive legislation) should be taken into account. Germany's **strengths** in international comparison include, for example, the distinct research institutions in both basic and transfer research as well as a privileged position in international trade, among others, through a good reputation of products »made in germany«. As **weaknesses** there was called an aversion to potential risks and disruptive changes in German society, which has led to restrictive legislation. Among the **opportunities** was seen nothing less than safeguarding Germany's industrial location and curbing environmental pollution, for example by upcoming jobs and conditions, as well as regionalization and resource efficiency. As a risk, the surveyed experts see an increasing complexity due to artificial intelligence, autonomous systems and new forms of life that could not be able to be controlled. Other risks, which can be understood as barriers, are new workplace dangers, as well as bureaucratization and overregulation, which may be accompanied by a slowdown in the transformation process.

As part of the forecast, depending on the use of opportunities and the handling of risks, three possible development paths were identified from the perspective of Germany, whose intensity, scope and speed of the transformation process are different. The development path of a **comprehensive biological transformation** with Germany as a pioneer served as a template for the development of a vision for the transformation process with a socially desirable target state. In comparison to digitization, deeper and longer-term support measures

are recommended for such a comprehensive biological transformation, as described in the vision, since, for example, a **comprehensive interdisciplinary network** must first be set up for this purpose.

The further development of the identified basic technologies, the interdisciplinary knowledge structure and the **transfer into industry** can only be successful through in-depth networking and the broadest possible knowledge base. However, the advances that can be achieved by implementing the evolutionary path of a comprehensive biological transformation multiply this overhead. The experts interviewed in the preliminary investigation BIOTRAIN agreed on this point.

The results of the present preliminary survey provide the basis for the design of a comprehensive transformation program, which may be achieved through the Federal Government's agenda in progress »From Biology to Innovation«. In a first step, this includes the establishment of an advisory board for the Federal Government and the ministries as well as the development of a national strategy for the biological transformation. In addition, announcements on interdisciplinary collaborative projects in the fields of action of the biological transformation are recommended as a »political signal«. In the long term, research and transfer centers should be set up in the fields of action, which in addition to intensified basic research and / or support for technology transfer play a pioneering role in order to be able to shape the process holistically. The establishment of expert circles and research clusters to strengthen interdisciplinary cooperation in the context of biological transformation is indispensable. For the dissemination of the vision of biological transformation in society and industry, it is first necessary to gain interdisciplinary competences.

»The biological transformation will only succeed, if it enables us to meet the great challenges of humanity.«  
– Dr.-Ing. E.h. Manfred Wittenstein, Vorsitzender des Aufsichtsrats der WITTENSTEIN SE

# 1 EINLEITUNG

## **Die industrielle Produktion: Das Herz der deutschen Wirtschaft**

Die industrielle Produktion ist das Herzstück der deutschen Volkswirtschaft. Deutlich wird dies nicht zuletzt in Krisenzeiten, u. a. während der Finanz- und Eurokrise. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Zum einen machen die hierzulande produzierten Güter über 90 % der Exportleistung der Bundesrepublik aus und tragen somit im Kern dazu bei, dass Deutschland seit Jahrzehnten eine positive Leistungsbilanz aufweist. Weltweit haben deutsche Unternehmen einen hervorragenden Ruf im Punkte Qualität und Zuverlässigkeit. Außerdem tritt die Industrie deutschlandweit als größter Förderer von Innovationen auf. Alleine rund 85 % aller Investitionen in Forschung und Entwicklung werden in und von produzierenden Unternehmen getätigt. Andererseits ist die Industrie deutschlandweit für die größte Inanspruchnahme der Umwelt sowie massive sozio-technologische Folgeerscheinungen verantwortlich. Natürliche Ressourcen, die sich teilweise über Jahrtausende gebildet haben, werden in wenigen Jahrzehnten nahezu vollständig verbraucht. Eine Fortschreibung dieser Entwicklung führt zwangsläufig zu einer unverantwortlichen Ausbeutung natürlicher Ressourcen. Sowohl Entwicklungs- und Schwellenländern als auch zukünftigen Generationen wird damit die Möglichkeit genommen, selbstständig über die Verteilung von Natur-, Human- und Sachkapital zu entscheiden.

## **Nachhaltige Wertschöpfung: Ein unerfüllter Wunsch**

Eine nachhaltige Wirtschaftsweise ist also unabdingbar für die Zukunftsfähigkeit der deutschen und der globalen Wirtschaft. Mit dem Bericht »Limits to Growth« an den Club of Rome im Jahr 1972 wurde die Endlichkeit der Ressourcen, die unser gesamtes Wirtschaftsmodell infrage stellt, erstmals einer breiten Öffentlichkeit bewusst. Seither wurde eine Vielzahl von nationalen und internationalen Maßnahmen eingeleitet, die u. a. das im Jahr 1987 durch die Brundtland-Kommission präsentierte und heute weitgehend anerkannte Konzept der Nachhaltigkeit hervorbrachten. Um sich dem hier formulierten Zielzustand zu nähern, verabschiedeten die Vereinten Nationen (UN) in regelmäßigen Abständen sogenannte Nachhaltigkeitsziele. Gleichzeitig gewinnen, je nach politischer Stimmungslage, verschiedene Konzepte für eine nachhaltige Wirtschaftsweise mal mehr, mal weniger Aufmerksamkeit. Zu den prominentesten zählen die Kreislaufwirtschaft, die Bioökonomie und die Bedarfswirtschaft. Obgleich alle Konzepte für sich (in Teilen) als Zielzustände einer nachhaltigen Wirtschaftsweise dienen können, ist bislang unklar, wie eine Transformation in die eine oder die andere Richtung aussehen soll. Nach fast einem halben Jahrhundert intensiver Anstrengungen und Investitionen in Billionenhöhe sind wir heute weit von einer Lösung des Nachhaltigkeitsproblems entfernt.

## **Warum sich der Erfolg bislang in Grenzen hält: Leakage, Rebound, Backfire, Zeitverzögerung und fehlende Bedürfniszentrierung**

Mit einem durch intensive Forschungsarbeiten gestiegenen Wissen wächst auch die Komplexität des Umweltproblems. Deutlich wird dies anhand der globalen Klima- und Ressourcenpolitik. Die weltweiten Treibhausgasemissionen steigen unvermindert an. Selbst Deutschland, einst Leitbild gelungener Klimapolitik, wird seine Klimaziele im Jahr 2020 weit verfehlen, im neuen Koalitionsvertrag werden sie daher folgerichtig auch offiziell

aufgegeben. Gleichzeitig führen nationale Einsparungen oft lediglich zu einer Verlagerung des Problems, z. B. durch Auslagerung treibhausgasintensiver Produktionsschritte ins Ausland (Leakage-Effekt). Nicht nur durch den Ausstieg der USA scheint eine Umsetzung des im Jahr 2015 in Paris vereinbarten Klimaschutzplans mehr als fraglich. Ebenso kritisch kann die zuletzt verstärkt in Deutschland geführte Effizienzdebatte gesehen werden. Obwohl heute nahezu jedem Entscheider in Wissenschaft, Politik und Wirtschaft bewusst ist, dass die Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz durch sogenannte Rebound- oder Backfire-Effekte<sup>1</sup> nahezu vollkommen neutralisiert wird, stellt sie in vielen Initiativen weiterhin die Primärstrategie dar. Wesentlich weniger Beachtung in der Nachhaltigkeitspolitik findet der Konsum von Gütern. Doch auch wenn zuletzt vermehrt Untersuchungen veröffentlicht wurden, die ein sich wandelndes Konsumverhalten festgestellt haben wollen, scheint eine Verzichtsbewegung, wie sie in der Suffizienz-Debatte gefordert wird, kein weltweit konsensfähiges Konzept. Die Angleichung der Lebensverhältnisse in Entwicklungs- und Schwellenländern an entwickelte Volkswirtschaften führt zu einer stärkeren Belastung der Umwelt, die nicht durch eine Reduktion des Verbrauchs in den Industrieländern kompensiert wird. Zu weit entfernt liegen außerdem Ausführung und Wirkung einer Handlung und zu wenig fokussieren die Konzepte auf reale menschliche Bedürfnisse.

### Erfüllung materieller Bedürfnisse als Basis für Wohlstand und Wohlbefinden

Das Nachhaltigkeitskonzept zielt im Wesentlichen auf eine gerechte Verteilung von Möglichkeiten zur Bedürfnisbefriedigung zwischen Menschen derselben und nachfolgender Generationen ab. Man spricht hier von inter- und intragenerationeller Gerechtigkeit. Die Inanspruchnahme der Umwelt erfolgt dabei in erster Linie durch die Befriedigung materieller Bedürfnisse, die im Kern in die Kategorien Ernährung, Gesundheit, Konsum, Mobilität und Wohnen zusammengefasst werden können (s. Abb. 1).

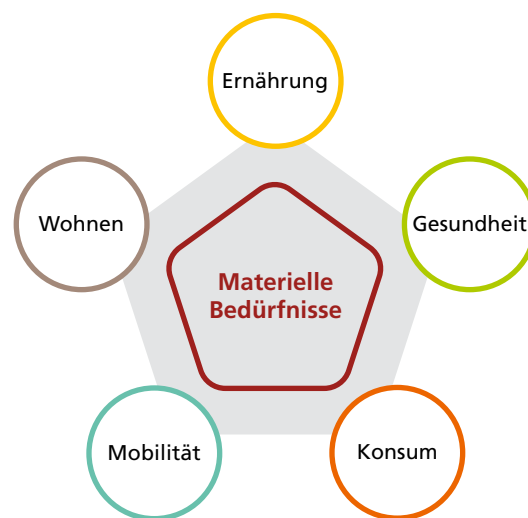


Abb. 1 Materielle Bedürfnisfelder

<sup>1</sup> Ein Rebound-Effekt beschreibt einen feudaleren Konsum infolge einer monetären Einsparung durch eine Effizienzmaßnahme. Ein Beispiel: Die Effizienzmaßnahme an Maschine X führt zu einer Einsparung von Strom und damit zu weniger monetären Aufwendungen. Diese werden vom Unternehmen aber nicht dauerhaft gespart, sondern zielgerichtet investiert, was wiederum neue Treibhausgasemissionen nach sich zieht. Von einem Backfire-Effekt spricht man, wenn die negativen Folgeerscheinungen die ursprünglichen Effizienzgewinne übersteigen.

## Gerechte Befriedigung der materiellen Bedürfnisse zukünftiger Generationen ist mit heutigen Produktionsweisen nicht möglich

Vor der Industriellen Revolution lebten Menschen dort, wo sie ihre Nahrung, Kleidung und Lebensmittel herstellten. Heute werden Güter in abgegrenzten Fertigungseinheiten (Fabriken etc.) über immer komplexere Lieferketten, die sich teilweise über die gesamte Welt erstrecken, hergestellt. Arbeitnehmer nehmen teilweise enorme Strecken auf sich, um zu ihrer Arbeit zu pendeln. Gleichzeitig werden Unmengen von Lebensmitteln um die halbe Welt verschifft, um dann zur Hälfte weggeworfen zu werden.

Wenn eine realistische nachhaltige Wertschöpfung bedeutet, unseren Lebensstandard zu halten, dabei aber natürliche Ressourcen nicht zu verbrauchen, benötigen wir eine *Renaissance nachhaltiger Produktionsweisen mit den Technologien von morgen*. Möglich wird dies mit der Biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung.

»Die Biologische Transformation hat das Potenzial, zum Erhalt des Industriestandortes Deutschland beizutragen. Wesentlich wird hier die Entwicklung neuer Produktionstechnologien – Made in Germany – sein, mit der die Biologische Transformation in die Welt getragen wird.«  
*(Prof. Dr.-Ing. Siegfried Russwurm, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg)*

## Die Biologische Transformation der Industrie als Prozess auf dem Weg zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise

Die Biologische Transformation der industriellen Wertschöpfung beschreibt die zunehmende Nutzung von Materialien, Strukturen, Prozessen und Organismen der belebten Natur in der Technik. Diese systematische Anwendung von Wissen über biologische Prozesse führt im Kontext der Wertschöpfung zu einer zunehmenden Integration von Produktions-, Informations- und Biotechnologie mit dem Potenzial, künftige Produkte, Herstellprozesse, Organisationen, kurz die Lebensweise der Menschen insgesamt tiefgreifend zu verändern. Abb. 2 illustriert die Integrationsebenen der Biologischen Transformation sowie die Wertschöpfung gestern, heute und morgen.

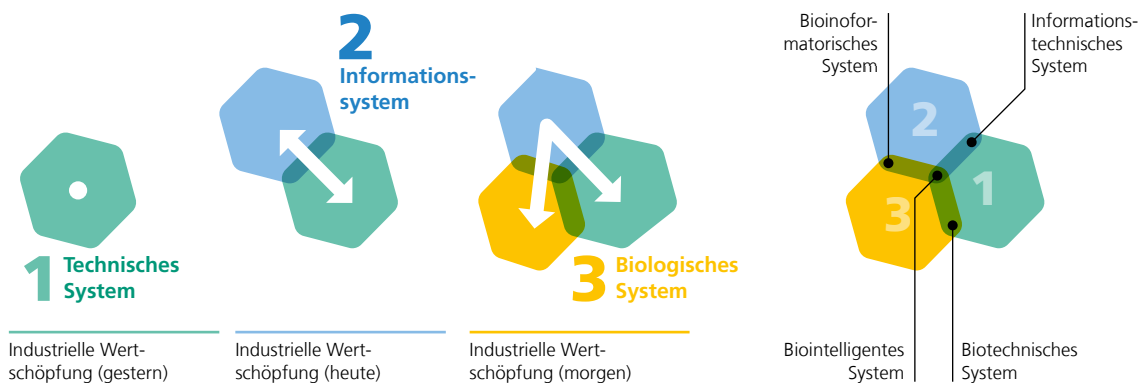


Abb. 2 Integrationsebenen der Biologischen Transformation, Wertschöpfung gestern, heute und morgen



Der Prozess der Biologischen Transformation kann in drei Entwicklungsmodi unterschieden werden (vgl. Abb. 3). Zunächst erlaubt es die **Inspiration**, über Jahrmillionen evolutionär entstandene biologische Phänomene auf Wertschöpfungssysteme zu übertragen. Unternehmen entwickeln mit diesem Ansatz neuartige Materialien und Strukturen (z. B. Leichtbau), Funktionalitäten (z. B. Biomechanik) sowie Organisations- und Kooperationslösungen (z. B. Schwarmintelligenz, neuronale Netze, evolutionäre Algorithmen). In einem weiteren Modus findet das Wissen über die Biologie Anwendung in Form einer tatsächlichen **Integration** biologischer Systeme in Produktionssysteme (z. B. Substitution chemischer durch biologische Prozesse). Anwendungsbeispiele dieses Modus sind u. a. biotechnologisch hergestellte Pharmazeutika, aus Zucker und/oder CO<sub>2</sub>-Abfallströmen gewonnene Grundstoffe für die chemische Industrie oder die Nutzung von Mikroorganismen zur Rückgewinnung von seltenen Erden aus Magneten. Drittens führt die umfassende **Interaktion** technischer, informatorischer und biologischer Systeme zur Schaffung völlig neuer, autarker Produktionstechnologien und -strukturen, sogenannten biointelligenten Wertschöpfungssystemen. Die wesentlichen Integrationsebenen, die die Grundlage für den Prozess bilden sind demnach die technische Ebene, die Informationsebene und die biologische Ebene:

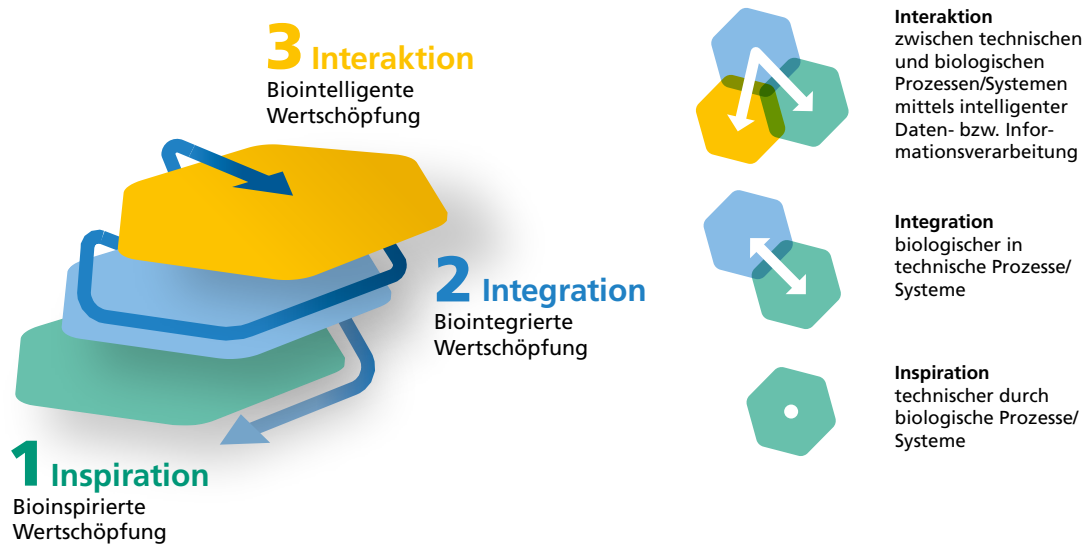


Abb. 3 Entwicklungsmodi der Biologischen Transformation

Im Kern vollzieht sich der Wandel hin zu einer, dezentralen Herstellung von Konsumgütern und Nahrungsmitteln mit Hilfe von Smart Biomanufacturing Devices (intelligenten dezentralen Produktionszellen). Aus der technischen Erneuerung der industriellen Wertschöpfung entwickelt sich eine fortschrittliche Wirtschaftsform: Die technologiebasierte Bedarfswirtschaft. In Summe führt die Dezentralisierung der Wertschöpfung mit Hilfe biointelligenter Systeme zu einer massiven Reduktion des Verbrauchs von nicht-regenerativen Materialien und verursachten Emissionen. Re- und Upcycling sind intendierter Teil des Produktlebens. Biobasierte Produkte können problemlos an die Biosphäre abgegeben und zurück in den Wertschöpfungskreislauf geführt werden. Die Substitution importierter durch regional verfügbare biobasierte Materialien verringert die Importabhängigkeit stark. In Summe sinkt der individuelle Fußabdruck der Bürgerinnen und Bürger auf ein ökologisch vertretbares Maß. Die Ökosphäre wird entlastet.

Die hier vorgestellte breit angelegte Voruntersuchung zum aktuellen Stand, Potenzialen, Bedarfen und Hemmnissen der Biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung wurde im Rahmen des BIOTRAIN-Projekts, gefördert vom BMBF, erstellt. Sie umfasst einen Zeithorizont bis zum Jahr 2035 und darüber hinaus. Im Kern sollte ein möglichst ganzheitliches Bild der Biologischen Transformation gezeichnet werden. Entsprechend konzentrierte sich das Vorhaben nicht ausschließlich auf die Nutzung biologischer Ressourcen und den

aus ihnen entwickelten Produkte und Dienstleistungen, sondern gleichermaßen auf den Einsatz von Bionik und Biotechnologie in traditionellen Wertschöpfungs-umgebungen sowie der Verschmelzung von Bio-, Informations- und traditioneller Produktionstechnik. Darüber hinaus wurde von Beginn an ein Dialog über sämtliche Interessengruppen angeregt.

**Projektorganisation und -durchführung:** Die Leitung des Projekts hatte Prof. Thomas Bauernhansl (Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA). Ergänzt wurde das Konsortium durch das Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, das Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU und das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT. Über die gesamte Projektlaufzeit standen dem Konsortium 15 Beiräte aus Wissenschaft und Industrie sowie der haus-eigene Think Tank der Fraunhofer-Gesellschaft und das Fraunhofer Hauptstadtbüro zur Seite. Abb. 4 illustriert die Projektstruktur.

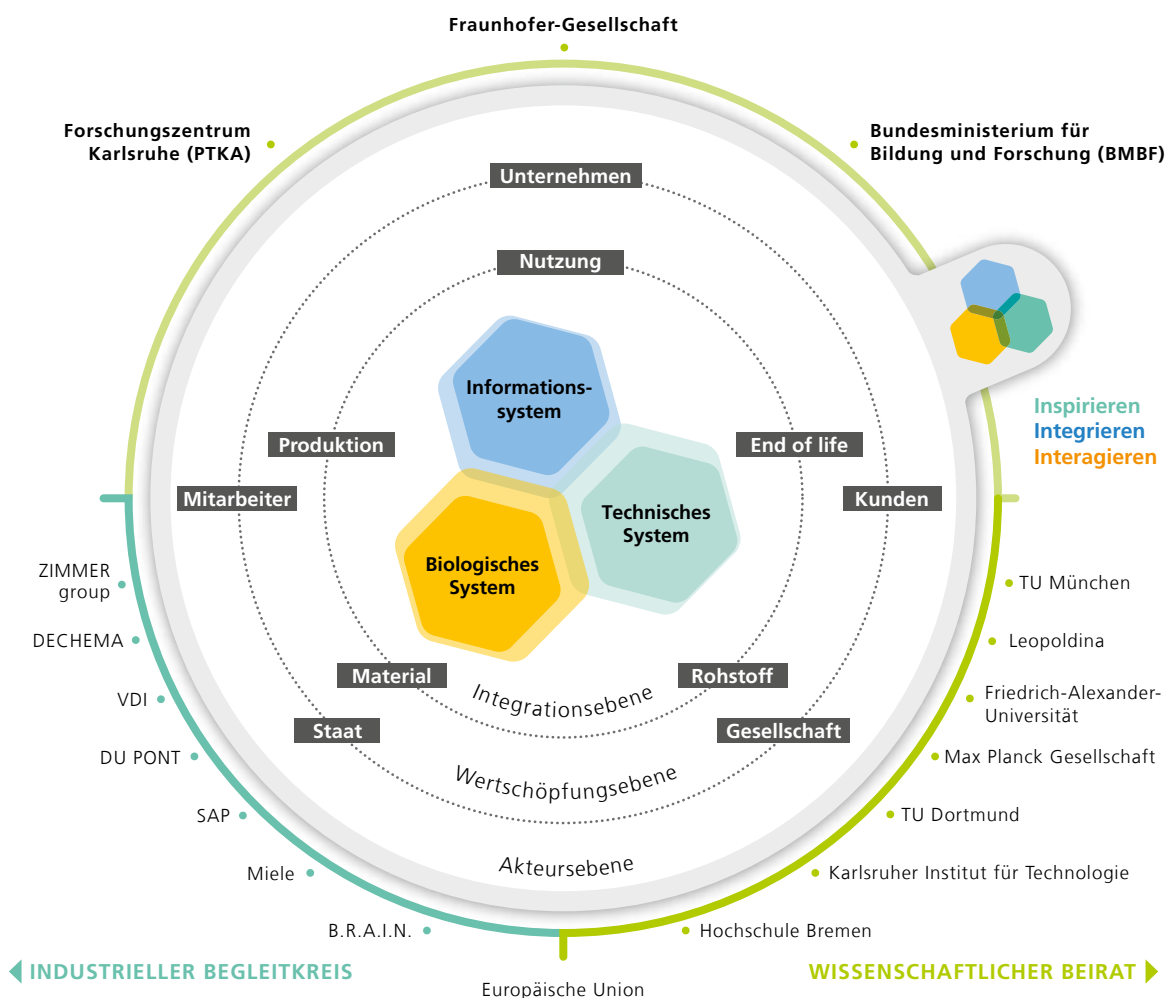


Abb. 4 BIOTRAIN-Projektorganisation

Der vorliegende Bericht umfasst sechs Kapitel. Nach einer kurzen Einführung in **Kapitel 1**, wird in **Kapitel 2** die Methodik der Untersuchung beschrieben. **Kapitel 3** erörtert den Status-Quo, der sich aus einer Analyse der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken der deutschen Volkswirtschaft im Hinblick auf eine Biologische Transformation ergibt. Ergänzt wird das Kapitel durch eine zusätzliche Analyse relevanter Indikatoren. **Kapitel 4** illustriert eine Vorausschau auf die potenziellen Basistechnologien des Transformationsprozesses und

zeigt mögliche Entwicklungspfade für eine Biologische Transformation der deutschen Volkswirtschaft bis zum Jahr 2050 und darüber hinaus auf. **Kapitel 5** skizziert die Vision einer biointelligenten Wertschöpfung und legt dar, wie die deutsche Industrie zum Vorreiter und Leitmarkt dieser Entwicklung werden kann. Hierzu werden zehn wesentliche Handlungsfelder der Biologischen Transformation eingeführt, die jeweils mit Empfehlungen zu Forschungs- und Gestaltungsthemen verbunden sind. An ausgewählten Stellen wird **Kapitel 5** durch verschiedene Anwendungsbeispiele biointelligenter Produktionsweisen ergänzt. In **Kapitel 6** werden das Vorgehen und die Ergebnisse der Untersuchung abschließend zusammengefasst und aggregierte Empfehlungen für den Bund und die Fraunhofer-Gesellschaft formuliert.

**Hinweise zum Lesen der Broschüre:** Die vorliegende Broschüre bietet einen zusammenfassenden Überblick über die Ergebnisse der Voruntersuchung BIOTRAIN. Detaillierte Ausarbeitungen aller hier erläuterten Ergebnisse befinden sich auf der BIOTRAIN-Website, unter **[www.biotrain.info](http://www.biotrain.info)**. Interessierte Leser können mit Hilfe der QR-Codes und URL-Links, an ausgewählten Stellen des Dokuments, direkt auf vertiefende Analysen zugreifen.

»Der Wissenszuwachs in den Forschungsfeldern Biologie, Biotechnologie und Bioinformatik war in den letzten Jahren enorm. Nun muss in der Industrie das Interesse geweckt werden, sich mit den neu entdeckten Prinzipien zu befassen, damit sie transferiert werden können.«  
*(Dr. Hubert Krammer, Forschungskordinator, Fraunhofer-Gesellschaft)*

# 2 METHODIK

Dieses Kapitel beschreibt die methodischen Grundlagen der BIOTRAIN Voruntersuchung und die einzelnen Arbeitsschritte in der ausgeführten Reihenfolge. Die Untersuchung kann in sieben wesentliche Arbeitsschritte eingeteilt werden, die in Abb. 5 grafisch dargestellt sind. Die einzelnen Arbeitsschritte und wesentlichen Outputs werden in den darauffolgenden Kapiteln zusammengefasst. Grundsätzlich können die Untersuchungsergebnisse in drei Teile gegliedert werden: (1) Den Status Quo, im Sinne der Ausgangsposition des Wirtschaftsstandorts Deutschland, (2) der Vorausschau, im Sinne von Entwicklungsmöglichkeiten des Landes im Kontext der Biologischen Transformation und (3) der Vision und Empfehlungen an die Fraunhofer-Gesellschaft und den Bund für eine umfassende Biologische Transformation. Entsprechend wurde die Kapitelstruktur dieser Broschüre gewählt. Im Folgenden wird auf die sieben Arbeitsschritte kurz eingegangen.

Der erste Arbeitsschritt, die **Instanziierung** diente der Finalisierung einer bereits in der Antragsphase aufgestellten initialen Definition der Biologischen Transformation und der Einigung des Konsortiums auf eine gemeinsame Sprache. Außerdem wurden in diesem Schritt begleitende Gremien aus Wissenschaft und Industrie aufgebaut und wesentliche Herausforderungen bzw. Treiber identifiziert, die im Rahmen der Voruntersuchung adressiert werden sollten. Weiterhin werden in diesem Teil die Betrachtungsperspektiven und Fokusthemengebiete festgelegt, die in dem darauffolgenden Teil die Basis für das Bilden von Hypothesen darstellten.

Die erste **Feinanalyse** umfasste die Hypothesenbildung als Grundlage für eine Analyse der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (SWOT) des Wirtschaftsstandorts Deutschland. Auf dieser Grundlage erfolgte die Erarbeitung eines Gesprächsleitfadens und die Entwicklung eines Technologiebewertungsansatzes, der für die Bestimmung einiger wesentlicher Basistechnologien aus einer umfangreichen Sammlung von potenziellen Befähigungstechnologien der Biologischen Transformation verwendet werden konnte.

Die darauf folgende Organisation und Durchführung von insgesamt **123 Experteninterviews** ergab eine Fülle an Ergebnissen. Unter anderem wurden hieraus Validierungen der Hypothesen, mögliche Zukunftsbilder einer biologisch transformierten Wertschöpfung und Technologiebeispiele gewonnen, die im Zuge der Biologischen Transformation an Relevanz gewinnen werden. Die im Rahmen der Interviews gesammelten Einschätzungen erlaubten es, den Status Quo des Wirtschaftsstandorts Deutschland vor dem Hintergrund der Biologischen Transformation aus Sicht der befragten Experten wiederzugeben.

In der anschließenden zweiten **Feinanalyse** wurden die Ergebnisse der Interviews zusammengeführt, strukturiert und mit zusätzlichen Literaturrecherchen validiert. Hieraus konnte eine umfassende Analyse der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (SWOT) Deutschlands für den Transformationsprozess herausgearbeitet werden und zehn wesentliche Handlungsfelder der Biologischen Transformation, die den Orientierungsrahmen für alle darauffolgenden Arbeitsteile bildeten, identifiziert werden. Die generierten Ergebnisse aus den Experteninterviews wurden in der zweiten Feinanalyse als Basis für die Entwicklung eines branchenspezifischen Workshop-Konzepts verwendet.

Das Workshop-Konzept wurde in insgesamt zehn **Akteursworkshops** mit rund 200 Teilnehmern angewandt. Als Ergebnisse konnten aus den Workshops validierte und hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit beurteilte Zukunftsthesen sowie Priorisierungen und Ergänzungen der Technologien, Herausforderungen und Forschungs- und Gestaltungsthemen gewonnen werden. Die im Rahmen der Workshops generierten Ergebnisse lassen eine Vorausschau für den Wirtschaftsstandort Deutschland vor dem Hintergrund der Biologischen Transformation zu, die in den darauffolgenden Arbeitspaketen zur Ermittlung einer Empfehlung für eine Forschungsstrategie der Fraunhofer-Gesellschaft und der öffentlichen Hand herangezogen wurde.

Auf die Durchführung der Akteursworkshops folgte die **Konsolidierung**. Hierbei wurden aus den validierten Zukunftsthesen, Technologien und Hemmnissen mittels Szenariotechnik mögliche Entwicklungspfade der Biologischen Transformation abgeleitet. Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungspfade wurde ein wünschenswerter Zielzustand (Vision) für den Wirtschaftsstandort Deutschland definiert und die hierzu nötigen Forschungs- und Gestaltungsthemen ausgearbeitet. Diese wurden von weiteren fachlich qualifizierten Experten im Rahmen eines »Experten-Soundings« validiert und ergänzt. Sie dienen somit als konkrete Empfehlungen für eine Forschungsstrategie der Fraunhofer Gesellschaft und der öffentlichen Hand.

Die Verbreitung dieser Empfehlungen und der Untersuchungsergebnisse erfolgte im letzten Arbeitsschritt. Neben der Veröffentlichung einer Ergebnisbroschüre wurden zahlreiche Vorträge gehalten und wissenschaftliche Aufsätze publiziert, Zeitungsinterviews geführt und eine Abschlusskonferenz in Berlin organisiert. Ziel der Verbreitungsaktivitäten war es, ein gesellschaftliches Momentum zu erzeugen, um ähnlich wie bei der Digitalisierung im Kontext von »Industrie 4.0«, eine weitere selbstständige Verbreitung und Entwicklung anzustoßen.

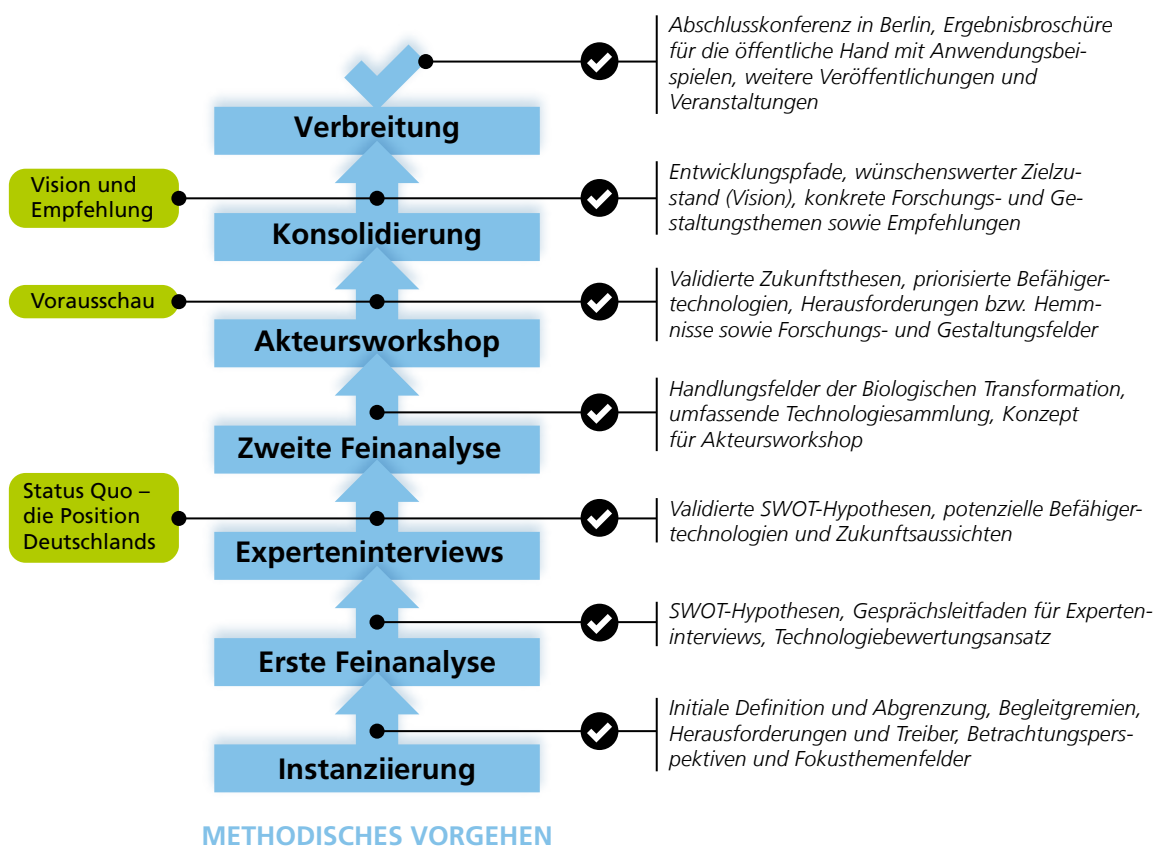


Abb. 5 Methodische Vorgehensweise und Ablauf der Voruntersuchung BIOTRAIN

# 3 STATUS QUO

»Weltweit sind wir nicht an der vordersten Front. Die USA sind uns insbesondere in der Biotechnologie voraus. Deutschland hat jedoch, durch seine grundsätzlich systemische Denkhaltung, eine gute Voraussetzung.«  
*(Dr.-Ing. E.h. Manfred Wittenstein, Vorsitzender des Aufsichtsrats der WITTENSTEIN SE)*

Die Status-Quo-Analyse basiert auf den Ergebnissen der Experteninterviews und einer vergleichenden Analyse wesentlicher Indikatoren. Der für die Experteninterviews eigens erarbeitete Interview-Leitfaden zielte durch eine methodische Abfrage von Hypothesen auf die Analyse der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken innerhalb eines definierten Betrachtungsraums ab. Die Dimensionen Technologie, Mensch, Organisation und Rahmenbedingungen bildeten die Überkategorien in diesem Betrachtungsraum, für die wiederum 14 Fokusthemenfelder identifiziert wurden. Die Hypothesen wurden innerhalb der Fokusthemenfelder aufgestellt und gingen in den Interview-Leitfaden über, für den der Betrachtungsraum die strukturelle Grundlage darstellte. Aufgrund der Unterteilung in die einzelnen Fokusthemen konnten die Interview-Fragen spezifisch nach den jeweiligen Kernkompetenzen der befragten Experten ausgewählt werden. (Jeweils 4–5 Fokusthemenfelder wurden pro Interview, je nach Fachgebiet der Interviewpartner, vorab ausgewählt, so dass am Ende alle Fokusthemenfelder in gleicher Verteilung betrachtet wurden.) Abbildung 6 illustriert den Betrachtungsraum, der die Grundlage der Hypothesenbildung darstellte. In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der Experteninterviews (3.1) sowie einer ergänzenden Recherche (3.2) zur Validierung des Status-Quo Deutschlands im internationalen Vergleich zusammengefasst.

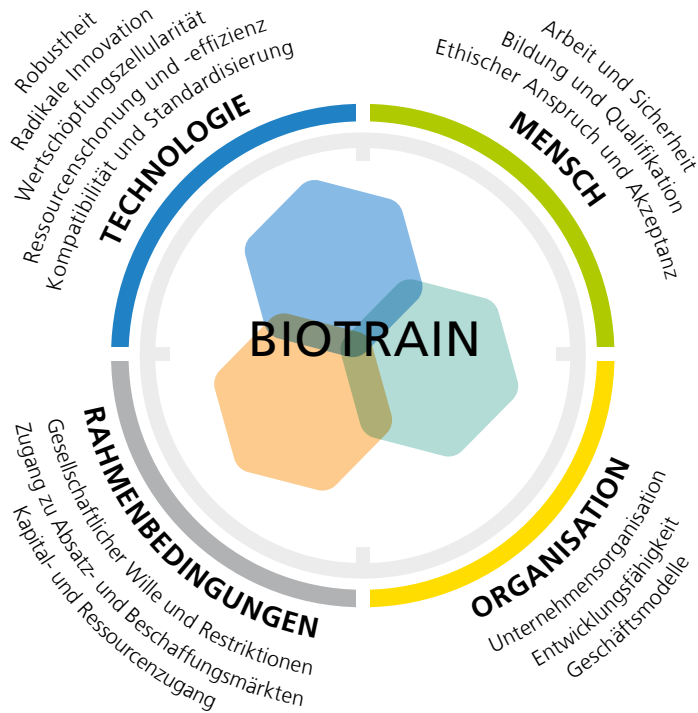


Abb. 6 Betrachtungsraum als Grundlage der Hypothesenbildung

### 3.1 SWOT-ANALYSE

Nachfolgend wird der derzeitige Stand Deutschlands im Hinblick auf die Biologische Transformation, auf Basis der Einschätzung der Experten, zusammenfassend dargestellt und im Einzelnen erläutert. Abb. 7 fasst die wesentlichen Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken Deutschlands zusammen.

<p><b>Stärken</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausgeprägte Forschungs- und KMU-Landschaft sowie innovative Global Player</li> <li>• »Made in Germany«</li> <li>• Privilegierte Stellung im internationalen Handel</li> <li>• Krisensicherheit und Stabilität</li> <li>• Standardisierung und Arbeitsschutzmaßnahmen</li> <li>• Umweltbewusstsein und ethischer Anspruch</li> <li>• Vielfalt und Qualität des (Aus-)Bildungssystems</li> </ul>	<p><b>Schwächen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Risikoaversion und Konservativität führt zu inkrementeller Weiterentwicklung</li> <li>• Fehlende Akzeptanz und unzureichende Vermarktung neuer Technologien</li> <li>• Restriktive Gesetzgebung</li> <li>• Hierarchische Strukturen hemmen dynamische Entwicklungsfähigkeit</li> <li>• Abhängigkeit von Rohstoffen, Energie u. Kapital</li> <li>• Verständnis und Entwicklung von digitalen Systemen und Geschäftsmodellen</li> </ul>
<p><b>Chancen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhalt des Industriestandortes Deutschland</li> <li>• Neue/neuartige Arbeitsplätze und -bedingungen</li> <li>• Regionalisierung und Ressourceneffizienz</li> <li>• Bioinspirierte Unternehmensstrukturen und Zellularität der Wertschöpfung</li> <li>• Standardisierung als Werkzeug für größere Akzeptanz und Sicherheit</li> <li>• Prozessanpassungsfähigkeit und Robustheit</li> <li>• Entwicklung digitaler Systeme und Geschäftsmodelle</li> </ul>	<p><b>Risiken</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Restriktive Gesetzgebung</li> <li>• Gesellschaftlicher Wille</li> <li>• Standardisierung als kritischer Erfolgsfaktor</li> <li>• Beherrschbarkeit autonomer Systeme</li> <li>• Neue Gefahren am Arbeitsplatz</li> <li>• Protektionistische Tendenzen und Ressourcenabhängigkeit</li> </ul>



SWOT-Analyse (PDF-Dokument)

Abb. 6 Betrachtungsraum als Grundlage der Hypothesenbildung

### 3.1.1 STÄRKEN

#### **Ausgeprägte Forschungs- und KMU-Landschaft sowie innovative Global Player**

Die Grundlagenforschung Deutschlands ist im internationalen Vergleich gut aufgestellt – dies gilt sowohl für deren Breite als auch die Tiefe. Im Kontext der Biologischen Transformation sind insbesondere die Forschungsfelder Bionik, Biotechnologie und Bioökonomie zu nennen, welche bereits in der Vergangenheit Ausgangspunkt für weitreichende Innovationen, wie bspw. den Lotuseffekt bei Oberflächenbeschichtungen, neuen Logistikkonzepten, basierend auf Schwarmintelligenz und Flugstrukturkonzepten wie Winglets waren. Im internationalen Vergleich befindet sich die Forschung in Deutschland in den genannten Feldern auf Augenhöhe. Neben der existierenden Forschungslandschaft bilden die kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) die Basis für Agilität und Wandlungsfähigkeit. Die existierende KMU-Landschaft ist im internationalen Vergleich, sowohl hinsichtlich ihrer Vielfalt als auch hinsichtlich der Qualität ihrer Produkte, hoch angesehen und wird allgemein mit den Attributen verlässlich, traditionell, wirtschaftlich sowie hochwertig charakterisiert. Neben KMU gibt es viele deutsche Großkonzerne, die schon lange existieren und durch ihre Anpassungsfähigkeit auch Wandlungsfähigkeit zeigen. Diese Wandlungsfähigkeit gewinnen sie teilweise durch die Übernahme von Start-ups hinzu. Insgesamt ist die Wandlungsfähigkeit in Deutschland auf einem guten Niveau eingeschätzt.

#### **»Made in Germany«**

Das Etikett »Made in Germany« ist weltweit ein anerkanntes Gütesiegel für qualitativ hochwertige Waren. Produkte, welche in Deutschland entwickelt und hergestellt oder zumindest unter deutschen Standards im Ausland produziert werden, gelten als robust, funktional, leistungsfähig und langlebig. Diese positive Assoziation mit »Made in Germany« stärkt den Ruf deutscher Waren im Ausland und bildet eine der zentralen Grundlagen für den herausragenden Erfolg Deutschlands als Exportnation im internationalen Handel. Zudem gilt Deutschland nach Einschätzung der befragten Experten bereits heute als einer der Vorreiter bei der Umsetzung von Nachhaltigkeit in der Wertschöpfung.

#### **Privilegierte Stellung im internationalen Handel**

Die Biologische Transformation besitzt das Potenzial das Wettbewerbs- und Wertschöpfungsumfeld von Unternehmen signifikant zu verändern. Für die in diesem Zuge erforderliche schnelle und erfolgreiche Repositionierung ist ein umfangreicher Zugang, sowohl zu Absatz-, als auch zu Beschaffungsmärkten unabdingbar. In diesem Kontext wird die Position der Bundesrepublik Deutschland als eine global bedeutende Industriation als Stärke wahrgenommen. Hierbei sind die guten außenpolitischen Beziehungen und die Wirtschaftsstärke der Europäischen Union Privilegien, die v. a. den internationalen Handel betreffen. Zum einen sichern diverse Handelsabkommen global einen weitestgehend freien und nahezu unbeschränkten Handel, zum anderen stellt die Europäische Union mit dem Schengen-Raum selbst einen großen Absatz- und Beschaffungsmarkt dar. Sowohl die vielfältige internationale Partnerschaft, als auch die Einbettung in einen der weltweit größten Binnenmärkte schaffen Vertrauen und Sicherheit für die ansässigen Unternehmen und fördert die Attraktivität Deutschlands als Industriestandort.

#### **Krisensicherheit und Stabilität**

Die stabile politische Situation kombiniert mit der wirtschaftlichen Lage Deutschlands ist eine gute Basis für Entwicklungen im Rahmen der Biologischen Transformation. Neben einer allgemein gefestigten Demokratie bilden eine umfassende soziale Absicherung, eine deeskalierende Außenpolitik sowie eine stabile Währung das Grundgerüst für die politische und gesellschaftliche Stabilität. Gezielte Fördermaßnahmen unterstützen



die ansässige Industrie insbesondere in Krisenzeiten mit dem Ziel, Deutschland als Produktionsstandort langfristig zu erhalten. Der Schwerpunkt hierbei liegt vor allem auf KMU.

### **Standardisierung und Arbeitsschutzmaßnahmen**

Sowohl für die Integration als auch für die Interaktion sind im Zuge der Biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung technische Lösungen, welche die Interaktion technischer und biologischer Systeme ermöglichen, von herausragender Bedeutung. Die Einführung neuartiger Wertschöpfungsstrukturen, neuer Arbeitsbedingungen und Arbeitsprozesse kann lediglich unter bereits vorab geschaffenen Standards robust, sicher und effizient gelingen. Vorteilhaft ist für das angestrebte Vorhaben, dass Deutschland auf diesem Gebiet international eine starke Position einnimmt. Deutsche Standards werden weltweit als äußerst hochwertig und vertrauenswürdig erachtet und bilden häufig die Basis für internationale Normen. Bei der Etablierung solcher Standards und Normen spielen unabhängige Dachverbände und Organisationen wie bspw. der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) eine herausragende Rolle. Besonders Normen aus den Materialwissenschaften und der Biologie sowie Standards bezüglich Herstellungs- und Verarbeitungsverfahren (z. B. Drucktechniken) und dem IT-Bereich werden als relevant für die Biologische Transformation gesehen. Auch Arbeitsschutzmaßnahmen sind hierzulande weitestgehend standardisiert und reguliert und der deutsche Arbeitsschutz wird im internationalen Vergleich als besonders gut wahrgenommen. Die Bedeutung des Arbeitsschutzes wird sich im Zuge der Biologischen Transformation insbesondere in Bezug auf biotechnische Systeme zunehmend verändern. Ein hohes Vertrauen der Mitarbeiter in die Arbeitsschutzmaßnahmen unterstützt dabei die Umsetzung der Biologischen Transformation.

### **Umweltbewusstsein und ethischer Anspruch**

Auf Grund der starken Verknüpfung von Biologie und Ethik sind Fragestellungen hinsichtlich der Akzeptanz und des ethischen Anspruchs relevant. Schon jetzt wird Deutschland in Teilen als Vorreiter im Bereich Umweltschutz und Nachhaltigkeit angesehen. Deutsche Unternehmen weisen sehr gute Voraussetzungen in den Bereichen Sicherheit und Umweltschutz auf und belegen in diesen Bereichen weltweit Spitzenpositionen. Die deutsche Gesellschaft, verglichen mit anderen Industrienationen, hat eine hohe Sensibilität für diese Themen. Sie könnte beispielsweise in Bezug auf die Nachhaltigkeit eine katalytische Wirkung auf bestimmte Themen der Biologischen Transformation haben. Neben dem wachsenden gesellschaftlichen Druck, leistet auch die starke Unterstützung und Regulierung des Gesetzgebers an dieser Stelle einen Beitrag zu diesem Thema. Deutsche Unternehmen und Produkte gelten nach Experteneinschätzung im Ausland schon jetzt als überdurchschnittlich nachhaltig. Die Biologische Transformation kann in Zukunft einen hohen Beitrag zu der Effizienzsteigerung in diesem Feld leisten.

### **Vielfalt und Qualität des (Aus-)Bildungssystems**

Das deutsche Bildungssystem weist vielerlei Stärken auf und ist im internationalen Vergleich als qualitativ hochwertig und vielfältig zu bewerten. Neben einer großen Anzahl an Fachrichtungen, stehen hierzulande zahlreiche Ausbildungsformen zur weitestgehend kostenfreien Verfügung. Die Fähigkeit Deutschlands bedarfsorientiert neue Ausbildungs- und Studiengänge zu schaffen wird als zufriedenstellend eingestuft. Das Ausbildungsformenportfolio reicht von anwendungsbezogenen Ausbildungen in Betrieben und Hochschulen bis hin zu einem tiefgehenden wissenschaftlichen Studium an den Universitäten. In Deutschland werden neben Hochschulen auch Berufsakademien und Fachakademien bzw. Fachschulen der tertiären Bildung zugeordnet. Nach Betrachtung der jährlichen Ausgaben für tertiäre Bildung pro Student/Azubi im internationalen Vergleich, ist Deutschland auf einem guten Niveau. Alles in Allem zeigen sich Interdisziplinäre Studiengänge und das duale Ausbildungssystem in Deutschland als eine gute Grundlage für eine anpassungsfähige, multidisziplinäre Ausbildung, welche als erforderlich für das Gelingen der Biologischen Transformation angesehen wird.

### 3.1.2 SCHWÄCHEN

»Radikale Innovation in Deutschland gibt es nicht!«  
(Jürgen R. Schmid, Geschäftsführender Gesellschafter, Design Tech)

#### Risikoaversion und Konservativität führt zu inkrementeller Weiterentwicklung

Die Deutschen werden oftmals als risikoscheu beschrieben. Zögerlichkeit und Konservativität ziehen sich hierzulande durch große Teile der Gesellschaft, Wirtschaft und Politik. Dies zeigt sich in vielen Bereichen: Angefangen bei der verhaltenen Nachfrage nach neuen, unbekanntem Produkten, über eine restriktive Gesetzgebung, etwa die Biotechnologie betreffend, bis hin zu einer Risikoaversion deutscher Kapitalgeber. Die vergleichsweise geringe Verfügbarkeit von Risikokapital in Deutschland wird als kritisch angesehen und verglichen mit anderen Industrienationen besteht deutlicher Verbesserungsbedarf. Ohne die bessere und größere Verfügbarkeit von Risikokapital wird die Umwandlung von vielen Inventionen zu Innovationen nicht oder nur langsam gelingen. Zahlreiche Start-Up-Unternehmen mit risikobehafteten aber hochinnovativen Ideen oder neuartigen Geschäftsmodellen haben dadurch große Probleme, inländische Investoren zu finden. Zusammenfassend ist eine geringe Risikobereitschaft ein enormes Hemmnis für die Entwicklung neuer Technologien. Sie bewirkt eine eher inkrementelle Weiterentwicklung des gesamten Technologiesektors und steht einer schnellen Transformation durch disruptive Innovationen eher im Wege.

#### Fehlende Akzeptanz und unzureichende Vermarktung neuer Technologien

Letztendlich ebenfalls auf die Risikoaversion zurückzuführen, ist die grundsätzliche Skepsis gegenüber neuartigen und unbekanntem Technologien. Die allgemeine Haltung der deutschen Gesellschaft in Hinblick auf Innovationen ist eher kritisch. Vor allem ältere Menschen sind weniger innovationsfreudig. Insbesondere herrscht hierzulande eine äußerst geringe Akzeptanz von gentechnisch veränderten Produkten sowie neuartigen digitalen Dienstleistungsangeboten. In der deutschen Gesellschaft werden häufig Risiken von Innovationen stärker gewichtet als Chancen. Diese Verschlossenheit ist ein großes Hemmnis für die Biologische Transformation, welche unter anderem die Verbindung zweier besonders kritischer Themenfelder, nämlich der Biotechnologie und der Informationstechnologie, zum Ziel hat.

#### Restriktive Gesetzgebung

Analog zur Gesellschaft agiert auch der deutsche Gesetzgeber eher konservativ, risikoavers und zögerlich. Auf den Gebieten der Biotechnologie und Gentechnik behindert derzeit eine strikte Gesetzgebung freies Handeln und schnellen Fortschritt. Dementsprechend ist die wissenschaftliche Handlungsfreiheit hierzulande sowohl im Allgemeinen, als auch insbesondere bezogen auf die Bio- und Gentechnologie durch strenge Gesetzgebung stärker eingeschränkt als in vergleichbaren Industriestaaten. In Folge dessen ist die mögliche Innovationskraft in Deutschland stark gehemmt. In Bezug auf die Regulierung überschreitet Deutschland die bereits strenge EU-Regelung und verbietet beispielsweise die gentechnische Forschung an Embryonen. Die starke Regulierung führt zu einer geringen Attraktivität Deutschlands als Standort für Experten und Forschungseinrichtungen, die in anderen Ländern deutlich freier und weniger kontrolliert forschen können. Eine Abwanderung von Experten, Institutionen und Wissen ist die unmittelbare Folge. Ferner sind hohe Anforderungen an Sicherheit und Arbeitsschutz für aufwändige Prozesse und hohe Kosten verantwortlich und stellen ein weiteres Hemmnis für Deutschland als attraktiven Wertschöpfungsstandort dar. Dies mindert wiederum das Innovationspotenzial Deutschlands und erfordert teilweise den teuren Zukauf von Technologien aus dem Ausland.

## Hierarchische Strukturen hemmen dynamische Entwicklungsfähigkeit

Deutsche Unternehmen sind mehrheitlich in traditionellen und hierarchischen Strukturen organisiert. Diese hemmen zum einen die interdisziplinäre Kommunikation und führen zur Wissenskonzentration bei einzelnen Personen oder Gruppen. Des Weiteren sind solche Strukturen überaus statisch und zentral, sprich genau das Gegenteil von biologischen, dezentralen und dynamischen Strukturen, die im Zuge der Biologischen Transformation implementiert werden sollen. Deutsche Unternehmen fokussieren auf qualitativ hochwertige Produkte, was in einem agilen Kontext zu Lasten einer schnellen Umsetzung geht und letztlich die Innovationskraft hemmt. Die Fähigkeit, neue Technologien schnell umzusetzen, wird lediglich als mittelmäßig und somit ausbaufähig wahrgenommen.

## Abhängigkeit von Rohstoffen, Energie und Kapital

Als rohstoffarmes Land ist Deutschland stark von Importen aus dem Ausland abhängig. Dies gilt sowohl für Energie als auch für Material und Rohstoffe. Die Auswirkung eines eingeschränkten Zugangs zu Risikokapital auf eine Wirtschaft wurde bereits erläutert. Eine Abhängigkeit, insbesondere hinsichtlich der Energieversorgung mindert den außenpolitischen Handlungsspielraum der Bundesregierung extrem und stellt ein Hemmnis dar, politische Ziele zu erreichen. Darüber hinaus verringert sich unmittelbar die Attraktivität des Wirtschaftsstandorts Deutschland durch höhere Energie- und Rohstoffpreise.

## Eingeschränkte Entwicklung von digitalen Systemen und Geschäftsmodellen

Deutschland ist auf dem Gebiet der digitalen Geschäftsmodelle kein Vorreiter. Im internationalen Vergleich konnten sich bislang nur wenige internetbasierte Start-Ups aus Deutschland international etablieren. Die deutsche Position im Bereich der digitalen Geschäftsmodelle wird im unteren Drittel angesehen, was eine Verbesserung in diesem Bereich zwingend erforderlich macht. Auch die Vermarktung bestehender Dienstleistungen weist ein deutliches Steigerungspotenzial auf. Darüber hinaus haben hiesige Unternehmen, insbesondere KMU, bislang nur eingeschränkte Erfahrungen mit digitaler, dezentraler und autonomer Unternehmensorganisation. Allgemein wird Deutschland im internationalen Vergleich im Bereich Informatik/ Machine Learning/ Schwarmintelligenz im Mittelfeld angesehen.

### 3.1.3 CHANCEN

»Die entscheidenden drei Kriterien für eine Innovationsführerschaft werden wohl die Anzahl qualifizierter Mitarbeiter, die Verknüpfung von wissenschaftlichen Einrichtungen mit der Wirtschaft sowie der Zugang zu Risikokapital sein.«

*(Wolf Hirschmann, Geschäftsführender Gesellschafter SLOGAN GmbH)*

## Steigerung der Standortattraktivität im Bereich der Biotechnologie

Um die Attraktivität des Industriestandorts Deutschland auch in Zukunft zu erhalten, kann die Biologische Transformation einen wichtigen Beitrag leisten. Insbesondere im Bereich der Biotechnologie besteht aber im Vergleich zu Europa und dem Rest der Welt Nachholbedarf. In diesem Bereich bietet die Biologische Transformation aus Expertensicht deutliches Aufholpotenzial.

## **Neue/neuartige Arbeitsplätze und -bedingungen**

Die Biologische Transformation wird zunehmenden Einfluss auf die Arbeitsmarktsituation und die Art und Weise wie die Arbeit ausgeübt wird haben. Komplexe, selbstoptimierende Systeme können gerade in Hochlohnländern von gut ausgebildeten Fachkräften überwacht werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass durch die Biologische Transformation neue Arbeitsplätze entstehen, wird als hoch eingeschätzt. Die erforderlichen neue Spezialisierungen und Anforderungen werden qualifiziertes Personal benötigen. Aufgrund des im internationalen Vergleich relativ hohen durchschnittlichen Bildungslevels der erwachsenen Bevölkerung in Deutschland, entsteht hier ein eindeutiger Vorteil. Eine wachsende Anforderung an industrielle Mitarbeiter im Zuge der Biologischen Transformation wird in erster Linie ein hohes Verantwortungsbewusstsein sein, da in den entstehenden dezentralen Wertschöpfungssystemen mehr Verantwortung und Gestaltungsmöglichkeiten bei jedem einzelnen Mitarbeiter liegen werden. Digitales Know-how und ein geschulter Umgang mit den neuen Gefahrenpotenzialen am Arbeitsplatz, die bspw. durch biologische Prozesse verursacht werden können, verändern auch die Anforderungen an Arbeitnehmer. Der dabei unterstützende hohe Standard der Arbeitsschutzmaßnahmen darf nicht reduziert werden, um das Vertrauen der Mitarbeiter nicht zu schwächen.

## **Regionalisierung und Ressourceneffizienz**

Die Steigerung der Ressourceneffizienz und der Nachhaltigkeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette ist ein erklärtes Ziel der Biologischen Transformation. Die Relevanz dieses Ziels wird durch die weltweiten Entwicklungen der Ressourcenverknappung, des Klimawandels, des Populationswachstums und das stetig steigende Wohlstandslevel vieler Schwellenländer immer größer. Neue biointelligente Technologien ermöglichen es, die Effizienz der Wertschöpfung signifikant zu erhöhen und gleichzeitig eine Kreislaufwirtschaft mit vorwiegend regionalen Wertschöpfungsketten zu erreichen. Bereits heute können beispielsweise Algen zur Fixierung von CO<sub>2</sub> genutzt und zur Produktion von Kosmetikartikeln und Arzneimitteln verwendet. Die wachsende Ressourceneffizienz stellt sowohl im unternehmerischen als auch im ökologischen Sinne einen bedeutsamen und überaus positiven Effekt der Biologischen Transformation dar.

## **Bioinspirierte Strukturen für die Zellularität der Wertschöpfung**

Die Biologische Transformation wird auch im Bereich der Unternehmensorganisation positiv gesehen. Neue Organisationsformen und biologische Strukturen ermöglichen einen höheren Grad der Mitarbeiterbeteiligung und effizientere Arbeitsprozesse. Durch bioinspirierte Strukturen, Mechanismen und Prinzipien wie etwa der Schwarmintelligenz entstehen neue Kompetenzen direkt innerhalb eines Unternehmens. Diese können dezentral auf die jeweiligen Gegebenheiten angepasst, gesammelt und verwaltet werden. Dezentral vernetzte bzw. autonom agierende Systeme im Sinne der Biologischen Transformation werden zudem als äußerst effizient und dynamisch anpassungsfähig angesehen, was einen großen Beitrag zur Effizienzsteigerung der Wertschöpfung leisten kann. In Summe kann ein zelluläres Wertschöpfungssystem somit einen wichtigen Beitrag zur Steigerung von Effizienz und Wirtschaftlichkeit bei gleichzeitiger Reduzierung der Mitarbeiter- und Umweltbelastungen leisten. Sie trägt also zur Entkopplung von Wachstum und Ressourcenverbrauch bei.

## **Standardisierung als Werkzeug für größere Akzeptanz und Sicherheit**

Standardisierung kann ein wichtiges Werkzeug sein, um einer in der Bevölkerung möglicherweise herrschenden Skepsis bezüglich der Biologischen Transformation zu begegnen. Auf diese Weise könnten Gefahren in Bezug auf Arbeitssicherheit und Prozessstabilität effektiv vorgebeugt werden. Die aktuelle Verbreitung biotechnologischer Systeme in der industriellen Wertschöpfung wird als ausbaufähig angesehen. Allgemein wird von einer zunehmenden Verbreitung biotechnischer Systeme ausgegangen. Eine flächendeckende Standardisierung ermöglicht in diesem Zusammenhang eine umfangreiche Kompatibilität von Produkten und Abläufen.

## **Prozessanpassungsfähigkeit und Robustheit**

Biointelligente Systeme werden – deren vollständige Ausreifung vorausgesetzt – deutliche Vorteile gegenüber herkömmlichen zentral organisierten Systemen haben, vor allem die Robustheit und dynamische Anpassungsfähigkeit wird steigen. Durch die Biologische Transformation können stabilere und multifunktionale Prozesse entstehen und gefördert werden, die eine höhere Leistung erbringen. Die Schnelligkeit und Anpassungsfähigkeit des Produktentwicklungsprozesses kann hierdurch verbessert werden. Stabile biointelligente Systemstrukturen begünstigen eine agilere Anpassungs- und Leistungsfähigkeit von Produktentwicklungs- und Produktionszyklen. Insbesondere werden Zugewinne der Robustheit und Effizienz in den Bereichen der Verfahrenstechnik, der Recyclingwirtschaft und von Sensorsystemen als möglich erachtet.

## **Grundvoraussetzungen für Innovationen und digitale Geschäftsmodelle**

Die Biologische Transformation bietet im Allgemeinen ein hohes Potenzial für radikale Innovationen. Fehlende Akzeptanz und Risikobereitschaft werden als Gründe identifiziert, warum die Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle in Deutschland stockt. Die Biologische Transformation ermöglicht die Vereinigung neuer Denkweisen und Disziplinen, wodurch ein innovativer Fundus an Kombinationsmöglichkeiten entsteht, der in der Lage ist, gesellschaftliche Fragen zu beantworten und grundsätzlich andere technologische Lücken zu schließen als vorherige Innovationen. Start-Ups benötigen eine geeignete Umgebung und ausreichende Kapitalressourcen um zu wachsen, vor allem traditionellere KMU benötigen aber auch einen uneingeschränkten Zugang zu digitalen Dienstleistungen und Wissen für einen Wandel hin zu biointelligenteren Strukturen.

### **3.1.4 RISIKEN**

#### **Restriktive Gesetzgebung**

Die bestehenden Restriktionen in der deutschen und europäischen Gesetzgebung bergen insbesondere bei der Gentechnik ein hohes Risiko für die erfolgreiche Implementation der Biologischen Transformation. Die im internationalen Vergleich als überdurchschnittlich strikt beurteilte Regulierung wird allgemein als Hemmnis für Innovationen radikaler und disruptiver Art gesehen. Neben der Abwanderung von Wissen und Experten bringt der Rückgang des Innovationspotenzials Deutschlands Risiken für den Import und Export mit sich: Falls neue Technologien aufgrund einer hemmenden Gesetzgebung nicht mehr hierzulande entwickelt werden können, sinkt zwangsläufig der Export und der Import teurer Technologien steigt. Gesetzliche Regularien gelten demnach allgemein als starker Einflussfaktor für das Gelingen oder Scheitern von Innovationen, wobei insbesondere radikale Innovationen hohe Freiheitsgrade erfordern. Um eine erfolgreiche Implementation der Biologischen Transformation zu gewährleisten, reicht allerdings nicht nur eine Lockerung der Gesetzeslage. Darüber hinaus müssen Anreize von Seiten des Staates geschaffen werden, um etwaige wirtschaftliche Risiken für Unternehmen und Forschungsinstitutionen zu reduzieren.

#### **Gesellschaftlicher Wille**

Neben einer restriktiven Gesetzgebung sind vor allem eine mögliche generelle Ablehnung durch die Bevölkerung, der unklare Mehrwert (schlechte Vermarktung) verbunden mit unklaren wirtschaftlichen Vorteilen sowie eine kurzfristig ausgerichtete Denkweise Risikotreiber. Diese Risiken beziehen sich sowohl auf die Biologische Transformation im Allgemeinen als auch auf das Investitionsrisiko von Unternehmen im Speziellen. Der gesellschaftliche Wille zur Biologischen Transformation ist für ihr Gelingen von zentraler Bedeutung. Die allgemeine skeptische und konservative Haltung der deutschen Gesellschaft gegenüber neuartigen Technologien und besonders der Gentechnik und künstlicher Intelligenz stellt daher ein bedeutendes Risiko der Transformation dar.

## **Standardisierung als kritischer Erfolgsfaktor**

Die Normierung und Standardisierung im Zuge der Biologischen Transformation wird als Herausforderung und zugleich als kritischer Erfolgsfaktor angesehen. Die größte Herausforderung besteht dabei in der Automatisierung, der Gefahreneingrenzung und im Bereich der Materialwissenschaften. Die größten Risiken bioinspirierter bzw. biointegrierter Technologien bestehen in einem möglichen Kontrollverlust über die Abläufe und Ergebnisse. Die langfristige Robustheit der Prozesse droht dabei verloren zu gehen. Eine mangelnde Standardisierung (zu früh, zu spät oder zu stark) stellt ein Risiko für die Prozessstabilität/Robustheit konkurrierender technischer Lösungen dar und das vorhandene Innovationspotenzial. Standardisierungen selbst bergen auch die Gefahr, neue Entwicklungen zu hemmen und sollten daher nicht zu stark im Bereich der Biologischen Transformation implementiert werden. Ein weiteres Risiko der Standardisierung besteht in diesem Zusammenhang durch eine Bürokratisierung und Überregulation und der damit einhergehenden Verlangsamung des Transformationsprozesses.

## **Beherrschbarkeit autonomer Systeme**

Ein möglicher Mangel an Beherrschbarkeit und der damit verbundene Kontrollverlust sind die größten populären Ängste in Bezug auf die Künstliche Intelligenz und, damit verbunden, auf autonome Systeme im Allgemeinen. Die gesellschaftliche Akzeptanz hängt nicht zuletzt vom Schutz der persönlichen Daten und Transparenz der Prozesse in autonomen Systemen ab. Eine fehlerfreie Beherrschung solcher Systeme ist daher unabdingbar. Als weiteres großes Risiko im Zusammenhang mit dezentral autonomen Systemen in der industriellen Wertschöpfung wird der Mangel an gemeinsamen Kommunikationsstandards gesehen, der die effektive Zusammenarbeit der Systeme verhindert. Dies betrifft auch die Kommunikation und die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Arbeitnehmern (z. B. Ingenieure und Biologen). Die Integration und Interaktion von bzw. mit biologischen Prozessen und Produkten ist auf Grund des eingeschränkten Verständnisses der Mechanismen in der Biologie nur bedingt möglich. Darüber hinaus kann die Komplexität negative Folgen auf die Stabilität und gerade bei Systemausfällen auf die Wiederinbetriebnahme haben und final zu Kontrollverlust führen. Die zusätzlich angestrebte Verbindung von Künstlicher Intelligenz mit der Anwendung von gentechnisch modifiziertem Material ist darüber hinaus mit Risiken verbunden. Als Werkzeug zur Kontrolle ist auch hier die Standardisierung und Regulierung anzuführen. Allgemeingültige Kommunikationsstandards in Bezug auf dezentrale, autonome und selbstoptimierende Systeme müssen als verlässliche Entwicklungsbasis definiert werden. Ein Mangel an solchen Standards hat ein hohes Gefahrenpotenzial.

## **Neue Gefahren am Arbeitsplatz**

Wie bereits angedeutet, birgt die Biologische Transformation einige Gefahren und Risiken für Menschen in ihrer Arbeitsumgebung sowie für die Umwelt. Durch die Implementierung biologischer Organismen in die Wertschöpfung ergeben sich neue und noch weitestgehend unbekannte Gefahrenpotenziale. Ferner können Mitarbeiter und die Umwelt beispielsweise durch Mikroorganismen bisher unbekanntem Gefahren ausgesetzt sein.

## **Protektionistische Tendenzen und Ressourcenabhängigkeit**

Auch die Ressourcenabhängigkeit Deutschlands stellt ein Risiko für das Gelingen einer nachhaltigen Wertschöpfung dar. Neben den Einbußen bezüglich der Attraktivität des Industriestandorts ist dieser Aspekt insbesondere aufgrund der Möglichkeit künftiger protektionistischer Tendenzen anderer Staaten kritisch zu beurteilen. Solche Tendenzen sind bereits heute klar erkennbar und werden in Zukunft als eher zunehmend

eingeschätzt. In Schlüsselmärkten wie z. B. USA und China zeichnen sich steigende protektionistische Tendenzen ab, die sich negativ auf den Marktzugang auswirken könnten. Weiterhin werden besonders asiatische Länder als wichtige zukünftige Absatzmärkte der deutschen Industrie gesehen, wodurch protektionistische Tendenzen in diesen besonders kritisch zu bewerten sind. Sie gefährden drastisch die Zuverlässigkeit potenzieller Absatz- und Beschaffungsmärkte. Die Regulierung der deutschen und europäischen Märkte wird als erheblich empfunden und kann sich zu einem Hemmnis für Import und Export entwickeln. Steigende Zölle und Beschränkungen sowohl auf Import- als auch Exportprodukte und eine künstliche Verknappung von Rohstoffen und Energie sind bereits gegenwärtig. Letztlich ist der Umstand, dass Investitionen in aufstrebenden Ländern ausschließlich über begleitende Technologie- und Wissenstransfermaßnahmen ermöglicht werden, ebenfalls als limitierend zu bewerten.

### **3.2 DEUTSCHLAND IM INTERNATIONALEN VERGLEICH – ANALYSE RELEVANTER INDIKATOREN**

Expertenmeinungen stellen subjektive Einschätzungen dar. Zwar lässt sich über eine hohe Anzahl und einen vielfältigen fachlichen Hintergrund der Befragten eine gewisse Konsolidierung der Ergebnisse erzielen, dennoch besteht weiterhin die Gefahr, dass medial präsente Thesen Einfluss auf die Einschätzung der Befragten haben. Um dies zu überprüfen, wird in diesem Abschnitt eine vergleichende Analyse zusätzlicher quantitativer Indikatoren einer Biologischen Transformation durchgeführt. Diese dient der faktenbasierten Ergänzung und Validierung der mittels Expertenbefragungen ermittelten SWOT-Analyse. Dabei ist an dieser Stelle der Hinweis wichtig, dass bislang kein allgemeingültiges Indikatorsystem für die Biologische Transformation existiert. Die hier präsentierten Indikatoren stellen daher lediglich einen Ausschnitt der Realität dar, der in Zukunft als Grundlage der Entwicklung eines standardisierten Indikatorsystems dienen kann. Aufgrund der fehlenden Datengrundlage wird hierzu an einigen Stellen auf Daten aus der Biotechnologiebranche zurückgegriffen. Die Biotechnologie ist zwar nicht mit der Biologischen Transformation gleichzusetzen, stellt jedoch einen wesentlichen Befähiger dar, da von und mit ihr disruptive Innovationen zu erwarten sind. Diese können auf andere Branchen übergreifen, dort Anwendung finden oder zu einem zunehmenden Verschwimmen der Sektorgrenzen führen. Der hier präsentierte Ansatz betrachtet anhand von sieben Indikatoren die Einflussgrößen der Biologischen Transformation. Die Indikatoren sind: (1) Wirtschaftsstärke, (2) Innovationskraft, (3) Grundlagenforschung, (4) Start-Ups, (5) Gesetzgebung und Restriktionen, (6) Bildung und Bildungssystem sowie (7) Nachhaltigkeit und Energie. Nachfolgend werden für diese sieben Kernaspekte Rechercheergebnisse, die den Wirtschaftsstandort Deutschland im internationalen Vergleich betrachten, zusammengefasst. Die zugehörigen Quellenangaben, Grafiken und weiterführende Ergebnisse der im Folgenden zusammengefassten Recherche sind auf der BIOTRAIN-Website, unter **[www.biotrain.info](http://www.biotrain.info)** zu finden.

#### **Wirtschaftsstärke biotechnologischer Unternehmen: Deutschland weit hinter den USA**

Als Indikatoren für einen Vergleich der Wirtschaftsstärke dienen die Anzahl an Unternehmen, der Umsatz und die Anzahl an Beschäftigten. Die USA sind hierbei mit einer Anzahl von 2772 biotechnologischer Unternehmen (im Jahr 2015) am stärksten in der Biotechnologiebranche vertreten, gefolgt von Europa und China. Deutschland liegt 726 Unternehmen im selben Jahr auch innerhalb Europas hinter Frankreich. Die jährliche Wachstumsrate von bis zu 6 % der Anzahl an deutschen Biotech-Unternehmen zeigt jedoch eine konstante Entwicklung über die letzten zehn Jahre. Ähnlich zu der Wachstumsrate an deutschen Biotech-Unternehmen, verzeichnet Deutschland auch bei der Anzahl der Mitarbeiter zwischen 2015 und 2016 einen Zuwachs von 6,7 % (von 2016 zu 2017 sogar 7,8 %). Die Gesamtbeschäftigtenzahl von lediglich börsennotierten Biotech-



Unternehmen in den USA macht jedoch weiterhin das Sechs- bis Siebenfache der hiesigen Unternehmen aus. Besonders deutlich wird die gering ausgeprägte Biotech-Landschaft in Deutschland im Vergleich zu den USA bei den Branchenumsätzen. So konnten alleine die börsennotierten Biotech-Unternehmen der USA im Jahr 2016 mit 112Mrd. US\$ einen 28-fach höheren Umsatz verzeichnen als die deutsche Biotech-Industrie.

Unterm Strich zeigt sich, dass Deutschland in allen Punkten, die hier zur Einschätzung der Wirtschaftsstärke der Biotech-Industrie ausgewählt wurden, weit hinter dem Spitzenreiter USA zurückfällt. Jedoch zeigt auch der innereuropäische Vergleich, dass Deutschland Frankreich, zumindest bei der Anzahl der Biotech-Unternehmen, den Vortritt lassen muss.

### **Biotech-Innovationskraft: Deutschland in guter Ausgangslage**

Die Innovationskraft von Unternehmen ist essentiell für die Biologische Transformation. Zur Evaluierung der Position Deutschlands in diesem Bereich wurden die Patentanmeldungen bei internationalen Behörden verglichen. Der Vergleich der Biotech-Patentanzahlen im In- und Ausland, bezogen auf die jeweilige Nationalität des Inventors bzw. der Inventor-Firma, gibt Aufschluss über die Reichweite der Technologien und somit auch indirekt über die Aktivität und die Marktanteile der betrachteten Unternehmen auf internationalen Märkten. Hierzu wurden die drei weltweit wichtigsten Patentbehörden der betrachteten Länder und Regionen für einen Vergleich herangezogen: Das European Patent Office (EPO), das United States Patent and Trademark Office (USPTO) und das Japan Patent Office (JPO).

Die zuletzt im Jahr 2013 von der Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) durchgeführte Betrachtung der Anzahl an Triadic Patent Families der Biotechnologie-Branche diente hierbei als Datengrundlage. Eine Triadic Patent Family stellt eine Reihe von Patenten für dieselbe Technologie, eingereicht vom gleichen Erfinder bei den oben genannten drei Patentorganisationen dar. Somit gibt dieser Indikator Aufschluss über die weltweite Reichweite von Technologien je Inventor-Land. Die USA liegen unter diesem Gesichtspunkt klar vorne. Mit ca. 2000 Biotech-Patentanmeldungen pro Jahr (dies entspricht knapp 50 % aller Anmeldungen) liegt sie hier an der Spitze, gefolgt von Europa mit 1080 Patentanmeldungen im Jahr 2013, Tendenz sinkend. Deutschland konnte sich jedoch bei den Triadic Patent Families vor seinen europäischen Nachbarn Frankreich und Großbritannien behaupten, liegt allerdings hinter Japan zurück.

Der Vergleich der Anzahl an genehmigten Biotech-Patenten der Biotech - Triadic Patent Families nach Inventor-Nationalität zeigt demnach, dass das Innovationspotenzial Deutschlands auf dem Gebiet der Biotechnologie nach den Treibern USA und Japan ebenfalls von großer Bedeutung ist. China nimmt hier den letzten Platz ein und zeigt sich somit nicht als Treiber neuer Biotechnologien des vergangenen Jahrzehnts – obgleich, im Gegensatz zu allen anderen Ländern, China einen deutlichen Aufwärtstrend verzeichnen kann.

### **Grundlagenforschung in der Biotechnologie: Solide Positionierung durch staatliche und private Förderung**

Wie bei der Definition des Indikators »Grundlagenforschung« in Kapitel 3.1 bereits erörtert wurde, ist laut den Interview-Experten eine breit angelegte, interdisziplinäre Grundlagenforschung insbesondere für die Biotechnologie und die Biologische Transformation von entscheidender Bedeutung. Da sich Grundlagenforschungsergebnisse, außer anhand von Patenten, wie im vorherigen Abschnitt durchgeführt, schlecht quantifizieren lassen, fokussiert dieser Abschnitt auf die finanziellen Aufwendungen für Forschung und Entwicklung, sowohl im Biotechnologie-Bereich als auch im Allgemeinen.



Die finanziellen Ausgaben von Biotech-Unternehmen für Forschung und Entwicklung (FuE) wurden hierzu in den Jahren 2015 und 2016 verglichen. Die Förderung der Biotechnologischen Forschung und Entwicklung durch Unternehmen steht demnach in direktem Zusammenhang mit der Wirtschaftsleistung eben dieser Unternehmen. Deutsche dedizierte Biotech-Unternehmen konnten demnach im Jahr 2016 nur eine Förderung der FuE in Höhe von 1,1 Mrd. US\$ aufbringen, was einer Steigerung zu 2015 um 6 % entspricht. Im Vergleich dazu, verzeichneten US-Amerikanische börsennotierte Unternehmen knapp 35-mal so große Aufwendungen für die FuE von Biotechnologien (38,3 Mrd. US\$). Auch Gesamteuropa kann an dieser Stelle nicht mit den USA mithalten und konnte lediglich Aufwendungen von 6,9 Mrd. US\$ privater Biotech-FuE verzeichnen.

Wie aus den Ergebnissen der Experteninterviews hervorgeht, wird nicht nur eine umfangreich privat geförderte, sondern insbesondere eine staatlich geförderte Grundlagenforschung als wichtige Rahmenbedingung angesehen. Staatliche Finanzierungen seien meist längerfristig und nicht gewinnorientiert ausgelegt, was auch die FuE von Technologien minderer Reife und mittelfristig geringer finanzieller Attraktivität ermöglicht. Die jeweiligen Anteile der Finanzierungsquellen von allgemeiner FuE der betrachteten Länder unterscheiden sich nur geringfügig. Die FuE jeder Nation/Region wird zum größten Teil aus privatwirtschaftlichen Mitteln, sprich von Unternehmen finanziert. Weitere Finanzierungsquellen sind staatliche Investitionen sowie die Finanzierung der inländischen FuE durch ausländische Investoren (z. B. international tätige Unternehmen) oder Kooperationen mit ausländischen Forschungseinrichtungen sowie geringe Anteile sonstiger nicht eindeutig zuzuordnender Finanzierungsquellen. Letztere umfassen in Deutschland beispielsweise 0,5 % der gesamten Investitionssumme. Der Anteil der privaten Finanzierung ist in China und Japan am höchsten, dort nimmt er 74,7 % bzw. 78 % ein. Den höchsten Anteil an staatlichen Mitteln hat Frankreich, wo die Grundlagenforschung zu 35 % auf staatlicher Förderung basiert. 66 % der deutschen Grundlagenforschung basieren auf privatwirtschaftlicher, 27 % auf staatlicher Finanzierung. Der Anteil der staatlichen Finanzierung in Deutschland liegt somit zwischen Frankreich und China/Japan und etwa gleichauf mit Großbritannien. Ausländische Investoren spielen in Großbritannien mit 17,5 % der FuE-Finanzierung eine vergleichsweise große Rolle. Japan und China hingegen weisen hier einen marginalen Anteil von 0,1 % bis 1 % auf. Deutschland liegt mit 6,5 % Förderung aus dem Ausland im mittleren Feld, ebenso Frankreich mit 9 %. Um den Fokus noch genauer auf die staatlich finanzierte Grundlagenforschung zu legen, können zusätzlich die Verläufe des prozentualen Anteils vom staatlichen zum gesamten FuE-Personal zwischen den Jahren 2000 bis 2016 verglichen werden. Dieser Anteil war in China im betrachteten Zeitraum durchgängig am höchsten. Direkt darauf folgte Deutschland, das im Vergleich zu seinen europäischen Nachbarn Frankreich und Großbritannien über die Jahre hinweg einen deutlichen Vorsprung halten konnte. Gerade Großbritannien wies mit Japan zusammen in diesem Zeitraum durchweg die niedrigsten Anteile öffentlich angestellter Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern auf.

Eine vergleichsweise geringe Wirtschaftskraft des deutschen Biotechnologie-Sektors spiegelt sich in gleichem Maße auch in der privatwirtschaftlichen Finanzierung von FuE der Biotechnologie wider. Bei einem Vergleich des Anteils staatlicher Förderung der Grundlagenforschung stellt sich Deutschland sehr durchschnittlich dar. Anhand der hier betrachteten Kennzahlen, lässt sich also kein Vorsprung der deutschen Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Biotechnologie manifestieren und die Einschätzung der Interview-Experten erstmal nicht stützen. Dennoch bietet die deutsche Forschungslandschaft eine Vielzahl von international renommierten Forschungsinstitutionen ohne Erwerbzweck, wie bspw. die Max-Planck-Gesellschaft oder die Helmholtz-Gemeinschaft. Ebenso scheinen die geringeren finanziellen Möglichkeiten des deutschen Biotech-Sektors seine Innovationskraft nicht einzuschränken. In einem Zwischenfazit an dieser Stelle manifestiert sich die deutsche Biotechnologie-Branche also zwar nicht als die weltweit wirtschaftsstärkste und ausgeprägteste, allerdings als eine höchst effiziente und innovative Branche, die sich dennoch zu den führenden auf dem Weltmarkt zählen kann.

## **Biotech-Start-Ups: Vergleichsweise schwache Positionierung Deutschlands durch fehlendes Kapital**

Neben dem reinen Innovationspotenzial muss eine Gesellschaft bzw. eine Nation auch die Fähigkeit des effizienten Technologietransfers haben, um bei der Biologischen Transformation als Vorreiter agieren zu können. Aus den Experteninterviews konnte der Konsens ermittelt werden, dass gerade Start-Up-Unternehmen ein enormes Potenzial für solche Transfers bereitstellen. Des Weiteren konnte ermittelt werden, dass der Erfolg bzw. Misserfolg von Start-Ups, insbesondere der Technologie-Branche, enorm kapitalabhängig ist. Im Speziellen der Zugang zu Risikokapital ist diesbezüglich ein kritischer Erfolgsfaktor. Auf Grund dessen, thematisiert die erste Vergleichsgröße in diesem Themenfeld den Risikokapitalzugang von internationalen Biotech-Start-Ups zwischen 2014 und 2016. Es zeigt sich hier deutlich, dass der Zugang deutscher Start-Ups im Bereich der Biotechnologien zu Risikokapital verschwindend gering ist gegenüber solchen der USA. Während US-Amerikanische Start-Ups im Jahr 2016 eine Risikokapitalförderung von 8 Mrd. US\$ erhalten haben, verfügten deutsche Biotech-Start-Ups lediglich über 3 % dieses Kapitals, sprich 270 Mio. US\$. Auch die Wirtschaftsregion um Süd-West-Asien oder gar Gesamteuropa erlangen bei weitem nicht den Umfang des Zugangs zu Risikokapital von Biotech-Start-Ups wie die USA. Innerhalb Europa konnte sich Großbritanniens Start-Up-Szene mit einem Zugang zu 590 Mio. US\$ behaupten.

Ein weiterer Anhaltspunkt für den Umfang der zu vergleichenden Biotechnologie-Start-Up-Szenen ist die Generierung von Kapital durch jährliche Börsengänge. Die Kapitalgenerierung internationaler Start-Ups für die Jahre 2015 und 2016 in Mio. US\$ wurde in diesem Zusammenhang betrachtet. Erneut ist hierbei der Kapitalumfang aus Börsengängen von deutschen Biotech-Start-Ups verschwindend gering gegenüber jenen der USA. 2015 betrug der Anteil Deutschlands gerade mal 1,2 % des Kapitalumfangs US-Amerikanischer Unternehmen mit 3,8 Mrd. US\$. China und Europa weisen in diesem Vergleich sehr ähnliche Kennwerte auf und konnten im Jahr 2016 jeweils Kapital in Höhe von 0,7 Mrd. US\$ bzw. 0,8 Mrd. US\$ generieren. Darüber hinaus bedingt ein eingeschränkter Kapitalzugang auch eine größere Rate an Insolvenzen und Unternehmensauflösungen. So wurden zwar im Jahr 2016 in Deutschland 20 Neugründungen an Biotech-Start-Ups verzeichnet – was dem durchschnittlichen Wert an Neugründungen in Deutschland zwischen 2011 und 2016 entspricht – allerdings mussten gleichzeitig auch vier Start-Ups Insolvenz anmelden und weitere sechs Unternehmen wurden liquidiert. Der kapitalintensive Technologietransfer von innovativen Forschungs- und Entwicklungsergebnissen auf dem Gebiet der Biotechnologie, stellt also einen Schwachpunkt des deutschen Biotechnologiesektors im internationalen Vergleich dar.

## **Gesetzgebung und Restriktionen: Restriktive Gesetzgebung für Stammzellenforschung und Gentechnik**

Im Zuge der Experteninterviews wurde die Gentechnik und hier insbesondere die Stammzellenforschung einerseits als ein wesentlicher Befähiger für die Biologische Transformation identifiziert, andererseits oftmals jedoch eine restriktive Gesetzgebung und strikte Regulierung der Grundlagenforschung auf diesem Gebiet diskutiert. Dieser stellt somit den fünften Indikator dieser Analyse dar. Nicht nur auf dem Gebiet der (Human-) Medizin, sondern auch bei der Erforschung alternativer Nahrungsmöglichkeiten bietet die Stammzellenforschung ein enormes Entwicklungspotenzial. Aus diesem Grund bietet gerade eine kontrollierte und reglementierte Umgebung der Forschung, mit Blick auf ethische Aspekte, enorme Chancen. Eine nationale Überregulierung und strikte Einschränkungen können allerdings hemmende Tendenzen der Biologischen Transformation durch Unternehmens- und Expertenabwanderungen hervorrufen. Im folgenden Abschnitt wird die Gesetzeslage zur Forschung an menschlichen Embryonen im internationalen Vergleich erörtert.

Mit seiner gesamtgesellschaftlichen Zurückhaltung gegenüber neuer Technologien aus dem Bereich der Gentechnik ist es nicht verwunderlich, dass Deutschland unter den betrachteten Ländern die strengsten Gesetze zur Stammzellenforschung hat. Beispielhaft seien hier die zwei wichtigsten Gesetze genannt: das »Embryonenschutzgesetz« von 1991 sowie das »Stammzellengesetz« von 2002. Zusammengefasst untersagen diese beiden Gesetze generell die Forschung und Stammzellenentnahme an menschlichen Embryonen, sowie auch die Erzeugung von Embryonen zu Forschungszwecken. Damit ist eine Stammzellenforschung an menschlichen Embryonen in Deutschland so gut wie ausgeschlossen.

Auf europäischer Ebene gestaltet sich die Gesetzeslage in diesem Zusammenhang etwas differenzierter. Die Europäische Union stellt es seinen Mitgliedstaaten unter der Einhaltung des »Übereinkommens zum Schutz der Menschenrechte und Menschenwürde« prinzipiell frei, Embryonenforschung zu erlauben oder zu verbieten. Mit dieser Formulierung räumt die EU hier seinen Mitgliedsstaaten größere Freiheiten ein. Großbritannien bspw. nimmt diese Möglichkeit an und genehmigt unter Einhaltung gewisser Auflagen sowohl die Forschung an Embryonen, wie auch die Erzeugung von menschlichen Embryonen zu Forschungszwecken.

In den USA sowie in China stellt sich die diskutierte Gesetzeslage für die Embryonenforschung, wie auch die befragten Experten in den Interviews bestätigten, am tolerantesten dar. In den USA bspw. obliegt die Gesetzeslage den einzelnen Bundesstaaten und darüber hinaus bestehen unterschiedliche Regulierungen für staatliche und privat-finanzierte Forschungsvorhaben. Private Embryonenforschung ist dabei deutlich weniger reglementiert als staatliche. Auch in China ist die Embryonenerzeugung und Forschung weitestgehend erlaubt. Die Wahrnehmung der Fachexperten bezüglich der Restriktionen und Forschungsfreiheiten war also durchaus richtig: Deutschland bietet durch eine restriktivere Gesetzgebung deutlich geringere Freiheiten auf dem Gebiet der Gentechnik und Stammzellenforschung als andere vergleichbare Nationen. Auch wenn eine Diskussion der ethischen Vertretbarkeit solcher Forschungen an dieser Stelle sichtlich zu weit führen würde, bleibt dennoch festzuhalten, dass der deutsche Biotechnologiesektor durch diesen Fakt deutlich an Attraktivität für Unternehmen und Wissenschaftler einbüßt. Für eine erfolgreiche Umsetzung der Biologischen Transformation in Deutschland stellt dies folglich eine zusätzliche Hürde dar.

### **Bildung und Bildungssystem: Deutschland bietet Chancengleichheit aber ein vergleichsweise benachteiligtes tertiäres Bildungsniveau**

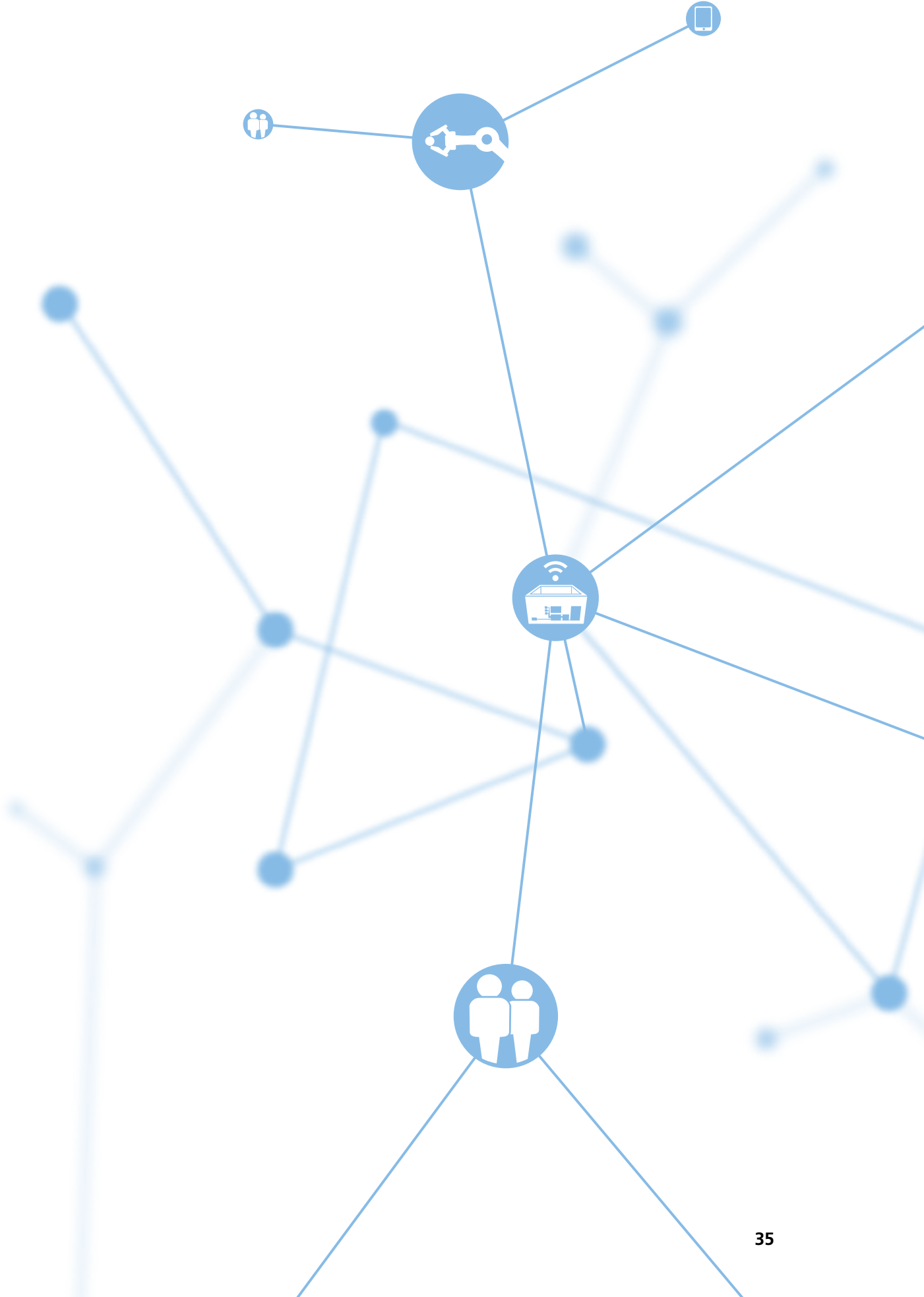
Ein modernes Bildungssystem stellt optimale Rahmenbedingungen für neuartige Ideen und disruptive Innovationen. Grundlegend von Bedeutung hierfür ist die Vermittlung spezifischer Fachkompetenzen und interdisziplinärer Denkweisen. Da der Vergleich von grundsätzlich unterschiedlichen Bildungssystemen und eine Quantifizierung der vermittelten Bildungsinhalte eine Mammutaufgabe und nur in Grenzen sinnvoll und sachgerecht ist, fokussiert der folgende Abschnitt auf die messbare Anzahl der Bildungsabschlüsse.

Das durchschnittliche Bildungslevel der erwachsenen Bevölkerung zwischen 25 und 64 Jahren, gemessen an entsprechenden Bildungsabschlüssen zeigt hierbei, dass die deutsche Gesellschaft mit 28,6 % über den kleinsten Anteil an tertiären Bildungsabschlüssen verfügt. Verglichen wird auch hier mit Großbritannien, Frankreich, den USA, Japan und China. Indessen bietet Deutschland aber den größten Anteil an Abschlüssen des oberen sekundären Bildungsniveaus und hat damit nach der USA den kleinsten Anteil an Abschlüssen unterhalb des oberen sekundären Bildungsniveaus. Diese charakteristische Verteilung lässt sich u. a. auf das vielfältige Berufs-Ausbildungssystem Deutschlands zurückführen. Der vergleichsweise höchste Anteil des oberen sekundären Bildungslevels lässt darüber hinaus auf eine vergleichsweise große Bildungsgleichheit innerhalb der Gesellschaft schließen.

## **Nachhaltigkeit und Energiewende: Deutschland mit Nachholbedarf**

Die Biologische Transformation bietet mit der Integration der Biotechnologie in die Industrie ein großes Potenzial, um die Nachhaltigkeit der gesamten Wertschöpfung zu steigern.

Als Datenbasis für einen Vergleich dieses Aspekts wurden die staatlichen Aufwendungen mit Bezug auf Umweltschutzmaßnahmen herangezogen. Diese Umweltschutzmaßnahmen beinhalten in diesem Fall bspw. die Ausgaben für Abfall-Management, Abwasseraufbereitung, Reduzierung der Feinstaubbelastung sowie auch die Investitionen in Forschung und Entwicklung neuer Umweltschutztechnologien. Die Aufwendungen von 2016 werden hierzu verglichen. Dabei wird ersichtlich, dass Deutschland, Frankreich und Großbritannien mit rund 20 Mrd. Euro in etwa eine gleiche Höhe an staatlichen Aufwendungen für Umweltschutzmaßnahmen aufbringen. Auch laut dem Klimaschutz-Index der Institutionen Germanwatch, NewClimate Institute & Climate Action Network liegt Deutschland unter 56 weltweit betrachteten Staaten lediglich auf Rang 22. Insbesondere beim Verkehr und der Kohleverstromung gibt es dieser Untersuchung zufolge enorme Mängel. Gute Noten gibt es dagegen für den Anteil von Strom aus erneuerbaren Energien, für das hohe Engagement in der internationalen Klimadiplomatie sowie für die anspruchsvollen Ziele für 2050. Zugleich aber droht Deutschland seine Klimaziele für 2020 zu verfehlen.



# 4 VORAUSSCHAU

»Die Menschen brauchen ein Bild von einer erstrebenswerten Zukunft.«  
(Wolf Hirschmann, Geschäftsführender Gesellschafter, SLOGAN GmbH)

Die Vorausschau umfasst eine Auflistung und Beschreibung potenzieller Basistechnologien der Biologischen Transformation, die aus den Ergebnissen der Interviews, Workshops und intensiven Recherchen ermittelt und anschließend mittels eines eigens entwickelten Technologiebewertungsansatzes ausgewählt wurden (4.1). In welchem Umfang und Zeitrahmen sich der Transformationsprozess vollzieht, wurde ebenfalls auf Grundlage der Expertenaussagen in den Interviews und weiteren Beurteilungen im Rahmen der Workshops erörtert und in Form von drei möglichen Entwicklungspfaden der Biologischen Transformation herausgearbeitet (4.2).

## 4.1 BASISTECHNOLOGIEN

»Bioinformatik, Systembiologie, Informationstechnologie und Biosensorik sind Schlüsseltechnologien für eine Biologische Transformation.«  
(Dr. Uwe Gottschalk, Chief Scientific Officer, Lonza AG)



Technologiebe-  
wertung  
(PDF-Dokument)

Für eine erfolgreiche Biologische Transformation der industriellen Wertschöpfung bedarf es Technologien mit hohem disruptiven Potenzial. Auf Basis einer intensiven Literaturrecherche sowie den Ergebnissen der Experteninterviews und Akteursworkshops wurden zu deren Identifikation zunächst 270 Technologiebeispiele gesammelt.

Ziel der Technologieanalyse war es, die Basistechnologien der Biologischen Transformation zu identifizieren und im Hinblick auf ihr disruptives Potenzial zu bewerten. Hierzu wurde zunächst ein Bewertungsansatz entwickelt, der die Marktattraktivität und die Technologiereife kombiniert. Die Technologieattraktivität ergibt sich dabei aus insg. 48 definierten technischen, ökonomischen, ökologischen und sozialen Kriterien, die mit Hilfe eines Scoring-Modells mit zutreffend (1) oder nicht zutreffend (0) bewertet werden konnten. Ab einem durchschnittlichen Erfüllungsgrad über 0,5, wird eine Technologie als attraktiv angesehen.

Zur Bewertung der Technologiereife wurde der Technology Readiness Level (TRL) gewählt. Die von der NASA entwickelte Skala ermöglicht eine Einordnung von neuartigen Technologien zwischen den Ziffern 1 (Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips) und 9 (qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes). Der Übergang des TRL von Stufe 4 auf Stufe 5 (»Versuchsaufbau im Labor=4« zu »Versuchsaufbau in Einsatzumgebung=5«) beschreibt hier den Übergang vom Grundlagen- zum Transferstatus einer Technologie.

Mittels des Bewertungsansatzes konnte die Technologiesammlung zu 23 Basistechnologien (mit den höchsten Bewertungen in der Kategorie Technologieattraktivität) aggregiert werden. Abb. 8 illustriert die Gegenüberstellung von Technologieattraktivität und -reife dieser 23 identifizierten Basistechnologien. Die in der Abbildung dargestellten vier Bereiche des Portfolios und die zugehörigen Technologien werden in den folgenden Unterkapiteln zusammengefasst.

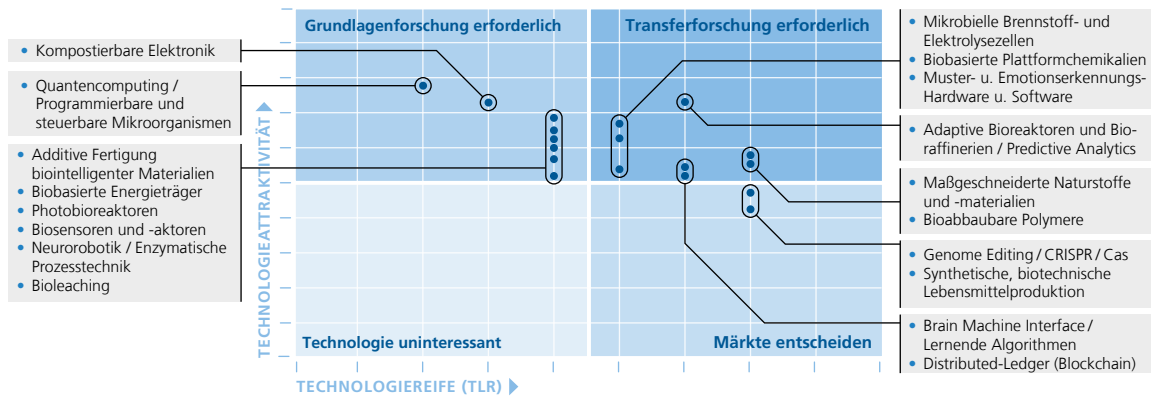


Abb. 8 Basistechnologien mit Einordnung in Bewertungsportfolio hinsichtlich Technologieattraktivität und -reifegrad

#### 4.1.1 WEITERFÜHRENDE GRUNDLAGENFORSCHUNG FÜR VIELVERSPRECHENDE ANSÄTZE

##### Biosensoren und Neurorobotik – Befähigung des Informationsaustauschs zwischen biologischen und technischen Systemen

Für viele der identifizierten Basistechnologien ist es nötig, durch eine Intensivierung der Forschung deren Technologiereife zu erhöhen, damit sie in Anwendung gebracht und somit zur Biologischen Transformation beitragen können. Biosensoren bspw., die mit biologischen Komponenten ausgestattet sind und so eine Vielzahl biologischer Daten aufnehmen und technisch verwertbar machen können, gehören in diese Kategorie. Ein Biosensor besteht i. d. R. aus einem biologischen Erkennungselement (Enzym, Antikörper, DNA, Rezeptoren oder ganze Zellen bzw. Zellverbände) und einem physikalischen Sensor (Transducer), die sich in direktem Kontakt befinden. Mithilfe eines Biosensors kann ein Analyt über ein biologisches Element detektiert und daraufhin ein physikalisches Signal generiert werden. Biosensoren sind daher prädestiniert für den Einsatz in Biologie-Technik-Schnittstellen. Zur Verbesserung der Schnittstelle mit dem Menschen als biologischem System kann darüber hinaus auch die Weiterentwicklung der Neurorobotik wichtige Beiträge leisten, indem menschliche Nervenzellen mit technischen Bauteilen gekoppelt werden.

##### Additive Fertigung biointelligenter Materialien und Elektronikbauteilen – Wegbereiter der technologiebasierten Bedarfswirtschaft

Vor allem aus ökologischer Sicht sind kompostierbare Elektronikbauteile von höchster Relevanz für die Biologische Transformation. Erste Forschungsergebnisse zeigen Erfolge bei der Entwicklung solcher Bauteile, bei denen z. B. Halbleiter aus Pflanzenextrakten oder Isolatoren aus Gelatine verwendet werden, die auf ebenso biologisch abbaubaren Platinen (z. B. kompostierbarer Kunststoff) aufgebracht werden können. Auch die additive Fertigung könnte in diesem Kontext zu weiteren Fortschritten führen, wenn Teile solche Bauteile mittels 3D-Druck hergestellt werden könnten. Die hierzu notwendigen Technologien, die 3D-Druck mit (oft

stark variablen und inhomogenen) Biomaterialien ermöglichen, sind ein spannendes Forschungsfeld mit hoher Attraktivität. Unter den zugehörigen Überbegriff »Additive Fertigung mit biointelligenten Materialien« fallen darüber hinaus schließlich sämtliche Technologien, die die Prinzipien des Tissue Engineering nutzen, um Zellen kontrolliert wachsen zu lassen und durch deren selbstständige Reproduktion mit technischen Hilfsmitteln eine Formgebung zu erzielen (sogenanntes 3D-Bioprinting).

### **Biobasierte Energieträger, Bioleaching und Quantencomputer – Technologien für den interorganisationalen Einsatz**

Biobasierte Energieträger könnten als stoffliche Energiespeicher zur Flexibilisierung der Energieversorgung beitragen. Eine intensiviertere Erforschung der hiermit zusammenhängenden Technologien, u. a. die Integration von effizienten mikrobiologischen, enzymatisch katalysierten Stoffumwandlungen, besitzt hohes Potenzial für die Biologische Transformation. Des Weiteren kann die enzymatische Prozesstechnik auch in vielen darüber hinaus gehenden Anwendungen zur Biologischen Transformation beitragen. Von den unzähligen in der Natur vorkommenden Enzymen haben zwar einige, bspw. in Wasch- und Spülmitteln und der Lebensmittelindustrie, bereits hohe industrielle Relevanz erlangt, der Großteil spielt jedoch noch eine untergeordnete Rolle. Das sogenannte Bioleaching ist ein gutes Beispiel, wie die Natur auch für Prozesse Lösungen liefern kann, die bisher als typisch abiotisch charakterisiert wurden. Im Prozess des Bioleaching werden durch mikrobielle Prozessierung aus Erzen oder Schlacken spezifische Metalle in Lösung angereichert und die entsprechenden Primär- oder Sekundärrohstoffe gewonnen. Diese Recyclingtechnologie kann nach einer Steigerung der Effizienz und Verlässlichkeit der bereits bestehenden Technologien einen wichtigen Beitrag zur Schließung von Stoffkreisläufen leisten und besitzt demzufolge ebenfalls eine mit hoher wirtschaftlicher Attraktivität. Um aufkommende Probleme in der Informatik, z. B. die Verwaltung extrem großer Datenbanken (Big Data) und die Faktorisierung großer Zahlen, effizienter zu lösen, kann die Quantencomputertechnologie hilfreich sein. Für einen weitreichenden und branchenübergreifenden Einsatz muss das Wissen jedoch auch für diese Technologien durch intensiviertere Forschungsarbeiten zunächst erweitert werden.

### **Photobioreaktoren und schaltbare Organismen – Technologien, die »Leben« in Produkte bringen**

Als weitere Basistechnologie können nach deren Weiterentwicklung (v. a. hinsichtlich Effizienzkriterien) sogenannte Photobioreaktoren zur Biologischen Transformation und der damit in Verbindung stehenden Vision von »lebenden« Produkten maßgeblich beitragen. Die gezielte Kultivierung von phototrophen Organismen wie Cyano- und Purpurbakterien, Mikro- und Makroalgen kann zusätzlich zum konventionellen Anbau von Energiepflanzen zur Produktion von biologischen Energieträgern oder in autarken Systemen als Energieversorgung genutzt werden. Als Grundlage für die Kultivierung von phototrophen Organismen, wie Pflanzen, Makro- und Mikroalgen, Cyanobakterien und Purpurbakterien, können Produkte oder Energieträger unter direkter Nutzung von Sonnenenergie gewonnen werden. Die Eigenschaft der Photosensibilität kann darüber hinaus auch zur Entwicklung von sogenannten »schaltbaren Organismen« herangezogen werden, indem die Organismen gezielt durch Licht gesteuert werden können. Auch andere externe Stimuli zur Manipulation von biologischen Organismen oder Systemen sind von Interesse, um biologische Systeme in technischen Anwendungen nutzbar zu machen. Auch jegliche über Lichtimpulse hinaus denkbaren Formen von programmierbaren und steuerbaren Mikroorganismen, wie sie einige Ansätze, u. a. aus dem Forschungsbereich der synthetischen Biologie versprechen, bedürfen der Erschließung von weiterführendem Grundlagenwissen. Nur so können deren Potenziale vollständig erschlossen werden.



#### **4.1.2 ANGEWANDTE TRANSFERFORSCHUNG ALS STARTPUNKT FÜR DIE TRANSFORMATION**

Einige vielversprechende Basistechnologien haben ihre Pilotphasen bereits durchlaufen und stehen kurz vor der industriellen Anwendung bzw. werden in Teilbereichen bereits angewandt. Der Transfer dieser Technologien in möglichst viele Anwendungsbereiche gehört zur Aufgabe der angewandten Forschung. Möglichst ganzheitliche Ansätze und Nutzungsmöglichkeiten für diese Technologien müssen identifiziert werden.

##### **Bioraffinerien, adaptive Bioreaktoren und mikrobielle Brennstoff- und Elektrolysezellen – Vorläufertechnologien der Smart Biomanufacturing Devices**

Bioraffinerie-Technologien sind bereits in der großindustriellen Anwendung angekommen und integraler Bestandteil der meisten Bioökonomie-Initiativen. Durch Bioraffinerien können Agrarrohstoffe zu Grund- bzw. Plattformchemikalien veredelt werden oder ebenso wie biologische Reststoffe zur Erzeugung von Energieträgern (z. B. Methan, Wasserstoff, Biodiesel) umgesetzt werden. Intelligente Konzepte versuchen, möglichst viel von der funktionellen Komplexität der Ausgangsmoleküle zu erhalten und über (enzym-) katalysierte Umwandlungen weiter umzusetzen. Des Weiteren nutzen sogenannte mikrobielle Brennstoff- bzw. Elektrolysezellen lebende Mikroorganismen, die im Rahmen ihres Energiestoffwechsels organische Substanzen zur Strom- bzw. Wasserstoffherzeugung verarbeiten. In Verbindung mit weiteren bio(elektro)chemischen Entwicklungen (z. B. Bioelectrochemical Power to Gas, biologische Methanisierung) können diese Technologien neben ihrem Beitrag zur Flexibilisierung von Energieversorgungssystemen eine Grundlagentechnologie für Smart Biomanufacturing Devices bilden. Transferbedarf besteht auch für die Ermöglichung von Adaptivität in Bioreaktoren bzw. Fermentern. Meist sind diese auf genau einen Verfahrensprozess optimal eingestellt und nicht ohne weiteres transferierbar auf andere Prozesse, Substrate (Nährstoffe) oder Organismen. Durch neueste Sensorik- und Aktortechnologien sowie lernende Algorithmen kann eine flexible Anpassung der Prozessparameter auf eine größere Auswahl von Organismen und Substraten erfolgen.

##### **Neue Nutzungsmöglichkeiten und Entwicklungen von Naturmaterialien – Vorläufertechnologien der Smart Biomanufacturing Devices**

Es gibt zahlreiche organische Naturstoffe mit hochinteressanten Eigenschaften, die bisher nur aufwendig oder in zu geringen Mengen aus der Natur gewonnen werden können. Entwicklungen in der synthetischen Biologie, also die Verwirklichung von neuen Prozessen und Funktionen in Zellen, werden es hier in Zukunft jedoch erlauben, in Bioreaktoren mit hoher stofflicher Effizienz auch komplexe Moleküle großskalig von Mikroorganismen produzieren zu lassen. Damit können nicht nur Naturstoffe mit einer maßgeschneiderten Eigenschaftsverteilung oder einem solchen Profil gewonnen werden, sondern auch Verfahrensschritte zur Aufreinigung oder Entnahmen von Rohmaterial aus der Natur vermieden werden. Schwierig zu gewinnende und zu verarbeitende Naturstoffe wie Lignin oder Chitin, die zu den am meisten verbreiteten natürlichen Polymeren gehören, könnten dadurch eine weitaus größere Anwendung finden, u. a. auch in Verbundwerkstoffen und Compounds. Auch biologisch abbaubare Kunststoffe, deren Verbreitung noch unzureichend ist, gehören zu den Basistechnologien, die anwendungsspezifische Weiterentwicklungen für einen Durchbruch im Markt brauchen.

## **Bioinspirierte Informationstechnologien und die Kopplung von Mensch und Maschine – Technologien für Biointelligenz in der Produktion**

Informationstechnologien, wie Distributed Ledger für dezentrale Vernetzungs- und Steuerungsanwendungen, Muster- und Emotionserkennungssoftware sowie Predictive Analytics und lernende Algorithmen (Künstliche Intelligenz) in Produktionsprozessen und -umgebungen haben großes Anwendungspotenzial und stehen kurz vor einem industriellen Einsatz, auch außerhalb von Nischenbereichen. Die Gestaltung von Produktionsprozessen und Arbeitsplätzen könnte hierdurch stark verändert werden. Zudem steht die Kopplung von Mensch und Maschine bevor, die nicht zuletzt auch durch diese Informationstechnologien in Verbindung mit nicht-invasiven oder invasiven Verbindungselementen ermöglicht. Beispiele sind adaptive Exoskelette, die Körperbewegungen in Arbeitsprozessen physisch entlasten können. Diese Technologien stehen bereits kurz vor der Verbreitung und haben das Potenzial, Startsignal für die Biologische Transformation zu sein und den Transformationsprozess – sichtbar für Industrie und Gesellschaft – anzustoßen.

### **4.1.3 MÄRKTE ENTSCHEIDEN – ABWÄGEN VON RISIKEN UND NUTZEN**

Unter den Basistechnologien für die Biologische Transformation sind auch einige Beispiele, bei denen die Umsetzung stark markt- und akzeptanzabhängig ist. Ob diese Technologien am Markt angenommen werden, lässt sich nur schwer voraussagen. Forschungsförderungen aus der Politik sind jedoch in diesem Bereich nicht der ausschlaggebende Faktor, sondern die Gesetzeslage am Markt und die Akzeptanz in der Bevölkerung entscheiden über deren Verbreitung. Trotzdem sollten diese Technologien in der Gesellschaft objektiv diskutiert und Markteintrittshemmnisse untersucht werden, um gegebenenfalls deren Potenziale unter hinreichender Sicherheit und nach Abschätzung der Technikfolgen zu nutzen.

### **Eingriffe in Erbmateriale und Produktion von in-vitro-Fleisch – Fluch oder Segen für die moderne Gesellschaft?**

Die Neugestaltung von DNA (Gene Editing) ist v. a. in Deutschland sehr umstritten und birgt trotz der extrem hohen disruptiven Potenziale, etwa im medizinischen Bereich, zweifelsohne auch Risiken für Mensch und Umwelt. Dasselbe gilt für die Synthetische Biologie im Allgemeinen, die sich u. a. dieser Methode bedient, um biologische Systeme mit neuen Eigenschaften generieren zu können. Auch ist die Produktion von synthetischen, biotechnologisch hergestellten Lebensmitteln (z. B. »Clean Meat«, das auf Verfahren des Tissue Engineering beruht) einer verbreiteten Skepsis in der Bevölkerung ausgesetzt, obgleich die enorme Umweltbelastung durch konventionelle Fleischproduktion hiermit stark reduziert werden könnte. Es ist anzunehmen, dass die Nachfrage nach solchen Produkten stark von einem öffentlich und auch offen geführten Diskurs abhängt.

»Gravierender Mangel besteht an einer systematischen Transmission zwischen Forschung und Politik. Die Wissenschaft erarbeitet fortlaufend Erkenntnisse und geht dann zum nächsten Projekt, vielfach ohne dass die Erkenntnisse hinsichtlich ihrer Anwendungsrelevanz geprüft und politisch berücksichtigt werden.«

*(Dr. Stefan Rösler, Geschäftsführer, Oecocoach)*

## 4.2 ENTWICKLUNGSPFADE

In der BIOTRAIN-Voruntersuchung konnten auf Basis der Expertenbefragungen und Workshops drei verschiedene Entwicklungspfade (Szenarien) skizziert werden. Ziel dabei war es, den für die Biologische Transformation besten, den wahrscheinlichsten und den schlechtesten Fall zu skizzieren. Wesentliche Unterschiede ergaben sich bei den verschiedenen Gruppen in der Einschätzung der gesellschaftlichen Akzeptanz für umstrittene Befähigertechnologien. Die Durchdringung der Märkte und damit der Erfolg des Transformationsprozesses hängen stark von dem verfügbaren Kapital, der Anwendung, der Förderung und nicht zuletzt auch von der Akzeptanz gegenüber den Basistechnologien ab. Der Konsens, der aus diesem gesellschaftlichen Diskurs entsteht, entscheidet maßgeblich über den Erfolg, die Intensität, die Reichweite und die Geschwindigkeit des Transformationsprozesses. Auch die Rolle und Positionierung Deutschlands in diesem interdisziplinären Forschungsfeld entscheidet über den Fortgang der Biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung.



Entwicklungspfade  
(PDF-Dokument)

### Szenario 1: Deutschland als selbstbestimmter Wegbereiter einer umfassenden Biologischen Transformation

»Schlüsseltreiber für die Biologische Transformation ist ganz einfach der Fortbestand der Menschheit!«

*(Jürgen R. Schmid, Geschäftsführender Gesellschafter, Design Tech)*

Im ersten Szenario führt die Biologische Transformation schnell zu umfassenden Veränderungen der Industrie und damit der gesellschaftlichen Lebens- und Wirtschaftsweise. Deutschland fungiert in diesem Entwicklungspfad als Wegbereiter und Vorreiter der Biologischen Transformation und die Verschmelzung von Technik, Biologie und Informatik gelingt in allen Bereichen der Wertschöpfung. Der angestoßene gesellschaftliche Diskurs führt zu einem Abbau der in den Interviews mehrfach genannten Vorbehalte gegen Genome Editing und Künstliche Intelligenz (KI) und es folgen eine rasche Öffnung der Märkte und der Abbau von Regularien für diese Basistechnologien. Die Bundesregierung beschließt noch in der aktuellen Legislaturperiode eine Intensivierung der Forschungsförderung in den wichtigsten Handlungsfeldern der Biologischen Transformation. Investitionen kurbeln deren Weiterentwicklung nach hinreichender gesellschaftlicher Diskussion und einer damit verbundenen Lockerung der Gesetzgebung zur Ermöglichung von Forschungsräumen an. Ausgehend von Deutschland wird bis zum Jahr 2030 sowohl die Vision einer biointelligenten Wertschöpfung in die Welt transportiert als auch die zugehörigen Technologien entwickelt. Der Ruf von »Made in Germany« Produkten und deren Technologien trägt zu deren Verbreitung und den damit verbundenen Nachhaltigkeitseffekten bei. Im Jahr 2040 haben es die ersten Unternehmen erreicht, unterstützt von Quantencomputern und selbstlernenden Algorithmen, ihre Unternehmensstrukturen dezentral, autonom und organisch-adaptiv auf die jeweiligen Umgebungsbedingungen anzupassen. Auch die durchschnittliche spezifische Arbeitsbelastung ist unter der Etablierung biointelligenter Wertschöpfungssysteme aufgrund der körperlichen und geistigen Entlastungsmöglichkeiten, die die Biologische Transformation bis dahin hervorgebracht hat, niedriger als je zuvor. Deutschland exportiert weltweit erfolgreich die nötigen Schlüsseltechnologien und das Know-how für biointelligente Systeme. Der Industriestandort Deutschland kann seinen guten Ruf aufgrund der positiven Umweltwirkungen der dezentralen Wertschöpfungskreisläufe bis 2040 sogar noch verbessern und die Ökosphäre beginnt sich zu regenerieren. Dies führt zu allgemeinem Wohlstand und Wohlbefinden, weshalb diese Entwicklung bis 2050 weiter intensiviert und ein Großteil der Stoff- und Energiekreisläufe auf regionaler Ebene geschlossen werden kann. Nicht zuletzt durch die Weiterentwicklung und Verbreitung von Smart Biomanufacturing Devices. Selbstlernende Algorithmen unterstützen darüber hinaus in einer kontrollierten Art und Weise Entscheidungsprozesse und begünstigen somit die Lösungsfindung für eine Vielzahl der sozio-ökologischen Probleme der Menschheit. Menschen und Maschinen koexistieren in kollaborativen und symbiotischen Netzwerken. Ab 2050 wird global eine nachhaltige, technologiebasierte Bedarfswirtschaft erreicht sein, die die

materiellen Bedürfnisse der Bevölkerung bei gleichzeitiger absoluter Entlastung der Ökosysteme befriedigt. Neue Funktionalitäten und »lebende« Produkte und Produktionssysteme erobern im Zuge dessen die Märkte und führen zu stetig ansteigendem, qualitativem Wirtschaftswachstum. Rohstoffkonflikte gehören in diesem Entwicklungspfad bereits nach 2050 weitestgehend der Vergangenheit an.

### **Szenario 2: Deutschland als Nachzügler der Biologischen Transformation**

Im zweiten Entwicklungspfad führt die Biologische Transformation zwar zu Veränderungen der Industrie und damit der Lebensweise, Deutschland fungiert hier jedoch lediglich als fremdbestimmter Nachzügler. Einige Schlüsseltechnologien der Biologischen Transformation, vor allem die Künstliche Intelligenz und die Biotechnologie werden in diesem Entwicklungspfad von den Volkswirtschaften China und USA in den 2020er Jahren in die Welt getragen. Diese Länder übernehmen im Zuge dessen schneller die Technologieführerschaft als Deutschland, da hierzulande eine langwierige politische Diskussion und gesellschaftliche Skepsis Fortschritte in diesen Technologiebereichen behindern. Deutschlands Rolle in der Weltwirtschaft verliert aufgrund dieses Zurückfallens gleichzeitig an Relevanz im globalen Markt. Als Reaktion auf diese Entwicklung wird die biointelligente Wertschöpfung als Leitvision von der deutschen Politik erst im Laufe der nächsten Legislaturperiode (ab 2020) übernommen und bis zum Jahr 2030 in Teilbereichen und mit mäßiger Intensität verfolgt. Ab 2030 wird zwar durch die Schaffung der entsprechenden Rahmenbedingungen verstärkt versucht, mit den USA und China aufzuschließen, die mittlerweile durch bahnbrechende Innovationen in den Bereichen Biotechnologie und künstlicher Intelligenz große Fortschritte gemacht haben, es wird jedoch mehr und mehr offensichtlich, dass der Vorsprung der USA und China nicht mehr aufzuholen ist. Während Deutschland zwar durch etablierte Technologien (hauptsächlich im eigenen Land) weiterhin Abnehmer findet, treffen die von den USA und China exportierten Technologien auf großes Interesse in der Welt und werden fast ausschließlich von diesen Nationen entwickelt und verbreitet. Lediglich Nischenmärkte für biointelligente Technologien können durch diese Maßnahmen bis 2040 ausgehend von Deutschland erschlossen werden. Der Ruf von »Made in Germany« Produkten und Technologien geht nach und nach verloren. Bis 2050 wird weiterhin massiv in die Erneuerung der deutschen Volkswirtschaft investiert, u. a. um eine flächendeckende Kreislaufwirtschaft zu schaffen, Erfolge bleiben aufgrund der fehlenden Möglichkeiten in vielen Bereichen der Basistechnologien jedoch aus und USA und China dominieren die Weltwirtschaft. Deutschland verliert nach und nach auch in seinen traditionellen produktionstechnischen Kernbereichen an Ansehen. Nachhaltigkeitskonzepte werden zwar weltweit verfolgt, diese basieren jedoch nicht auf einem umfassenden Ökosystemgedanken, weshalb die globale Umweltbelastung nur auf Zeit gedämpft werden kann.

### **Szenario 3: Deutschland als Antagonist der Biologischen Transformation**

Der dritte Entwicklungspfad sieht Deutschland als Antagonist in einer von eher negativen Aspekten geprägten Biologischen Transformation. Die Erforschung und Anwendung von selbstlernenden Algorithmen, Genome Editing und biointelligenten Schnittstellentechnologien, die auch nach umfassender gesellschaftlicher Diskussion als risikobehaftet eingestuft werden, bleiben in Deutschland strikt reguliert. Diese Schlüsseltechnologien der Biologischen Transformation werden von den Volkswirtschaften China und USA in die Welt getragen, jedoch nicht in einem integrierten, ganzheitlichen und nachhaltigkeitsgetriebenen Ansatz und nach dem Vorsorgeprinzip, wie es die Vision einer Biointelligenten Wertschöpfung vorsieht. Während die USA und China bis zum Jahr 2030 massiv auf die Basistechnologien der Biologischen Transformation setzen kann in Deutschland demgegenüber kein gesellschaftliches Momentum generiert werden. Deutschland verliert seine Position als »Technologieführer« und hat bis 2040 aufgrund des Fehlens eines konsensfähigen Konzepts für eine nachhaltige Wirtschaftsweise eine immer geringere Bedeutung in der Welt. Die Nation arrangiert sich zwar mit ihrer nachrangigen Rolle und aufgrund des Mangels an Alternativen bildet sich der gesellschaftliche Konsens einer flächendeckenden Bedarfswirtschaft aus, diese richtet sich jedoch lediglich an den Grundbedürfnissen (Essen, Trinken, etc.) der Bürger aus.

Tabelle 4-1 fasst die getroffenen Annahmen und Entwicklungsstufen der drei Entwicklungspfade zusammen.

Tabelle 4-1 Annahmen und Entwicklungsstufen der drei Entwicklungspfade der Biologischen Transformation

	<b>Umfassende Biologische Transformation</b>	<b>Moderate Biologische Transformation</b>	<b>Marginale Biologische Transformation</b>
<b>Annahmen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Der angestoßene gesellschaftliche Diskurs führt schnell zu einem Abbau der Vorbehalte gegen die Befähigertechnologien der Biologischen Transformation.</li> <li>Die Bundesregierung beschließt noch in dieser Legislaturperiode eine Intensivierung der Forschungsförderung in den Handlungsfeldern der Biologischen Transformation.</li> <li>Es folgen eine rasche Öffnung der Märkte und ein Abbau von Regularien. Der Kapitalzugang für Start-Ups wird massiv erleichtert.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Der angestoßene gesellschaftliche Dialog führt nur langsam und/oder in Teilen zu einem Abbau der Vorbehalte gegen die Befähigertechnologien der Biologischen Transformation. Ein messbarer Stimmungswandel erfolgt ca. im Jahre 2030.</li> <li>Eine Intensivierung der Forschungsförderung in den Handlungsfeldern der Biologischen Transformation wird durch die nächste Bundesregierung veranlasst.</li> <li>Die Märkte öffnen sich langsam, ein Abbau von Regularien erfolgt teilweise. Der Kapitalzugang für Start-Ups verbessert sich nur in geringem Umfang.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Trotz des angestoßenen gesellschaftlichen Dialogs verschließt sich die deutsche Gesellschaft in weiten Teilen den Befähigertechnologien der Biologischen Transformation.</li> <li>Eine Intensivierung der Forschungsförderung in den Handlungsfeldern der Biologischen Transformation findet lediglich unzureichend statt.</li> <li>Die Märkte öffnen sich wenig bis gar nicht. Ein Abbau von Regularien findet nicht statt. Der Kapitalzugang für Start-Ups verschlechtert sich.</li> </ul>
	<b>bis 2020</b>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erfolge in der Medizintechnik, Pharma und Chemie übernehmen eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung lebender Produkte.</li> <li>Massive Ausweitung der interdisziplinären Forschung an Instituten sowie in der Industrie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erfolge in Medizintechnik, Pharma und Chemie werden von der Gesellschaft registriert und in der Politik diskutiert.</li> <li>Flächendeckende Aktivitäten werden aufgrund unruhiger politischer Verhältnisse (Protektionismus etc.) zunächst zurückgestellt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erfolge in der Medizintechnik, Pharma und Chemie werden zwar registriert, führen aber nicht zu einem gesellschaftlichen Umdenken.</li> <li>Statt Regularien für Befähigertechnologien der Biologischen Transformation zu lockern, werden diese verschärft.</li> </ul>
	<b>bis 2030</b>		
<b>Entwicklungsstufen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erste erfolgreiche technische Lösungen wecken weltweit Aufsehen und führen zu ersten Nachahmern.</li> <li>(Aus-) Bildungssysteme werden schnell an neue Kompetenzbedarfe angepasst.</li> <li>Starker Anstieg deutscher Start-Ups.</li> <li>Deutschland wird weltweiter Leitmarkt für die biointelligente Wertschöpfung.</li> <li>Eine barrierefreie Kommunikation biologischer und technischer Systeme wird in immer mehr Bereichen möglich.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Technische Erfolge bleiben Randerscheinungen, die lediglich in einigen Nischen Aufsehen erregen.</li> <li>Weltweite Aufmerksamkeit erhalten Innovationen aus den USA und China, wo eine intensive Förderung der Forschung &amp; Entwicklung, gepaart mit einem guten Kapitalzugang zu einer belebten Start-Up-Szene führt bzw. diese stärkt.</li> <li>In Deutschland setzt sich langsam eine Bewegung in Gang, eine Intensivierung der Forschungsförderung folgt.</li> <li>Biologische und technische Systeme werden im Wertschöpfungskontext weiterhin primär als getrennte Objekte verstanden.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Technische Erfolge bleiben aus.</li> <li>Weltweit haben protektionistische Tendenzen zu einer Reduktion des Handels geführt.</li> <li>Während die USA und China massiv auf die Befähigertechnologien der Biologischen Transformation setzen, kann in Deutschland kein Momentum generiert werden.</li> <li>Die Rahmenbedingungen für Befähigertechnologien der Biologischen Transformation bleiben unverändert.</li> <li>Deutsche Start-Ups stehen im internationalen Vergleich auf verlorenem Posten.</li> <li>Ein Wandel der Wertschöpfung findet nicht statt.</li> </ul>

bis 2040

- In der Informationstechnologie beginnen sich Quantencomputer flächendeckend zu etablieren. Eine Adaption der Peripherie erfolgt schnell. Die Möglichkeiten für künstliche Intelligenz und damit auch für die biointelligente Wertschöpfung steigen sprunghaft an.
- Unternehmen, Prozesse und Geschäftsmodelle nehmen vermehrt organische Strukturen an, die sie zu umfassender Resilienz befähigen.
- Automatisierung körperlich schädlicher Arbeit und Mensch-Maschine-Interaktionen führen zu Entlastung des Gesundheits- und Rentensystems.
- Deutschland ist weltweit als Leitbild einer nachhaltigen Wirtschaftsweise anerkannt, »Made-in-Germany« steht weiterhin für Qualität und nun vermehrt für Integrität.
- Quantencomputer haben sich zwar in Teilen etabliert, eine Adaption der Peripherie erfolgt jedoch schleppend. Die Möglichkeiten für künstliche Intelligenz und damit auch für die biointelligente Wertschöpfung steigen nur schrittweise.
- (Aus-) Bildungssysteme werden verspätet an neue Kompetenzbedarfe angepasst.
- Deutsche Unternehmen, die weiterhin primär in starren Strukturen organisiert sind, machen mit ersten Innovationen auf sich aufmerksam. Der Vorsprung der USA und Chinas ist jedoch massiv. In der Folge fokussieren deutsche Unternehmen auf Nischen- und Lokalmärkte, in denen »Made in Germany« noch anerkannt ist.
- Deutschland nimmt in Fragestellungen einer nachhaltigen Wirtschaftsweise mehr und mehr eine Mitläuferrolle ein.
- Quantencomputer sind noch nicht reif für die Anwendung. Die Möglichkeiten für künstliche Intelligenz entwickeln sich langsam.
- Im Zuge erhöhter Complianceanforderungen werden zusätzliche bürokratische Hürden aufgebaut. Unternehmen bleiben starr und wenig resistent gegenüber Veränderungen. Automatisierung körperlich schädlicher Arbeit und Mensch-Maschine-Interaktionen entwickeln sich aufgrund der hohen Anforderungen an den Umgang mit Daten nur geringfügig.
- Das Entfaltungspotential für die biointelligente Wertschöpfung ist marginal.
- Deutschland büßt seine Position als »Technologieführer« ein und verliert an Gewicht in der Weltpolitik.
- Weltweit fehlt ein konsensfähiges Konzept für eine nachhaltige Wirtschaftsweise.

bis 2050

- Die Wertschöpfung am Standort Deutschland ist biointelligent.
- Smart Biomanufacturing Devices ermöglichen regional optimale Ressourcenausnutzung und die Schließung von Stoff- und Energiekreisläufen.
- Menschen und intelligente Maschinen koexistieren in völlig neuartigen kollaborativen Netzwerken.
- Selbstlernende Algorithmen finden Lösungen für eine Vielzahl drängender sozioökologischer Probleme der Menschheit.
- Die Wertschöpfung entspricht in Teilen der Vision der Biointelligenz.
- Smart Biomanufacturing Devices werden weltweit massiv nachgefragt, die großen Profiteure dieser Entwicklung sind aber Unternehmen in den USA und China.
- Zwar wurde massiv in die Erneuerung der deutschen Volkswirtschaft investiert, u. a. um eine flächendeckende Kreislaufwirtschaft zu schaffen, Erfolge bleiben aufgrund der fehlenden Möglichkeiten in vielen Bereichen der Befähigertechnologien jedoch aus.
- Die deutsche Industrie ist weit entfernt von der zu Beginn des Jahrhunderts entwickelten Vision einer biointelligenten Wertschöpfung.
- Deutschland hat sich mit seiner nachrangigen Rolle in der Weltpolitik arrangiert.
- Aufgrund des Mangels an Alternativen bildet sich der gesellschaftliche Konsens einer flächendeckenden Bedarfswirtschaft aus, der sich an den Grundbedürfnissen der Bürger ausrichtet

2050+

- Der Großteil der hergestellten Produkte und Produktionssysteme »lebt« und wird in nachhaltigen Wertschöpfungskreisläufen geführt.
- Eine Vielzahl organisch strukturierter, dezentral organisierter und hochgradig resilienter Unternehmen hat zu einer prosperierenden und gleichzeitig ökologisch verträglichen Wirtschaftsform geführt: Der technologiebasierten Bedarfswirtschaft.
- Der Großteil der hergestellten Produkte und Produktionssysteme »lebt«, wird aber in den USA und China entwickelt und gefertigt.
- Während die USA und China dominierenden Volkswirtschaften sind, haben weitere Nationen Deutschland durch Leapfrogging überholt.
- Da die Nachfrage nach »lebenden« Produkten kontinuierlich steigt, verliert Deutschland langsam in traditionellen produktionstechnischen Kernbereichen an Ansehen.
- »Lebende« Produkte und Produktionssysteme finden, trotz weltweit massiver Nachfrage, wenig Beachtung in Deutschland.
- Während weltweit die Ressourcen zur Neige gehen, hat Deutschland die Transformation in eine nachhaltige Bedarfswirtschaft geschafft. Zwar orientiert sich diese an den Grundbedürfnissen seiner Bürger, führt aber zu einer zweckmäßigen Ausnutzung der gegebenen Ressourcen.

»Die Biologische Transformation ist für mich Optimieren statt Maximieren, den Ressourcenverbrauch um den Faktor 10 in den nächsten 30 Jahren reduzieren und die gesamte Wertschöpfungsketten gesamtheitlich und ganzheitlich bewerten – d. h. nicht z. B. nur den Energieverbrauch beim Fahren, sondern auch beim Entwickeln betrachten.«

*(Jürgen R. Schmid, Geschäftsführender Gesellschafter, Design Tech)*



# 5 VISION UND EMPFEHLUNG

Gemeinsame Visionen sind wesentliche Treiber für gesellschaftliche Umbrüche jeglicher Art. Auf Basis der oben zusammenfassend erläuterten Ergebnisse der BIOTRAIN-Untersuchung wurde eine Vision für den Prozess der Biologischen Transformation erarbeitet, der sich im Kern an dem in Abschnitt 4.2 erläuterten Szenario umfassende Biologische Transformation orientiert. Um den Weg zur Umsetzung dieser Vision anzustoßen, wurden aus den Interview- und Workshop-Ergebnissen wesentliche Forschungs- und Gestaltungsthemen identifiziert, die sich in zehn Überkategorien, sogenannten Handlungsfeldern, kategorisieren lassen. Diese werden zusammen mit Handlungsempfehlungen in Abschnitt 5.3 erläutert.

## 5.1 ENTWICKLUNG DER VISION

Die Biologie findet umfassenden Einzug in die Wertschöpfung und ermöglicht den Menschen eine ökologisch ausbalancierte Befriedigung ihrer Bedürfnisse. Mit Hilfe von sog. Smart Biomanufacturing Devices (intelligenten, dezentralen Bioproduktionszellen) vollzieht sich der Wandel hin zu einer biobasierten, personalisierten und dezentralen Herstellung von Konsumgütern und Nahrungsmitteln. Auch in der Gesundheitsversorgung, in der Verkehrstechnik und -organisation können durch Personalisierung und intelligentes Design massive ökonomische und ökologische Potenziale gehoben werden. Obgleich nicht alle Produkte dezentral hergestellt werden (Verteidigung, Elektronik etc.), entwickelt sich aus der technischen Erneuerung der industriellen Wertschöpfung eine fortschrittliche Wirtschaftsform, die die physikalischen Grenzen unseres Planeten berücksichtigt: Die technologiebasierte Bedarfswirtschaft. Produkte werden erst dann produziert, wenn sie gebraucht werden (just-in-time). Abfall existiert nicht mehr, da jedweder Output den Input für etwas Neues darstellt. Weltweit wird Deutschland das erste Land sein, das sich einer biointelligenten Wertschöpfung verschreibt. Mitte des 21. Jahrhunderts gilt Deutschland als Vorreiter einer nachhaltigen und zugleich wohlstandsorientierten Volkswirtschaft und wird zum globalen Leitbild.

## 5.2 GESTALTUNG DER VISION

### Tiefgreifende Digitalisierung: Bleibt Deutschland wettbewerbsfähig?

Intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie das Engagement produzierender Unternehmen führen zu einer tiefgreifenden Digitalisierung der deutschen Industrie (Industrie 4.0). Die durch den effektiven Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien gelungene Vernetzung der Maschinen und Anlagen der Unternehmen erlaubt enorme Produktivitätssteigerungen. Während im Kontext von Industrie 4.0 die Position Deutschlands als eine der konkurrenzfähigsten Industriestandorte der Welt zunächst sichert, prosperiert auch die Konkurrenz in Schwellen- und Entwicklungsländern (insbesondere China). Trotz des positiven Stimmungsbildes aufgrund der lange anhaltenden guten konjunkturellen Lage, steht die Wettbewerbsfähigkeit und Innovationsstärke des Produktionsstandortes Deutschland zur Disposition.



## Von der Digitalen zur Biologischen Transformation: Digitalisierung als Befähiger

Während der Einsatz selbstlernender Algorithmen in der Industrie zunächst lediglich der Produktivitäts- und Produktperformanzsteigerung dient, nutzen Forschungseinrichtungen diese vermehrt zur Lösung komplexer technischer und systemischer Herausforderungen menschlichen Zusammenlebens und Wirtschaftens. Gleichzeitig ermöglichen die enormen Entwicklungsschritte und der Preisverfall im Bereich der Sensorik eine massive Ausweitung des Technologieeinsatzes. Die verfügbare Menge an Daten wächst dadurch exponentiell. Mit Hilfe von maschinellem Lernen können die immensen Datenmengen gezielt ausgewertet, in Datenbanken potenziellen Nutzern zur Verfügung gestellt und zu Informationen weiterentwickelt als entscheidungsunterstützende Tools eingesetzt werden. Die Biowissenschaften, insbesondere die Forschung in der Genetik, waren eine der ersten Disziplinen, die sich mit einer strukturierten Datenerfassung und -speicherung befasst haben und sind heute ein Vorreiter bei der Digitalisierung in den experimentellen Wissenschaften. Der enorme Anstieg des verfügbaren Wissens über die Biologie, die durch die Digitalisierung ermöglichte Vernetzung von Wissenschaftsdisziplinen und Industrien sowie der intelligente Umgang mit großen Datenmengen wird die industrielle Wertschöpfung der Zukunft branchenübergreifend maßgeblich verändern. Darüber sind sich zahlreiche Experten, Visionäre und Wissenschaftler einig.

## Die Biologie findet Einzug in die Wertschöpfung: Inspiration, Integration, Interaktion

Die systematische Anwendung des Wissens über die Biologie und die damit verbundene Konvergenz von Produktions-, Informations- und Biotechnologie wird Produkte, Produktionsverfahren, Organisationsformen, Lehr- und Lernmethoden sowie ganze Regionen und Lebensweisen tiefgreifend verändern. Während sich Optimierungsmaßnahmen seit der ersten industriellen Revolution entweder alleine auf das technische System konzentrierten (z. B. Realisierung der Fließfertigung) oder eine Verbindung zwischen technischem und informatorischem System (z. B. Vernetzung produktionstechnischer Anlagen mit Hilfe cyber-physischer Systeme) anstrebten, wird mehr und mehr eine synchrone Verzahnung technischer, informatorischer und biologischer Systeme denkbar. Durch Inspiration, Integration und Interaktion kann die Wertschöpfung in allen Bereichen optimiert werden. Die drei Integrationsebenen bieten interdisziplinäre Lösungsansätze an ihren Schnittstellen (vgl. Kap. 1).

## Biointelligente Wertschöpfungssysteme: Maximale Wandlungsfähigkeit und Resilienz

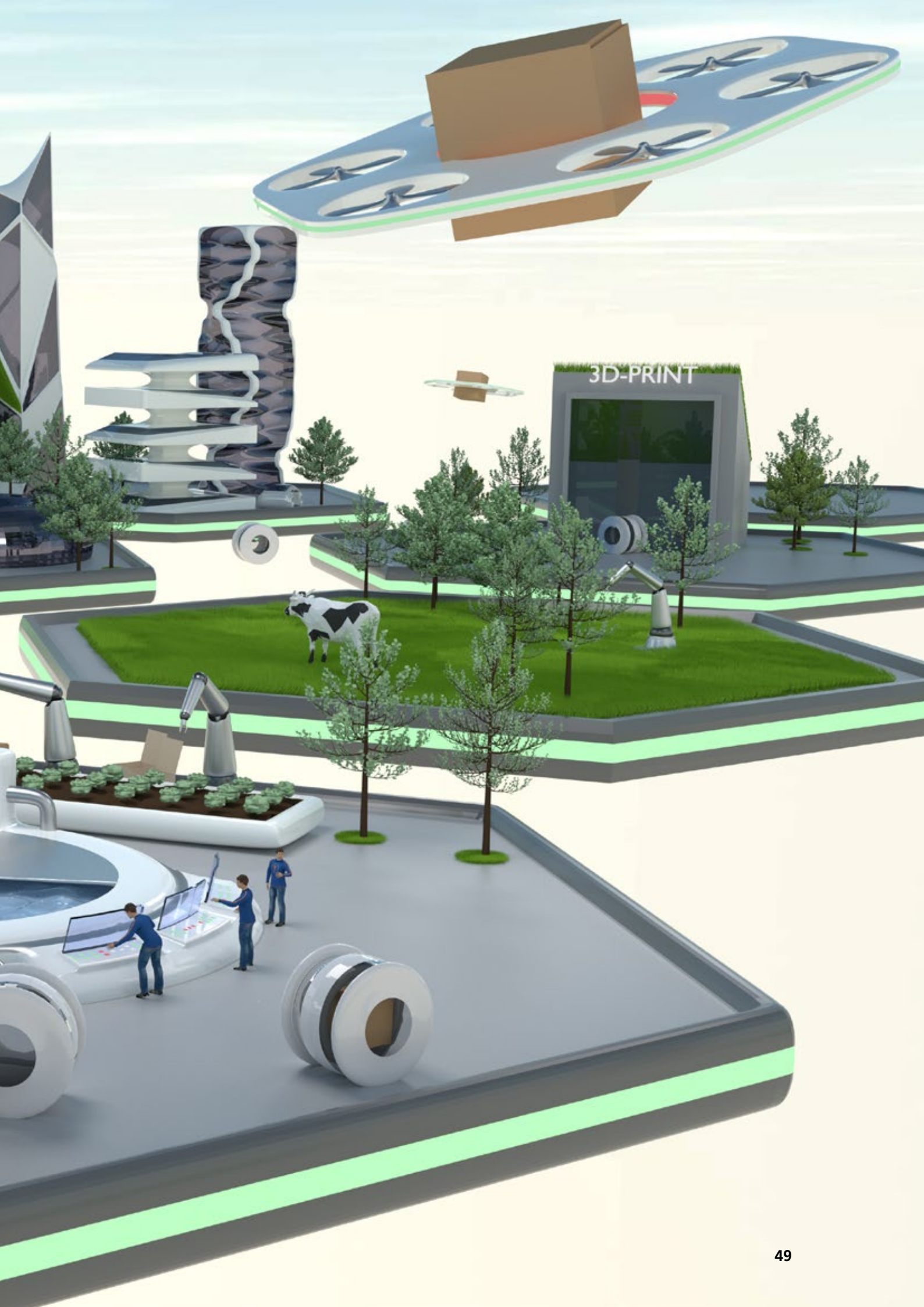
Mit Hilfe der digitalen Transformation (Industrie 4.0) wurden in produzierenden Unternehmen umfangreiche Flexibilisierungspotenziale realisiert. Mit der Biologischen Transformation entsteht darüber hinaus die Möglichkeit, vollkommen wandlungsfähige Produktionseinheiten zu schaffen. Biointelligente Wertschöpfungssysteme sind in der Lage<sup>1</sup>, ihre Architektur autonom und ad hoc zur optimalen Lösung eines Produktionsauftrags zu adaptieren. Wertschöpfungssysteme sind dabei nicht länger als abgegrenzte Entitäten (Fabriken, Anlagen) zu verstehen, sondern als regionale soziotechnische Zellen, die über sämtliche notwendige Informationen verfügen (vgl. DNA), um Ressourcen auszutauschen und intelligent zu nutzen (vgl. Stoffwechsel), sich an Umgebungsbedingungen anzupassen (vgl. Evolution), sich spontan und autonom untereinander zu vernetzen und im Schwarm gezielte Lösungen für gegebene Aufgaben zu finden. Fallen Teile des Wertschöpfungssystems unvorhergesehen aus, passt sich das System selbstständig und in Echtzeit an (Resilienz). Biointelligente Wertschöpfungszellen können in verschiedensten Dimensionen (vgl. Molekül, Zelle, Organismus, Gemeinschaft, Region etc.) vorkommen, sind dezentral organisiert, bewirtschaften regionale Ressourcen und stehen in vielfältigen Austauschbeziehungen mit ihren umgebenden Wertschöpfungseinheiten und biologischen Ressourcen.

---

<sup>1</sup> Ein Wertschöpfungssystem ist als biointelligent einzustufen, wenn mindestens eine biologische Komponente in Produkt oder Produktionsprozess vorhanden ist und zusätzlich ein Informationsaustausch zwischen biologischen und technischen Komponenten (in Echtzeit) stattfindet, was wiederum eine selbstlernende online-Prozessregelung und die Existenz eines digitalen Abbilds des Produkts oder Produktionsprozesses voraussetzt.







## ● Vision und Empfehlung

»Die Natur kommt mit Heterogenität und schwankenden Bedingungen sehr gut zurecht. Für Effizienzsteigerungen innerhalb der Wertschöpfung ist diese Eigenschaft eine wichtige Anforderung. Große, unflexible und homogene Produktionschargen, wie wir sie bisher kennen, sind ineffizient.«

*(Prof. Dr. Horst-Christian Langowski, Leiter, Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV)*

### **Smart Biomanufacturing Devices: Technologien für eine biointelligente Wertschöpfung**

Im Zuge der Biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung gewinnen sogenannte Smart Biomanufacturing Devices (intelligente Bioproduktionszellen) an Bedeutung. Mit ihnen wird es möglich, verschiedenste Produkte selbstständig mit den gegebenen biologischen Ressourcen vor Ort zu produzieren. Hierzu werden u. a. auf der additiven Fertigung basierende Produktionsverfahren mit selbstlernenden Algorithmen gekoppelt, um regional zur Verfügung stehende biobasierte Materialien aufzubereiten (u. a. Bioreaktoren, Bioraffinerien), zu verarbeiten und auf spezifische Anforderungen (u. a. Nutzung, End-of-Life) zu adaptieren. Das technologische und das biologische System werden dazu befähigt, miteinander zu kommunizieren und voneinander zu lernen. Minizellfabriken, aufbauend auf den Prinzipien des Tissue Engineering, finden Einzug in die Küchen der Haushalte. Auf diese Weise wird die Produktion von Fleisch und anderen Lebensmitteln auf Knopfdruck möglich<sup>1</sup>. Entstehende Haushaltsabfälle werden bspw. mit Hilfe von bioelektrochemischen Produktionszellen direkt verwertet und fließen in Form von Energie und/oder Material in neue Produkte ein.

### **Neue Funktionen im Wertschöpfungsverbund: Konsumenten als Zulieferer**

Die Verbreitung von Smart Biomanufacturing Devices ermöglicht es den Konsumenten, in völlig neuartiger Weise am Wertschöpfungsprozess teilzunehmen, indem sie, neben ihrer Funktion als Verbraucher (herkömmliche Wertschöpfung) und Gestalter (digitalisierte Wertschöpfung), auch als Zulieferer von Rohstoffen und Bauteilen in Erscheinung treten können. Auf diese Weise wird es mehr und mehr möglich, Materialkreisläufe zu schließen.

### **Lebende Produkte ermöglichen Höchstmaß an Personalisierung**

Die Biologische Transformation wird nicht alleine der Dezentralisierung und Wandlungsfähigkeit der Wertschöpfung dienen. Zusätzlich ermöglicht sie die Integration von adaptiven Mikroorganismen in Materialien und Oberflächen, eine Funktionalisierung und Anpassung von Produkten an die Gegebenheiten der Nutzung und die Refabrikation nach der Nutzungsphase. Über intelligente Kommunikationsschnittstellen können Konsumenten jederzeit aktiv in den Entwicklungs- und Nutzungsprozess eingreifen und wesentliche Parameter steuern.

### **Neuartige Mensch-Maschine-Schnittstellen: Technologie und Biologie fühlen und steuern**

Das intensiviertere Kommunikationsvermögen zwischen technischen und biologischen Systemen bietet völlig neuartige Potenziale für Mensch-Maschine-Schnittstellen. In zukünftigen Wertschöpfungssystemen werden Menschen und Maschinen intuitiv zusammenarbeiten. Dabei sind beide Sphären in der Lage, miteinander barrierefrei zu kommunizieren. Maschinen geben ihre Informationen z. B. über intelligente Wearables (u. a. Augmented-Reality-Brillen) weiter und Menschen werden in den Maschinen über Avatare, also digitale Zwillingen-

<sup>1</sup> Erste Aktivitäten in diese Richtung stehen kurz vor der Marktreife (z. B. Mosa Meat, Memphis Meat)



ge, abgebildet. Dadurch kann die Maschine individuell mit der Person interagieren, also z. B. den Arbeitsplatz ergonomisch anpassen, die Sprache ändern oder sonstige physische oder psychische Zustände des interagierenden Menschen im Wertschöpfungsprozess berücksichtigen. Die Erkennung von Emotionen sowie physischen Belastungszuständen ermöglicht eine spezifische Adaption von Maschinen und Anlagen sowie eine bedürfnisgerechte Arbeitsgestaltung. Mit Hilfe von neuartiger Sensorik, Aktorik und Datenverarbeitung (z. B. als Kombination von Human-Brain-Interfaces und Exoskeletten) können Menschen dazu befähigt werden, technologische Systeme (z. B. Maschinenzustände) intuitiv zu steuern und damit eine beanspruchungsgerechte und gleichzeitig hocheffiziente Wertschöpfung zu realisieren.

### **Erneuerung von Lebensweisen, Viertel und Regionen**

Die Dezentralisierung der Wertschöpfung und die steigenden Möglichkeiten der aktiven Teilnahme an der Wertschöpfung führen auch zu einer Veränderung von Lebensweisen. Lebensmittel, die nicht in Minizellfabriken hergestellt werden, werden in eigenen oder genossenschaftlich bewirtschafteten Garten- und Zuchtanlagen angebaut (Horticulture). In urbanen Regionen werden vermehrt vertikale und horizontale Gärten an privaten und öffentlichen Gebäuden installiert. Ganze Gebäudekomplexe und Viertel werden biointelligent, weit über die Einführung von Smart Grids und Smart Entertainment hinaus. Intelligente Plattforttechnologien ermöglichen eine ideale Kapazitätsauslastung der installierten Smart Biomanufacturing Devices. Infolge der Regionalisierung der Wertschöpfung werden Transportwege massiv reduziert. Kleine und mittlere Unternehmen mit flexiblen Strukturen als Grundlage für Innovationsprozesse gewinnen in diesem Zusammenhang an Bedeutung.

## Wachsender Stellenwert sozialer Innovationen

Der Trend der genossenschaftlichen Nutzung führt zu einer Vielzahl sozialer Innovationen. Sharing-Konzepte gewinnen an Akzeptanz und werden in vielen Bereichen marktfähig. Das Open-Source-Prinzip löst in vielen Fällen das Eigentumsprinzip ab. Zwischen den Bewohnern von Regionen entsteht ein neues Gefühl des Miteinanders und der Selbstbestimmung. Die Wertschöpfung wird sich weniger in Ballungszentren konzentrieren und ehemals von Landflucht betroffene Regionen und Kommunen erholen sich.

## Eine neue Wirtschaftsform: Technologiebasierte Bedarfswirtschaft

»Der optimale Endzustand der Biologischen Transformation ist eine nachhaltige Wertschöpfung mit der Natur als Vorbild. Dabei handelt es sich nicht um einen statischen Zustand, sondern um einen dynamischen Prozess der Selbstoptimierung.«

*(Fabian Bahnsen, Vertriebsleiter, RUNAWERK)*

Aus der technischen Erneuerung der industriellen Wertschöpfung entwickelt sich eine fortschrittliche Wirtschaftsform: Die technologiebasierte Bedarfswirtschaft – ein fundamentaler Wandel. Statt Waren werden mehr und mehr Baupläne gekauft, die von intelligenten (selbstlernenden) Systemen verarbeitet und auf lokale Gegebenheiten (u. a. Ressourcenvorkommen, Energiedargebot) adaptiert werden können. Während ein Großteil der Konsumprodukte vor Ort (im Haushalt oder in lokalen Fertigungszellen) produziert wird, übernehmen etablierte Unternehmen weiterhin die Fertigung komplexer Produkte (Maschinen, Anlagen, Fahrzeuge etc.). Im Gegensatz zu heutigen zentralisiert-linearen Produktionsweisen, gestaltet sich dies jedoch dezentral und in Kreisläufen.

## Nachhaltige Wertschöpfung wird möglich

In Summe führt die Dezentralisierung der Wertschöpfung mit Hilfe biointelligenter Systeme zu einer massiven Reduktion des Verbrauchs von nicht-regenerativen Materialien und von Emissionen, u. a. durch die Substitution ökologisch unvorteilhafter Produktionsprozesse, Einsparungen durch kollaborative Nutzung (Shared Economy) und Problemlösungskompetenzen selbstlernender Systeme. Kreisläufe werden flächendeckend nach dem Cradle-to-Cradle-Prinzip geschlossen. Re- und Upcycling sind intendierter Teil des Produktlebens, das bereits in der Frühphase geplant wird. Biobasierte Produkte können problemlos an die Biosphäre abgegeben und zurück in den Wertschöpfungskreislauf geführt werden. Die Substitution importierter durch regional verfügbare biobasierte Materialien erlaubt eine dramatische Reduktion der Importabhängigkeit. Die von der Bundesregierung bereits früh aktiv forcierte Standardisierung der Bewertung von nachhaltiger Wertschöpfung ermöglicht gezielte regulatorische Eingriffe. Die Erweiterung der Bilanzgrenzen und eine konsequente Bepreisung von externen Effekten führen zu einem Umdenken in Unternehmen. Damit verbunden verdrängt die Stakeholder- endgültig die Shareholder-Orientierung. Entscheidungsträger in Unternehmen priorisieren vermehrt den Dienst an der Gemeinschaft. In Summe sinkt der individuelle Fußabdruck der Bürgerinnen und Bürger auf ein sozio-ökologisch vertretbares Maß. Die Ökosphäre wird absolut entlastet.

»In der Natur bestehen in vielen Bereichen selbstregulierende Gleichgewichte. Dieses Prinzip könnte man auch in der industriellen Wertschöpfung anwenden, um z. B. zu helfen, die Biodiversität und Ökosystemstabilität zu erhalten.«

*(Prof. Dr. Ernst Ulrich von Weizsäcker, Ko-Präsident Club of Rome)*



## Deutschland als Vorreiter und Leitmarkt

Weltweit wird Deutschland das erste Land, das sich einer biointelligenten Wertschöpfung verschreibt. Neben massiven Förderprogrammen der Bundesregierung bilden sich vermehrt regionale Initiativen, die Modellcharakter haben. Der, wenngleich durch jüngste Skandale angekratzte, weltweit aber weiterhin hervorragende Ruf Deutschlands als Industrienation wird hierdurch massiv gestärkt. Der Mut deutscher Bürgerinnen und Bürger, Unternehmer und Politiker wird auch im Ausland honoriert. Mitte des 21. Jahrhunderts ist Deutschland Leitbild einer nachhaltigen und zugleich wohlstandsorientierten Volkswirtschaft. Einsatzmöglichkeiten und -bedingungen von Zukunftstechnologien, denen Teile der Gesellschaft aufgrund ihrer potenziellen Folgen kritisch gegenüber stehen, werden in einem offenen gesellschaftlichen Dialog erörtert und festgelegt.

## Die Vision einer biointelligenten Wertschöpfung

Zusammenfassend lässt sich die Vision einer biointelligenten Wertschöpfung wie folgt beschreiben: Die Biologie findet durch die Biologische Transformation umfassenden Einzug in die Wertschöpfung und ermöglicht den Menschen eine ökologisch ausbalancierte Befriedigung ihrer Bedürfnisse. Mit Hilfe von sog. Smart Bio-manufacturing Devices (intelligenten, dezentralen Bioproduktionszellen) vollzieht sich der Wandel hin zu einer personalisierten Gesundheitsversorgung, intelligenten Verkehrsorganisation sowie dezentraler Herstellung von Konsumgütern und Nahrungsmitteln. Aus der technischen Erneuerung der industriellen Wertschöpfung entwickelt sich eine fortschrittliche Wirtschaftsform, die die physikalischen Grenzen unseres Planeten berücksichtigt: Die technologiebasierte Bedarfswirtschaft. Weltweit wird Deutschland das erste Land sein, das sich einer biointelligenten Wertschöpfung verschreibt. Mitte des 21. Jahrhunderts gilt Deutschland als Vorreiter einer nachhaltigen und zugleich wohlstandsorientierten Volkswirtschaft und wird zum globalen Leitbild.

## 5.3 HANDLUNGSFELDER

»The technologies we build have to be mega-efficient. The number of the biological systems (trees, flowers, organisms) far outnumber humans and yet they live in balance with the atmosphere and the ecosystem.«  
(Osh. Agabi, Gründer und CEO, Koniku Inc.)

Nachdem in dem Betrachtungsraum von einer primär unternehmensfokussierten Sichtweise (Mensch, Technik, Organisation, Rahmenbedingungen) ausgegangen wurde, legten die Interview- und Workshop-Ergebnisse einige weit über die Unternehmensgrenzen hinaus relevanten Handlungsfelder offen. Entsprechend wurde ein Ordnungsrahmen erarbeitet, der zwischen unternehmensinternen (intraorganisational), unternehmensexternen (interorganisational) und gesellschaftlich relevanten (sozio-politischen) Fragestellungen unterscheidet. Abb. 9 illustriert die zehn in diesen Bereichen wesentlichen Handlungsfelder der Biologischen Transformation und deren Einteilung in die Überkategorien. Jedes Handlungsfeld integriert eine Reihe von Handlungs- und Gestaltungsempfehlungen, die in den anschließenden Kapiteln zusammengefasst dargestellt werden. Ergänzend werden Anwendungsbeispiele biointelligenter Systeme vorgestellt.

● Vision und Empfehlung

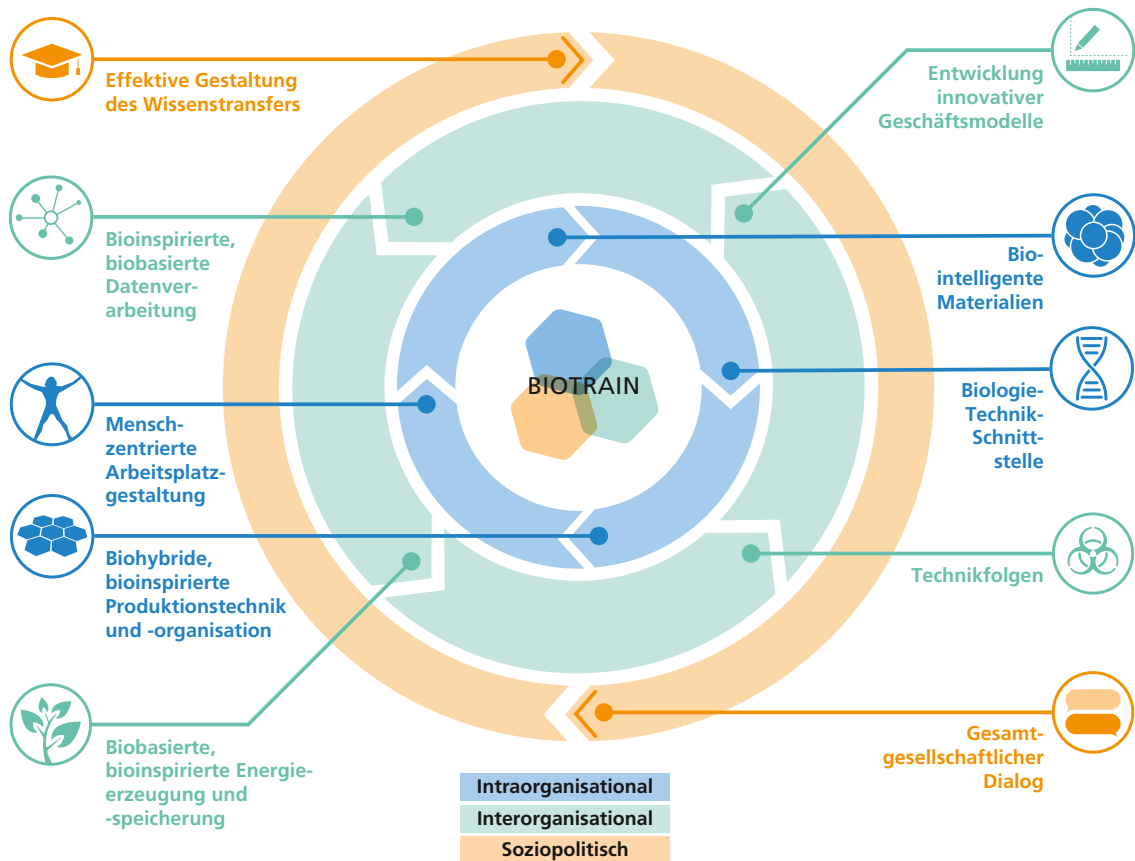


Abb. 9 Ordnungsrahmen der Biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung

### 5.3.1 ENTWICKLUNG UND VERARBEITUNG BIOINTELLIGENTER MATERIALIEN: RESSOURCENEFFIZIENZ, FLEXIBILISIERUNG UND NEUE FUNKTIONALITÄTEN



Handlungsfeld  
Material Ausar-  
beitung  
(PDF-Dokument)

Die Entwicklung und Verarbeitung biobasierter multifunktionaler Materialien ist eines der wesentlichen Handlungsfelder für die zukünftige Gestaltung der Biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung. Große Potenziale für neue Materialien werden vor allem für eine gesteigerte Ressourceneffizienz und -schonung sowie die Funktionalisierung von Produkten und Materialien mit zusätzlichen Regelungs- und Steuerungsfunktionen gesehen. Parallel dazu müssen aber auch Materialien für großvolumige Anwendungen weiterentwickelt werden – gegenwärtig geschieht das bereits bei biobasierten Kunststoffen.

#### Biobasierte Materialien – Grundlage für eine nachhaltige, kreislaufbasierte Wertschöpfung

Im Handlungsfeld Material ist der Zielzustand eine biobasierte, biointelligente und nachhaltige Wertschöpfung. Wesentlich für die Erreichung dieser Ziele ist der Umgang mit Stoffströmen, sowohl in Bezug auf die Materialien und Produkte als auch die eingesetzten Produktionsmittel. Die Betrachtung muss dabei die Herstellung, aber auch die gesamte Lebensspanne und spätere Verwertung von Produkten umfassen. Aus diesem Grund werden möglichst geschlossene Materialkreisläufe als ein wesentliches Feld zukünftiger Aktivitäten der Forschung, Politik und Industrie gesehen. Die Wiedereinführung von Reststoffen in neue Wertschöpfungssysteme (Refabrikation) sowie die Substitution von fossilen Massenrohstoffen durch nachwachsende Materialien werden als wichtige Ansatzpunkte für eine nachhaltige Wertschöpfung erachtet. Einen signifikanten Effekt kann dies in Branchen mit hohem Materialeinsatz zeigen, wie bspw. dem Baugewerbe



oder bei der Herstellung von Plattformchemikalien. Entsprechenden Forschungsbedarf gibt es für Anwendungsmöglichkeiten von biogenen und Recyclingmaterialien. Darüber hinaus wurde die Abbaubarkeit von Produkten unter Umweltbedingungen, insbesondere von Kunststoffen, als weiteres Forschungsthema mit hoher Priorität identifiziert. Die genaue Prognostizierung oder gar gezielte Aktivierung (siehe nächster Abschnitt) des Abbauprozesses der Materialien und dessen Anpassung an Nutzungszyklen ist ein ambitioniertes Ziel der Forschungsbemühungen in diesem Handlungsfeld. Hier ist nach Überzeugung der Experten das Handeln der Politik und seitens der Industrie erforderlich. Es bedarf weiterer Impulse zur Weiterentwicklung von Anreizen und Konzepten zu nachhaltigem Produktdesign, Reintegration von Reststoffen sowie der Nutzung biobasierter Rohstoffe, um das Konzept der Kreislaufwirtschaft auf Materialebene zu stärken.

### **Verarbeitung biobasierter Materialien – 3D-Bioprinting und DNA-Origami**

Die Verarbeitung biobasierter Materialien birgt sowohl große Potenziale als auch große Herausforderungen. Die hohe Funktionalität organischer Moleküle wird bereits heute für selbstorganisierte Strukturen wie DNA-Origami ausgenutzt. Diese Konzepte, verbunden mit Möglichkeiten der molekularen Manipulation, bilden die Basis für biobasierte und funktionale Strukturen auf Nanoebene. Die Forschung in diesem Gebiet kann die Basis von disruptiven Entwicklungen im Bereich Bioelektronik und Biocomputing sowie Sensortechnologien sein, wird aber gegenwärtig außerhalb der Medizin oder Diagnostik noch kaum wirtschaftlich genutzt.

3D-Druckverfahren von biologischem Material versprechen neue Ansätze im Bereich des sogenannten Tissue Engineering bzw. dem sogenannten 3D-Bioprinting. So können verschiedene Zellen ortsaufgelöst in Formen gedruckt werden, die sich in einem anschließenden Schritt zu neuen, komplexen Zellverbänden und Gewebe weiterentwickeln können. Die Idee, bspw. einmal Organe auf diese Weise künstlich herstellen zu können, ist noch nicht greifbar. 3D-Bioprinting ist ein jedoch ein Feld, das es über biomedizinische Anwendungen hinaus ermöglicht, neue, komplex aufgebaute Biomaterialien herzustellen oder Materialien biologisch zu funktionalisieren.

### **Smart bio-based materials – Neuartige Funktionen und nachhaltige Gestaltungsmöglichkeiten**

»Die Natur nicht nur zum Vorbild zu nehmen, sondern Prozesse und Organismen direkt zu nutzen und mit der Technik zu verschmelzen, bringt riesiges Potenzial für eine nachhaltige Wertschöpfung mit sich.«

*(Dr. Thomas Helle, Chief Executive Officer, Novis GmbH)*

Intelligente Materialien (smart materials) können ihre Eigenschaften als Antwort auf äußere Stimuli, wie zum Beispiel Temperatur, pH-Wert, Druck oder Feuchtigkeit, ändern. Solche Materialien finden bereits als Formgedächtnismaterialien, chromogene Materialien oder Piezoelektrika breite Verwendung. Biologische Materialien oder biologisch modifizierte Oberflächen können jedoch über weit mehr Stimuli selektiv angesprochen und aktiviert werden. Self-X-Funktionen, also autonome Funktionen, wie zum Beispiel eine selbstinduzierte Umformung oder Selbstheilung, könnten realisiert werden. Wie bei Leichtbaukonstruktionen durch Topologie- und Formoptimierung auf Basis von Materialkarten und Bauteilanforderungen das Design angelegt wird, müssen bei programmierbaren und intelligenten Materialien zukünftig Funktionen in der Simulation genau beschrieben werden können, um effizient Bauteile entwerfen zu können, die komplexe und kombinierte Funktionalitäten beinhalten. Die Forschung an integrierter computergestützter Materialentwicklung (ICME) muss in diese Richtung vorangetrieben und in der Lehre stärker berücksichtigt werden. Als erster Schritt zu solchen biointelligenten Materialien ist die Forschung an programmierbaren Materialien zu stärken. Das notwendige tiefgreifende Verständnis für die Struktur solcher Werkstoffe muss durch die gezielte Förderung der Materialforschung weiter verbessert werden, damit Materialeigenschaften durch das Werkstoffdesign und die Produktionsparameter so eingestellt werden können, dass intelligente Bauteile entstehen.

## **Biointelligente Materialien – Integrierte Sensorik, Aktorik und Algorithmik bringen Leben in die Produkte der Zukunft**

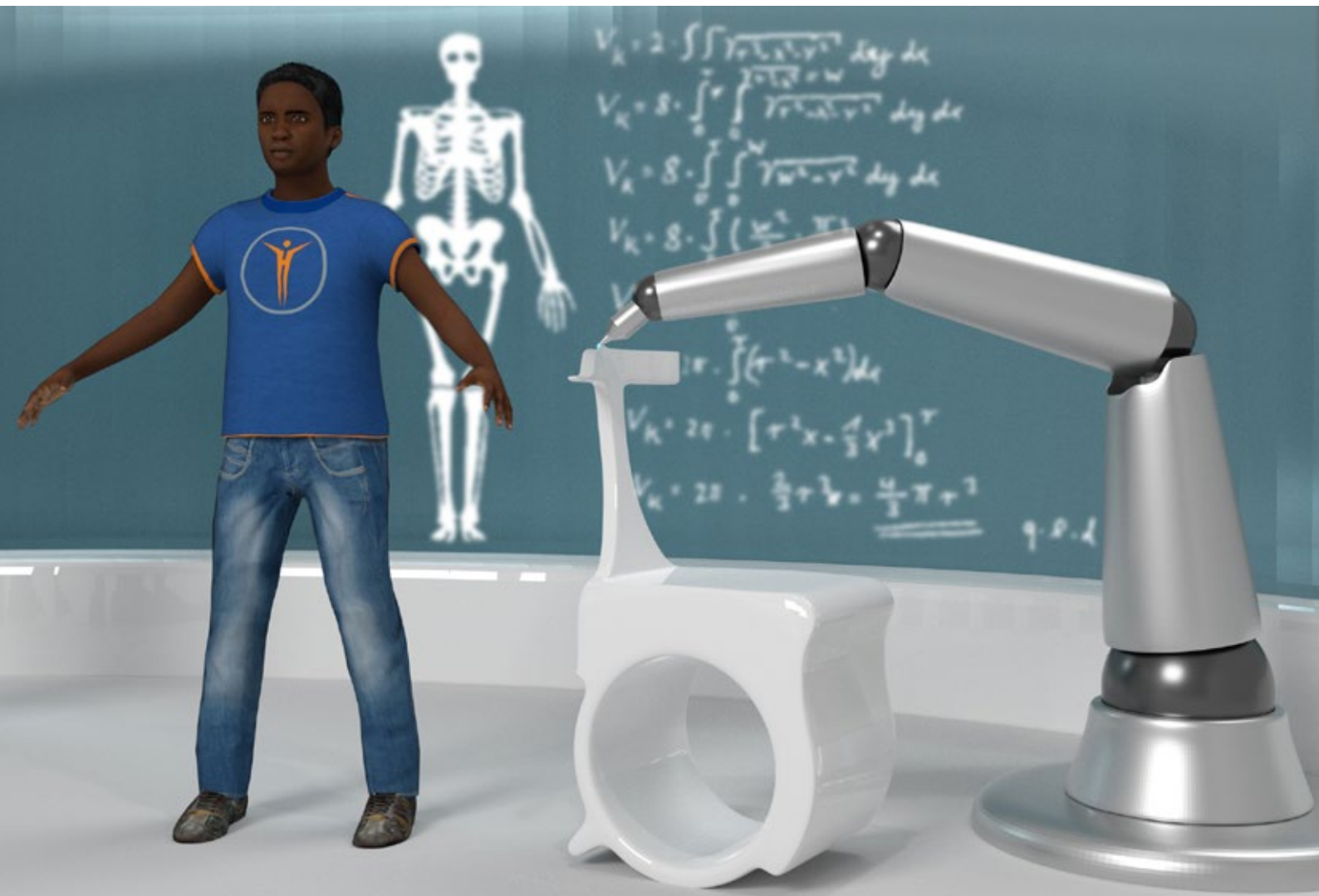
Die Integration von lebenden biologischen Organismen in Materialverbänden wird bisher lediglich in der Biomedizin anwendungsnah beforscht und umgesetzt. Die Potenziale von Organismen als Aktoren, Sensoren und Regler für erweiterte Materialfunktionen sind damit aber noch lange nicht ausgeschöpft. Letztendlich können hierdurch Materialien, die Funktionalitäten wie Lernfähigkeit und Anpassungsfähigkeit aufweisen, entwickelt werden. Als Schritt dahin ist die biologische Funktionalisierung, wie sie in der Forschung bereits umfassend auf molekularer Ebene angegangen wird, weiterzutreiben und zunehmend komplexere Funktionen bis hin zur Integration lebender Organismen in diesen Systemen zu verwirklichen. Die Immobilisierung oder Integration sowie die Aufrechterhaltung der Funktionen von Organismen in Materialien stellt hierbei eine wesentliche Herausforderung dar. Ein offenes Feld ist zudem die Ansteuerung dieser Funktionalitäten oder Organismen, die bspw. aktiv in der Bioelektronik beforscht wird. Crispr/Cas9 wird insbesondere mit der effizienten und gezielten Verwirklichung komplexer Funktionalitäten in Biomolekülen genannt. Durch mehr Information müsste dafür jedoch eine größere gesellschaftliche Akzeptanz von neuen Methoden in der Gentechnologie allgemein erreicht werden.

## **Next Steps – Interdisziplinäre Forschung, Kommunikation und Schaffung der Rahmenbedingungen**

Die Materialforschung muss im Rahmen der Biologischen Transformation stärker mit den Biowissenschaften zusammenarbeiten – einer gezielten Förderung der Forschung zwischen diesen Disziplinen kommt daher eine große Bedeutung zu. Die Vision ist eine durchgängige Integration der Biowissenschaften in die Materialwissenschaften und umgekehrt und eine Verbindung biologischer Materialien und Funktionen mit klassischen Werkstoffen. Dies wird Änderungen in der Rohstoffbasis, Verarbeitung, den Funktionalitäten und Nutzung bis hin zur Wiederverwendung oder Recycling mit sich bringen – also eine sektorenübergreifende Herausforderung über alle Wertschöpfungsstufen. Forschung, Entwicklung wie auch die Prüf- und Zertifizierungsrahmen müssen dafür eine umfassendere Sichtweise einnehmen und Materialien im Wertschöpfungssystem müssen ganzheitlicher betrachtet werden.

» [...] Materials Genome [...] a map of all the possible elements that you can mix and match computationally and predict what you get when you cook it up.“

*(Prof. Phillip B. Messersmith, Bioengineering, Materials Science and Engineering, UC Berkeley)*



## ANWENDUNGSBEISPIEL 1

### **Biointelligente Fertigung von ergonomischen Produkten – Neue Materialien, Individualität und Produktvarianz**

Durch die Biologische Transformation wird bei massenhafter Personalisierung eine nachhaltige Ressourcenschonung möglich. Die Entwicklung einer biointelligenten Wertschöpfung führt zu völlig neuartigen Produkt- und Produktionskonzepten. Vor dem Hintergrund der Grundbedürfnisse des Menschen können Produkte an hochspezifische und individuelle Wünsche angepasst werden und der Konsument wird in die Produkterstellung noch stärker eingebunden. Neuartige biobasierte Materialien, die eine nachhaltige Fertigung solcher Produkte ermöglichen gewinnen an Relevanz.

#### **Heute**

Der Trend zu individuellen Produkten zeigt sich bereits in vielen erfolgreichen Konzepten, die den Konsumenten als Teil der Produktion integrieren und damit zum sogenannten »Prosumenten« machen. Die Digitalisierung ist ein wichtiger Befähiger dieser Entwicklung, da individuelle und personenbezogene Daten schnell und in Echtzeit aufgenommen und in die Produktentstehungsprozesse integriert werden können. Ein Großteil der

Produktion erfolgt jedoch in starren Pipeline-Prozessen, bei denen die immer gleichen Ausgangsmaterialien und -parameter einen streng vorgegebenen Fertigungsablauf durchlaufen, an dessen Ende immer das gleiche Produkt steht.

### Morgen

Dezentrale, biointelligente Fertigung von individuellen Produkten aus nachhaltigen Materialien setzen sich auf dem Markt durch. Ein Beispiel sind ergonomische Sitzmöbel aus ökologisch zertifiziertem Holz, die nach kundenspezifischen Wünschen und mit Hilfe physiologischer Biodaten angefertigt werden können. Liegestühle können bspw. nach den eigenen Wünschen gestaltet werden und so z. B. die Holzart, Form, Größe, Farbe und das Material selbst und unmittelbar vor Beginn der Fertigung bestimmt werden. Intelligente Software ermittelt aus menschlichen Biodaten und Wünschen die digitalen Baupläne für ergonomisch optimale Liegestühle. Grobstrukturelle Basismodule, die in dezentralen Fertigungshubs gefertigt werden, werden ergänzt durch zusätzliche, ergonomisch angepasste Spezialteile. Letztere können direkt in den Haushalten mittels Smart Biomanufacturing Devices (intelligente Bioproduktionszellen, siehe Anwendungsbeispiel 4) aus Restholzspänen und biobasierten Bindemitteln mittels additiver Fertigung auf das Basis-Modul des Sitzmöbels »aufgedruckt« werden. Auch gebrauchte Möbel können so wiederaufbereitet bzw. individuell angepasst werden. Für den Fertigungsprozess wird vollständig auf örtlich vorhandene Ressourcen zurückgegriffen. Zusätzlich ist eine Integration von biointelligenten Funktionen in die zu verarbeitenden Materialien möglich, die eine Adaption (Bsp. Heizung, Kühlung, Farb- und Oberflächenänderungen) an die Biomarker des Nutzers, bspw. der Hauttemperatur ermöglichen.

Beispiele aus der Praxis: Die additive Fertigung von Biomaterialien, wie Holz ist bereits heute möglich (z. B. [www.visiotech-gmbh.de](http://www.visiotech-gmbh.de); [www.tecnaro.de](http://www.tecnaro.de)). Auch die Erfassung und Nutzung von Biodaten wird von vielen Unternehmen bereits vorangetrieben (z. B. Face ID-Technologie [www.apple.com](http://www.apple.com); Embedded Brain Reading Technologie des DFKI [www.dfki.de](http://www.dfki.de)).

### 5.3.2 BIOLOGIE-TECHNIK-SCHNITTSTELLEN: KOMMUNIKATIONSBEFÄHIGUNG UND INTELLIGENTE AUSGESTALTUNG DES DATENTRANSFERS ZWISCHEN BIOLOGISCHEN UND TECHNISCHEN SYSTEMEN

»Ein wesentliches Forschungsfeld der Biologischen Transformation ist die Entwicklung von Schnittstellentechnologien. In der Textilwirtschaft könnte dies eine Befähigertechnologie zum Beispiel für das Monitoring für Körperfunktionen sein. Ein unmittelbarer Kontakt der Technik zum menschlichen Körper muss hierzu hergestellt werden.«

*(Prof. Dr. Ernst Ulrich von Weizsäcker, Ko-Präsident Club of Rome)*



Handlungsfeld  
Biologie-Technik-  
Schnittstelle  
Ausarbeitung  
(PDF-Dokument)

Die Erforschung und Entwicklung von Schnittstellen zwischen Biologie und Technik ist für biologisch transformierte Wertschöpfungssysteme hoch relevant. Große Potenziale werden hier von allen Vertretern, vor allem im Hinblick auf Ressourceneffizienz, Wertschöpfungszellularität, Dezentralität, Autarkie und Robustheit gesehen. Das Handlungsfeld »Biologie-Technik-Schnittstelle« adressiert die Kommunikationsfähigkeit von biologischen und technischen Komponenten. Diese Interaktion zwischen technischen und biologischen Komponenten lässt sich generell in elektrische, chemische, mechanische und optische Interaktionsebenen bzw.

Wirkprinzipien kategorisieren und kann eine Interaktion mit ganzen Zellen, Organellen und/oder einzelnen Biomolekülen sein.

### **Biointelligente Systeme – Bidirektionale, echtzeitfähige Schnittstellen durch Sensorik, Aktorik und Algorithmik**

Die Vision einer biointelligenten Produktion gilt heute sowohl aus industrieller als auch aus gesellschaftlicher Sicht als wünschenswerter Zielzustand einer zukunftsfähigen, ganzheitlichen Wertschöpfung. Entscheidend für die Umsetzung ist die Kommunikationsfähigkeit zwischen technischen und biologischen Systemen mit Hilfe leistungsfähiger bidirektionaler, echtzeitfähiger, informatorischer Verbindungen. Erst diese enge Verbindung beider Systeme, die es erlaubt, biologische Signale (in Echtzeit) in technische Signale zu übersetzen und umgekehrt, ermöglicht die angestrebte intelligente Integration biologischer Systeme in das Wertschöpfungssystem. Die fehlenden Elemente hierfür sind insbesondere geeignete Sensoren, Aktoren, Algorithmen und ein digitales Abbild des biologischen Systems sowie in besonderem Maße deren informatorisch geregelte Interaktion. Basierend auf den Projektergebnissen ergeben sich daraus neben wichtigen Handlungsfeldern zur Standardisierung und Normierung mehrere Forschungsfelder für die Bereiche Regelungstechnik, Sensortechnik, Mikrorobotik, Mikrosystemtechnik, Additive Fertigung, Synthetische Biologie, Systembiologie sowie Datenauswertung und Algorithmik. Dabei werden disruptive Technologien für Biologie-Technik-Schnittstellen nicht nur für Branchen, die klassischerweise schon eine starke Vernetzung von biologischen und technischen Systemen aufweisen relevant (z. B. Chemie/Pharma oder Medizintechnik), sondern auch im Bereich der Informationstechnologie und der Automatisierung, dem Transport- und Logistikwesen und dem Fahrzeugbau. Es besteht hier besonderes Interesse für Technologien, die auch eine Schnittstelle zum Menschen ermöglichen und somit eine Unterstützung der Mitarbeiter in Wertschöpfungssystemen gewährleisten.

### **Sensortechnik – Informationen »fühlen«**

Um die skizzierte Art einer Biologie-Technik-Schnittstelle steuern und regeln zu können muss die Sensortechnik hochentwickelt sein. Wegweisende Forschungsfragen liegen hier vor allem in der Sensorintegration zur Online-Messung, aber auch in der Entwicklung von multivariaten, biobasierten, nichtinvasiven und nichtverbrauchenden Sensortechniken und Prinzipien. Dabei gewinnen Softsensoren mit zugrundeliegenden Prozessmodellen zunehmend an Relevanz. Die Mikrosystemtechnik, die schon heute Mikrofluidik und Chipplattformen für Zellsysteme (z. B. Organ-on-a-Chip) bereitstellt, wird nach Meinung der Experten künftig weiter an Bedeutung gewinnen, wenn es um die Integration molekularer oder zellulärer Bestandteile in technische Systeme geht. Eine standardisierte, multimodale und transferierbare Entwicklung von Mikrosystemen wird als weiteres wichtiges Forschungsfeld angesehen.

### **Aktorik und Regelungstechnik – Grundlagenmodell als Ausgangspunkt für Biologie-Technik-Schnittstellen**

Für den Bereich der Regelungstechnik gilt es, neue regelungstechnische Grundlagenmodelle zu entwickeln sowie die Kompatibilität bekannter regelungstechnischer Prinzipien in Biologie-Technik-Schnittstellen zu überprüfen. Darüber hinaus kommt der Entwicklung spezifischer biologischer Aktoren eine entscheidende Bedeutung zu, die entweder biologische Bestandteile oder aber technische Prozesse steuern und realisieren können. Für biobasierte Aktorik kommen bspw. Bakteriophagen als Forschungsgegenstände infrage, aber auch jegliche Formen von programmierten Mikroorganismen, die über eine Schnittstelle zu Technik verfügen. Die Regelungstechnik kann sich auf einer abstrakten Ebene von Regelalgorithmen aus der Biologie inspirieren lassen, wie bspw. dem Schwarmverhalten von Fischen oder Ameisen aus makroskopischer oder der Genregulation auf molekularer Ebene.

## Next Steps – Bereits erlangtes Wissen komprimieren und erweitern, um Biologie mit Technik zu verschmelzen

»Damit Biologie und Informatik sinnvoll zusammenarbeiten können, müssen biologische Prozesse noch besser quantitativ erfasst werden und die Informatik muss lernen, mit komplexen Daten zurechtzukommen.«  
(Prof. Dr. Ulrich Schurr, Institutsleiter Pflanzenwissenschaften, Forschungszentrum Jülich)

Auch im biologischen Teil einer Biologie-Technik-Schnittstelle ergaben sich aus den Projektergebnissen weitreichende Forschungsbedarfe. Vor allem in den Handlungsfeldern Synthetische Biologie und Systembiologie liegt ein großes Potenzial zur Generierung biointelligenter Schnittstellen. Forschungsansätze in der synthetischen Biologie bieten die Chance, zielgerichtet biologische Moleküle und Komponenten in technische Systeme zu integrieren und über eine Auswahl ausgewählter Funktionskomponenten die Komplexität in Biologie-Technik-Schnittstellen zu reduzieren und beherrschbar zu machen. Gleichzeitig erlauben systembiologische Ansätze ein besseres Verständnis sowie prädiktive Modelle der biologischen Prozesse und Wirkkomponenten und liefern gleichzeitig die Datengrundlage für neuartige Sensorkonzepte. Zur final angestrebten Kommunikationsbefähigung von technischen und biologischen Systemen wird die Datenauswertung und Algorithmik künftig stark an Bedeutung gewinnen. Die Weiterentwicklung neuronaler Netzwerke und selbstlernender Algorithmen wird hierbei von allen Branchenvertretern als besonders wichtig eingeschätzt. Gleichzeitig gilt es, biologische Prozesse durch eine breitere Datenbasis abzubilden, mit digitalen Abbildern zu untermauern und zu modellieren.

### 5.3.3 BIOHYBRIDE, BIOINSPIRIERTE PRODUKTIONSTECHNIK UND -ORGANISATION: STABILE, ADAPTIVE UND SELBST KONFIGURIERBARE PRODUKTIONSSYSTEME

»Es wird sich ein Wandel weg von der bisheriger Matrix-Organisation vieler Unternehmen, hin zu Organisationsformen ähnlich der eines Organismus vollziehen (bspw. Shared Leadership, Zelluläre Organisation, Schwarzmorganisation).«  
(Prof. Wilhelm Bauer, Institutsleiter Fraunhofer IAO)



Handlungsfeld  
Prod.-Technik u.  
Organisation  
Ausarbeitung  
(PDF-Dokument)

Kern der Biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung ist die Produktionstechnik und deren Organisation. Ohne nähere Betrachtung dieser Kernbereiche der Wertschöpfung ist eine signifikante Veränderung nicht umsetzbar. Wiederholt wurden in den Experteninterviews wie auch in den Gesprächen mit internationalen Industrievertretern die Potenziale für stabilere, schnell anpassbare und selbst konfigurierbare Produktionssysteme betont.

#### Autonome Sicherheit – Aufbruch in eine neue Entwicklungsstufe?

In der Produktionstechnik vom Prozess der Biologischen Transformation betroffen sind bspw. Aspekte der autonomen Sicherheit, die heute noch häufig einer Steuerung und Kontrolle durch den erfahrenen Menschen bzw. über komplexe technische Systeme bedürfen. Zukünftige bioadaptierte Systeme sollten Autonomie und Sicherheit auf eine neue Entwicklungsstufe bringen. Hier werden sowohl für die Ausrüsterindustrie als auch die Nutzer solcher Systeme langfristige Vorteile auf dem deutschen Markt gesehen.

## **Bioinspirierte Prozessoptimierung – Nutzung von bioinspirierten Algorithmen für technische und organisatorische Systeme**

Ein weiterer als hoch prioritär eingestufte Aspekt sind Optimierungslösungen, die auf bioinspirierten Algorithmen beruhen. Nicht zuletzt durch die Weiterentwicklung informations- und datentechnischer Systeme und deren Synthese mit den Produktionstechnologien werden zukünftig auch für komplexe Herausforderungen schnelle Optimierungszyklen ermöglicht. Einhellige Expertenmeinung war, dass die aktuellen Entwicklungen »cyber-physischer Prozesse« fortgesetzt und durch die Biologische Transformation in eine nächste Entwicklungsstufe überführt werden sollte. Als Beispiele hierzu wurden evolutionäre Algorithmen aus der Informatik, aber auch »Ameisenalgorithmen« (s. u.) bzw. Schwarmintelligenz genannt.

## **Prozesstransparenz und -planung – Effizienz durch digitale Zwillinge, Prädiktion und Ameisenalgorithmen**

Derzeit werden in ersten Entwicklungen in »digitalen Zwillingen« Echtzeitinformationen zu Produkten, Prozessen und Fertigungssystemen gewonnen und abgespeichert. Damit ist der digitale Zwilling das gleichzeitige Abbild der Planungsinformationen (Genotyp) und des jeweiligen Bauteilzustandes (Phänotyp). Diese Informationen werden in entsprechende Lebenshistorien angereichert. Dieser »Genpool« wird sich einerseits durch Simulationsergebnisse erweitern und andererseits unter Einsatz biologisch inspirierter Algorithmenzyklen optimieren lassen. Die Algorithmen orientieren sich dabei an vorhandenen Variationen und unter Berücksichtigung von Störgrößen aus der »Umwelt« (z. B. Prozess-, Werkzeug- oder Maschinenverhalten) an Fitnessbewertungen eines Individuums mit einem bestimmten Zielszenario (Biomarker). Aber auch aus der Verhaltensbiologie inspirierte Ansätze, wie beispielsweise die Schwarmintelligenz, sollen sich laut Expertenmeinung mit Unterstützung der Informationstechnik zukünftig in noch stärkerem Maße einsetzen lassen. Als Beispiel wurden Metaheuristiken für Verfahren der kombinatorischen Optimierung genannt. Sie basieren auf dem modellhaften Verhalten von Ameisen bei der Futtersuche und werden bereits bei der kombinatorischen Optimierung z. B. in Navigationssystemen oder zur logistischen Planung eingesetzt. Neu und zukunftsweisend wären nach Expertenmeinung Einsätze dieser Methodiken in der Produktion, z. B. zur Lösung von Maschinenbelegungsproblemen. Mit dem Ziel, die Produktion optimal auszulasten, d. h. die Belegungszeit zu maximieren, sollen Produktionsdaten (historische und Echtzeitdaten) für die Belegungsplanung herangezogen werden. Ameisenalgorithmen ermöglichen darüber hinaus kombinatorische, also zusätzliche Optimierungen, wie Kosten, Energieverbrauch oder Produktionsqualität. In Anlehnung an Schwarmintelligenz ist nach Expertenmeinung auch die Rückwärtsbetrachtung bei der Planung zur Maximierung der Kapazitätsauslastung ein kurzfristig wichtiges Handlungsfeld. Biologisch inspirierte Aktivitäten zur Minimierung von Leer-, Durchlauf-, oder Wartezeiten sowie Terminabweichungen und Verspätungen werden als kurzfristige Maßnahme zur Wahrnehmung des strategischen Themas in der Industrie erachtet. Insbesondere »quick wins« mit Anschluss an laufende Aktivitäten im Themenfeld Industrie 4.0 mit kapazitäts-, durchlaufzeit- und terminorientierten Zielen bieten hier eine gute Chance. Ein baldiger Einsatz in der Reihenfolgeplanung bzw. der belastungsorientierten Auftragsfreigabe wäre das Ergebnis, das als Schnittstelle zwischen Beschaffung und Produktion bzw. Produktion und Distribution neben hohem Optimierungspotenzial auch eindeutige Sichtbarkeit bieten würde. Laut Expertenmeinung werden sich die beispielhaft genannten schnellen und zuverlässigen Optimierungszyklen insbesondere positiv auf Produktionssysteme mit einer hohen Variantenvielfalt (z. B. durch die stets zunehmende kundenindividuelle Massenproduktion) auswirken, da sich die klassisch durchgängige Auslegung der Produktionsprozesse aufgrund der extremen Komplexität nur noch mit immensen Planungsaufwänden erreichen lassen.



## **Selbstanpassung – Resilienz in Produktionssystemen und -prozessen**

»Die Biologische Transformation hat das Potenzial, neue Konzepte zur Steigerung der Resilienz und Modularität hervorzubringen.«

*(Dr.-Ing. E.h. Manfred Wittenstein, Vorsitzender des Aufsichtsrats der WITTENSTEIN SE)*

Eine im Zusammenhang mit der Biologischen Transformation häufig genannte Forderung ist die nach der Selbstanpassung. Voraussetzung zur Selbstanpassung, also die Fähigkeit von Systemen, sich selbständig auf geänderte Anforderungen und Gegebenheiten einer Umwelt einzustellen, sind moderne Sensor- und Computertechniken, die es erlauben, Zustände von Prozessen und Fertigungssystemen sowie den zu fertigenden Werkstücken zu überwachen und Informationen zwischen verschiedenen Gliedern der Prozessketten auszutauschen. Ziel sollte eine autonome und robuste Adaption der Teilsysteme auf sich verändernde Bedingungen sein. Neben den klassischen werden hier intelligente Biosensoren und Biomarker zukünftig eine wichtige Rolle zur Überwachung von Betriebszuständen von Roh-, Betriebs- und Hilfsstoffen bis hin zu Produktions(teil)systemen spielen. Diese werden nicht nur eine schnelle und zuverlässige Überwachung gewährleisten, sondern auch in der Lage sein, gleichzeitig unterschiedliche Betriebszustände (physikalische, chemische Größen, Alterungszustände etc.) zu erfassen und zu kommunizieren. Hierdurch werden Schnittstellen entfallen, die Geschwindigkeit der Informationsaufnahme und -weitergabe wird steigen und die Komplexität (bzw. Ausfallkritikalität) wird drastisch sinken. Neue Steuerungsarchitekturen werden Self Recovery (Selbstheilung) ermöglichen. Ein nicht zu unterschätzender Teilaspekt ist nach Expertenmeinung die Ausstattung steuerungstechnischer Komponenten oder gar ganze Steuerungssysteme mit biointelligenten Komponenten. Durch die Ermöglichung eines »Self Recovery« ohne zuvor einprogrammierte Steuerungskreise sind signifikante Qualitäts- und Effizienzsteigerungen – nicht nur in der Robotik und Automation – zu erzielen.

## **Ressourcenschonung und Rohstoffeffizienz – Materialkreisläufe in der Produktion schließen**

Optimierungsmöglichkeiten für die Ressourcenschonung und Stoffeffizienz in der Produktion wurden in Gesprächen mit Vertretern aus Industrie und Verbänden bestätigt. Insbesondere die Steigerung von Materialausnutzungsgraden durch an die Biologie angelehnte Systeme (z. B. Leichtbau) und Konstruktionen (z. B. Oberflächenstrukturen), aber auch Wiedernutzungsmöglichkeiten von Werk- und Betriebsstoffen sowie Betriebsmitteln wird als prioritär erachtet. Mit der Biologie als Vorbild sollen Herausforderungen bei der Schließung von Stoffkreisläufen auch innerhalb von Produktionsstätten angegangen werden.

## **Next Steps – Interdisziplinäre Forschung zur Flexibilisierung der Produktion**

Forschungsthemen aus den Disziplinen Informationstechnik und Biologie sollten für Optimierungslösungen der Produktionstechnik stärker in Betracht gezogen werden, um die ermittelten Potenziale der Biologischen Transformation umsetzen zu können. Bioinspirierte Informationstechnik, wie »Ameisenalgorithmen« oder selbstlernenden Algorithmen (Künstliche Intelligenz) können stark zur Effizienz, Flexibilität und Adaptivität von Produktionsprozessen und -systemen beitragen, weshalb die interdisziplinäre Forschung in diesem Zusammenhang stärker gefördert werden sollte. Gleichzeitig sollte die Forschung in den Bereichen biotechnologischer Verfahren (Bioreaktoren, Bioraffinerien etc.) und biohybrider Produktionstechnologien intensiviert werden.



## ANWENDUNGSBEISPIEL 2

### Neue Konzepte des dezentralen Warentransports – Biointelligente Logistik

Warenströme werden sich durch die Biologische Transformation grundlegend verändern. Intelligente und dezentrale Regelungssysteme mit lernenden Algorithmen zur autonomen Steuerung einer steigenden Anzahl an kurzen Transportprozessen tragen zu einer nachhaltigen und verfügbarkeitsbasierten Logistik bei.

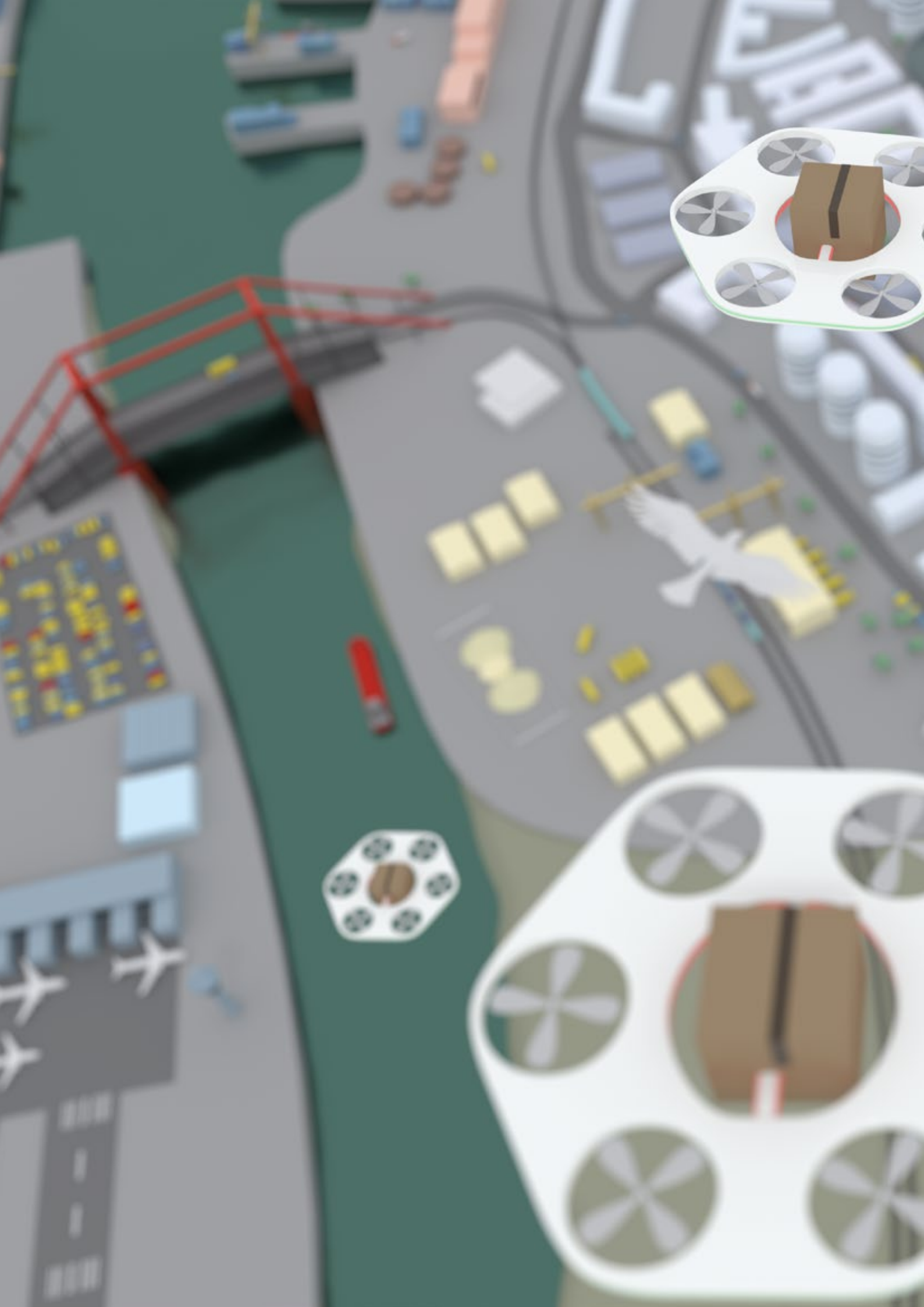
#### Heute

Technisch besteht durch die Digitalisierung zwar bereits heute die Möglichkeit, Warenströme umfänglich zu erfassen und zu steuern. Häufig wird diese jedoch nicht umgesetzt. Transportprozesse sind zu großen Teilen zentral gesteuert und wenig kompatible Konzepte und Intransparenz in der Logistik führen manchmal zu ineffizienten Prozessen, die unter hohem Aufwand von außen ausgeglichen werden müssen. Zentral geregelte Lieferketten und verschiedene technische Umsetzungsmöglichkeiten, die in gegenseitiger Konkurrenz stehen, hemmen die Umsetzung einer effizienten Logistik in vielen Fällen. Lange und unnötige Transportwege verbrauchen zudem zu viele Ressourcen.

#### Morgen

Die autonome Reorganisation von Transportaufträgen durch intelligente und kommunizierende Einheiten auf Basis von dezentral entscheidenden, neuronalen Netzen bzw. Blockchain-Technologien steigern die Effizienz der Logistikprozesse und führen zu einer schnelleren und verfügbarkeitsgerechten sowie ressourcenschonenden Form des Warentransports. Die kommunizierenden intelligenten Einheiten, die in der Lage sind, sich mitzuteilen und auf Mitteilungen zu reagieren, führen zu einem geregelten Zustand, der durch bioinspirierte übergeordnete Regelalgorithmen (z. B. Ameisenalgorithmen) aufrecht erhalten und ständig optimiert wird. Durch schnelle und dezentrale Kommunikationswege wird ein Großteil heutiger administrativer Aufwände wie klärende Telefonate oder Zählprozesse entfallen. Damit einhergehend werden Reorganisationsprozesse wie Umräumungen autonom erfolgen und müssen nicht manuell geplant werden. Die Wertschöpfungsnetze werden dadurch flexibler und passen sich auf Markt- und Produktanforderungen dynamisch und eigenständig an. Fahrzeuge werden sich in Schwärmen zusammenfinden und in agil gebildeten Kolonnen Transporte erledigen (Platooning). Die Komplexität der Entscheidungsfindung für solche Prozesse wird mit neuronalen Netzen reduziert, wodurch selbstlernende Wertschöpfungsketten entstehen. Die Wertschöpfung ist vollständig dezentral organisiert, wodurch auch kleinste Transportmengen nach dem Crowd-Transportation-Ansatz ermöglicht werden. Dabei erfolgt der Transport einzelner Pakete durch Privatpersonen oder den ÖPNV, wodurch der Transport schneller, günstiger und ökologisch verträglich werden wird.

**Beispiele aus der Praxis:** Bereits heute arbeitet das Züricher Tech-Startup modum an Verbesserungen der Wertschöpfungsketten und Logistik von Unternehmen mit einer Kombination aus Blockchain und Internet of Things ([www.modum.io](http://www.modum.io)). Auch das Artificial Life Lab des Instituts für Zoologie der Karl-Franzens-Universität Graz arbeitet an einem Übertrag des Verhaltens von Bienen auf Roboter zu deren Effizienzsteigerung ([www.uni-graz.at](http://www.uni-graz.at)).





### 5.3.4 MENSCHZENTRIERTE ARBEITSPLATZGESTALTUNG: EFFIZIENTE MENSCH-MASCHINE-KOLLABORATIONEN UND DEREN RAHMENBEDINGUNGEN



Handlungsfeld  
Arbeitsplatz-  
gestaltung  
(PDF-Dokument)

Die Biologische Transformation muss einen gesellschaftlichen Nutzen haben und zur Verbesserung der Lebenssituation der Menschen beitragen, insbesondere von benachteiligten Gruppen. Wenn sich im Bereich der Medizin neue Möglichkeiten ergeben, die der breiten Bevölkerung zur Verfügung stehen, dann ist das eine gute Sache. Die Arbeitswelt sollte sich so verändern, dass auch Menschen einen Zugang finden, die auf dem ersten Arbeitsmarkt Schwierigkeiten haben, z. B. Menschen mit Behinderung oder Arbeitslose.«  
(Alissa Schreiber, Referentin für Sozial- und Kommunalpolitik, Sozialverband VdK Nordrhein-Westfalen e.V.)

Die menschenzentrierte Arbeitsplatzgestaltung wird im Zuge einer Biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung von hoher Wichtigkeit sein. Schon heute sind erste Ergebnisse des Zusammenspiels von Biotechnologie und Informationstechnologie im Kontext der menschlichen Arbeit erkennbar. So erfassen bspw. intelligente Armbänder die Bewegungen von operativen Prozessen in Produktion und Logistik und erlauben damit Rückschlüsse auf die Belastung der Mitarbeiter. Die besondere Art der Biologie-Technik-Schnittstelle wird in diesem Handlungsfeld aufgrund ihrer Relevanz für Wertschöpfungsprozesse und ihrer vielseitigen Forschungs- und Gestaltungsfelder gesondert betrachtet. Gleichzeitig verspricht die Forschung auf diesem Gebiet eine Verbesserung der Arbeitsbedingungen für verschiedenste Berufsbilder.

#### **Biointelligente Assistenzsysteme – Adaptiv, anthropometrisch und dermatologisch verträglich**

Eine biologisch transformierte Wertschöpfung geht den Auswertungen der Workshops zufolge mit einer zunächst erhöhten Komplexität für die Mitarbeiter einher, die durch umfassende Weiterbildungsangebote sowie Um- und Neustrukturierungen des Tätigkeitsbereichs am Arbeitsplatz abgedeckt werden muss. Selbstlernansätze und Incentivierungen können hierbei hilfreiche Ansätze darstellen. Im Bereich der Forschungsfelder sind adaptive, anthropometrisch kompatible und dermatologisch verträgliche, tragbare Assistenzsysteme (»anthropokompatible Wearables«) von hohem Interesse, die bis hin zu einer biokompatiblen Mensch-Maschine-Schnittstelle reichen. Hierbei geht es insbesondere um die (automatische) Anpassung von tragbaren Assistenzsystemen an personenspezifische, morphologische Parameter und die kinematische Kompatibilität mit dem menschlichen Körper. Ebenso entsteht ein Bedarf nach anthropometrischer Aktorik, was bspw. Soft-Aktorik und künstliche Muskeln umfasst.

#### **Biosignale – Grundlage für eine bedarfsgerechte Anpassung von Arbeitsprozessen**

Hohen Forschungsbedarf hat die Erfassung und Interpretation menschlicher Biosignale. Hierbei stehen insbesondere robuste, nicht-invasive Messungen von Muskelaktivitäten (z. B. Elektromyografie: HD-EMG, Textile sEMG, Soft-Elektroden), mentale Aktivitäten (z. B. EEG, fNIRS, eye-tracking) sowie die Aufnahme des mentalen und physischen Zustandes von Personen mithilfe technischer Emotions- und Absichtserkennung, EMG-gestützter Modellierung und EKGs im Fokus. In diesem Zusammenhang ist die Entwicklung technisch unterstützter Emotions- und Mimikerkennung von zentraler Bedeutung. Als potenzielles Forschungsfeld ist zukünftig außerdem die Erforschung neurorobotischer Bausteine und deren Potenzialbewertung in der Wertschöpfung anzusehen.

Im Forschungsbereich zur Entwicklung adaptiver Assistenzsysteme ist ein weiteres Thema die immersive, multimodale Rückkopplung, bspw. Augmented Reality / Assisted Reality. Aufgrund der steigenden Komplexität manueller Montage- und Manipulationstätigkeiten im Kontext zunehmend wandelbarer Fertigungsumgebungen, wird eine ausschließlich optisch-visuelle oder auditive Rückkopplung (durch industrieübliche LCD-Monitore bis hin zu VR- und AR-HMDs) zur Informationsübertragung an Werker als nicht hinreichend bis hin zu





kritisch belastend angesehen. Eine kontextsensitive und zugleich bedarfsgerechte Aufteilung der sensorischen Informationsaufbereitung und -darstellung eröffnet die Perspektive, Mitarbeiter durch einen zustandsabhängigen »Rückkopplungsmix« adaptiv zu stimulieren und dadurch eine Informationsüberflutung und kognitive Überfrachtung zu vermeiden. Hierbei ist ein quasi-symbiotisches Zustandsverständnis zugrunde zu legen, welches sowohl den physiologisch-kognitiven Zustand des Mitarbeiters als auch den Zustand des technischen Systems berücksichtigt und bezüglich des Aufgabenszenarios als Einheit betrachtet. Haptische Rückkopplungsmodalitäten bieten hier in Kombination mit optischen und akustischen Pfaden die Möglichkeit einer besseren Verteilung sowie die Verwertung erfahrungsbasierten Wissens, z. B. indem Abweichungen vom Sollprozess »spürbar« werden – analog zum »Hören« von Fehlfunktionen oder sich anbahnender Ausfälle durch erfahrene Maschinenbediener.

Im Zuge einer menschenzentrierten Arbeitsplatzgestaltung sind auch Themen im Bereich der Personalisierung des eigenen Arbeitsplatzes von großer Bedeutung. Forschungsthemen umfassen die Optimierung des Arbeitsplatzes im Hinblick auf das individuelle Bewegungsverhalten der Arbeitnehmer sowie die Echtzeit-Evaluation von Arbeitsbewegungen. Daraus ergeben sich neue Möglichkeiten zur individuellen Festlegung von Arbeits- und Pausenzeiten, dynamisch gesteuert nach den jeweiligen Bedürfnissen des Individuums. Hiermit kann der persönliche Biorhythmus, der die Produktivität und das Wohlbefinden der Mitarbeiter wesentlich beeinflusst, berücksichtigt werden und zur Optimierung von Bewegungen im Hinblick auf Ergonomie und Prozessgeschwindigkeit genutzt werden.

Als weiteres Forschungsthema kann die intelligente Adaption der Umgebungs- und Umwelteinflüsse am Arbeitsplatz identifiziert werden. Sie ermöglicht die optimale Anpassung der Arbeitsumgebung an den Arbeit-

## ● Vision und Empfehlung

nehmer und kann durch smarte Assistenzsysteme, die zur Filterung von Information und Kommunikation bis hin zur Organisation von Aufgaben dienen, ergänzt werden.

Darüber hinaus könnten Forschungsfragen im Bereich eines personalisierten Feedbacks zu individuell abgeleiteten Ausgleichsbewegungen unter Berücksichtigung physiologischer, sport- und trainingswissenschaftlichen Prinzipien interessant sein. Ziel der Forschungsaktivitäten könnte ein individueller, interaktiver, virtueller Ergonomie- und Gesundheitscoach sein. Gleichzeitig zeigen Studien, dass sich Mitarbeiter durch die Möglichkeit der Individualisierung des Arbeitsplatzes stärker mit ihrem Arbeitgeber identifizieren. Dadurch kann bspw. eine stärkere Mitarbeiterbindung und -zufriedenheit erzielt werden und dadurch die kreative Anteilnahme der Arbeitnehmer am Unternehmen gefördert werden.

There has to be far more intimate interaction between biology and technology and more direct interfacing. [...] Soon we will be monitoring everything to know our status and have feedback to each individual and each clinician [...] There will be a whole industry of assisted devices. Soon there will be more effective and cheaper wearables. [...] we might soon declare movement and normal function to be a civil right."

*(Prof. Robert J. Full, Center for Interdisciplinary Biological Inspiration in Education and Research (CIBER), UC Berkeley)*

### **Soziale Vernetzung und prädiktive Ergonomie – Grundlagen zukünftiger Arbeitsplätze**

Die Basis für einen personalisierbaren Arbeitsplatz sind theoretische Grundlagen im Bereich der prädiktiven Ergonomie, im Besonderen durch die Erarbeitung von individualisierbaren, physiologischen Belastungsparametern und -grenzen. Zudem bedarf es der Entwicklung prädiktiver, ggfs. modellgestützter Algorithmen zur Vorhersage von Muskel-Skelett-Belastungen und -erkrankungen sowie der Erarbeitung von Datenstrukturen zur Erfassung biomechanischer Ergonomiedaten, um eine effektive Verarbeitung durch die prädiktiven Algorithmen zu ermöglichen.

Ein Wertschöpfungsnetzwerk, in dem Mensch und Maschine zusammenarbeiten, bedarf darüber hinaus einer Kommunikationsplattform, über die Statusinformationen und Nachrichten von allen beteiligten Akteuren gleichberechtigt kommuniziert werden können. In diesem Bereich liegt ein Forschungsfokus auf der Entwicklung von Schnittstellen und Plattformen eines sozial vernetzten Wertschöpfungsnetzwerks (»Social Networked Industry«), in denen Mensch und Maschine gleichermaßen Berücksichtigung finden. Dies ermöglicht ein besseres Verständnis der Menschen für die komplexen automatisierten Abläufe und fördert somit die Akzeptanz bei den Arbeitnehmern.

Weitere Forschungsaktivitäten sind im Bereich der Schnittstellentechnologien notwendig, unter anderem in den Themenfeldern Brain-Machine-Interface und AR-Technologien, um eine natürliche Kommunikation und eine kontextsensitive Informationsbereitstellung zu ermöglichen.

### **Arbeitsplatzsicherung – Integration von Assistenzsystemen und Weiterbildungsangebote im Kontext biointelligenter Systeme**

Ein weiteres Gestaltungsfeld liegt darin, Arbeitsplätze auch in einer biologisch transformierten Wertschöpfung zu sichern und dies auch zukünftig zu gewährleisten. Hierzu müssen Bildungsmaßnahmen ergriffen werden, welche Arbeitnehmer dazu befähigen, mit adaptiven Assistenzsystemen umzugehen und so aktiver Teil einer wandelbaren Fabrik der Zukunft zu werden. Wandelbarkeit bedeutet in diesem Kontext auch die Konzepte des ständigen Lernens und die Veränderung des Anforderungsprofils bzw. des Berufes über das Berufsleben.

Darüber hinaus ist es von hoher Bedeutung, Menschen in einem biologisch transformierten Umfeld mit umfangreichen Aus- und Weiterbildungsangeboten hinsichtlich biologischer Systeme zu unterstützen. Insbesondere Fragen der Arbeitssoziologie und -psychologie werden in diesem Zusammenhang zunehmend wichtiger. Durch die möglicherweise mit biologischen Systemen einhergehenden Gefahren bedarf es intensiver Schulungen der in diesem Kontext eingesetzten Mitarbeiter, um einen gewissenhaften Umgang und eine sichere Arbeit zu gewährleisten.

Des Weiteren muss gewährleistet werden, dass die physische Unterstützung durch Assistenzsysteme bedarfsgerecht und für den Arbeitnehmer transparent erfolgt (z. B. auf Basis EMG-gestützter Regelung). In ihrer Leistung eingeschränkte Mitarbeiter könnten von einer vereinfachten Kostenübernahme von Assistenzsystemen als Wiedereingliederungshilfe profitieren. Hierzu müssten Richtlinien und Hilfsmittelklassifikationen durch staatliche und private Kostenträger (BGs, Krankenkassen, etc.) entwickelt werden.

### **Entlastung durch Technik – Biointelligenz und Ergonomie**

Von hohem Interesse ist in diesem Themenfeld eine Veränderung bzw. Umwandlung der Arbeitsplatzgestaltung, die Aspekte der Ergonomie und Produktivität gleichermaßen berücksichtigt. Eine wichtige Rolle spielt darüber hinaus die Unabhängigkeit der Arbeit vom Sitz des Unternehmens. Außerdem müssen Richtlinien und Empfehlungen für die Zusammenarbeit von Menschen und Assistenzsystemen (z. B. Exoskelette) erarbeitet und erstellt werden. Regulatorische Aspekte im Zusammenhang mit (semi-)autonomen Assistenzsystemen müssen präzisiert und vereinfacht werden. Ein wichtiger Aspekt ist zudem die Bildung von Anreizen für die Einführung neuer Schlüsseltechnologien, welche die Ergonomie sowie die Arbeitsbedingungen der Mitarbeiter verbessern, sowohl auf Unternehmens- als auch auf Mitarbeiterenebene. Denkbar wäre hier unter anderem eine staatliche Förderung. Darüber hinaus muss die Gesellschaft für die negativen gesellschaftlichen und ökonomischen Folgen von Muskel-Skelett-Erkrankungen sensibilisiert werden.

Im Rahmen einer menschenzentrierten Arbeitsplatzgestaltung sind auch Fragen hinsichtlich der Arbeitsorganisation von hoher Relevanz, z. B. die Flexibilisierung von Arbeitszeiten sowie der Arbeitsplätze, um die Work-Life-Balance zu verbessern. Dies muss durch juristische Grundlagen ergänzt werden, z. B. neue Regelungen in Betriebsvereinbarungen, Tarifverträgen etc.

### **Next steps – Wie lässt sich der Datenaustausch zwischen Mensch und Maschine sicher gestalten?**

»Adaptive Systeme mit Fähigkeiten ähnlich denen des Menschen (intelligent, kognitiv, lernend und empathisch) werden im Zuge der Biologischen Transformation entstehen und zu Agilität und Ambidextrie in der Unternehmensorganisation führen.«

*(Prof. Wilhelm Bauer, Institutsleiter Fraunhofer IAO)*

Zunächst muss die Erfassung und Interpretation menschlicher Biosignale verbessert werden und die Entwicklung adaptiver Assistenzsysteme sowie die ergonomisch-adaptive und prädiktive Arbeitsplatzgestaltung auf Basis der Mensch-Maschine-Interaktion vorangetrieben werden. Für diese besondere Form der Biologie-Technik-Schnittstellen, die sich bei Interaktionen zwischen Menschen und Maschinen ergeben, sind, neben den im Handlungsfeld »Biologie-Technik-Schnittstellen« beschriebenen technischen Herausforderungen, sowohl für die Industrie als auch die Politik, Fragen bzgl. der Sicherheit personenbezogener Daten von besonderer Bedeutung. Es muss gewährleistet werden, dass die durch neue Erfassungsmethoden entstehenden neuen Datentypen (z. B. menschliche Biosignale, mentaler und physischer Zustand) vor unbefugtem Zugriff und Missbrauch geschützt werden. Es bedarf praktikabler Datenschutzrichtlinien und Anonymisierungsstandards für die Ver-

arbeitung sensibler Kognitions- und Vitaldaten im Kontext vernetzter und wandelbarer Wertschöpfungsverbünde. Eine große Herausforderung ist in diesem Kontext der Umgang mit der oft mangelnden Akzeptanz der datenspeichernden und datenverarbeitenden Assistenzsysteme.

### ANWENDUNGSBEISPIEL 3

#### Neue Formen der Zusammenarbeit zwischen Menschen und Maschinen

Die Biologie und die Technik befinden sich in einem Prozess der gegenseitigen Integration. Auch der menschliche Körper kann als biologische Komponente verstanden werden, die mehr und mehr intuitiv in technische und informatorische Prozesse eingreift. Diese Art der Interaktion zwischen den beiden Sphären Biologie (Mensch) und Technik wird sich im Zuge der Biologischen Transformation verändern. Mit der Schaffung einer effizienteren Vernetzung und Erschließung von Schnittstellen zum wechselseitigen und intelligent geregelten Informationsaustausch hat die Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion großes Potenzial zu weitreichenden Veränderungen.

#### Heute

Die Digitalisierung ermöglicht bereits heute eine Kommunikation zwischen Mensch und Technik und die Vernetzung bzw. Verschmelzung der digitalen mit der realen Welt hat bereits begonnen. Künstliche Intelligenzen amerikanischer Großunternehmen erobern die Haushalte, auch in Deutschland. Virtual- und Augmented-Reality-Anwendungen finden vermehrt Einzug in Konsumprodukte (Smartphones, Smart Homes, Smart Grids) und Produktionsprozesse. Obwohl man sich Entlastung durch die aufkommenden Technologien verspricht, sind sowohl physische als auch psychische Belastungen aufgrund der steigenden Komplexität, dem Informationsüberschuss und steigenden Anforderungen in Arbeitsprozessen wahrscheinlich.

#### Morgen

Eine intuitive Zusammenarbeit zwischen Mensch und Technik führt zu Erleichterungen im Arbeitsalltag. Einerseits wird dies durch Fortschritte in den Sensortechnologien erreicht, die eine robuste und nicht-invasive Erfassung von menschlichen Biosignalen ermöglicht. Andererseits führen sogenannte »Wearable Devices« und deren Integration in Textilien und Maschinen zu einer physiologisch belastungsgerechten Arbeit. Auch geistige Arbeit wird durch einen intuitiveren Informationsaustausch zwischen Mensch und technischem System erleichtert, was zu einer merklichen mentalen Entlastung und Effizienz führt. Durch die Integration bzw. Zusammenführung aller Akteure eines Wertschöpfungssystems in ein intuitiv funktionierendes »Habitat« entsteht eine biointelligente Arbeitsumgebung, in der Mensch und Maschine effizient zusammenarbeiten. Innerhalb dieser Umgebung wird eine vollständig dezentrale Entscheidungsfindung und Steuerung der Prozessabläufe umgesetzt, die losgelöst von Produkt oder Branche robust und resilient funktioniert.

**Beispiele aus der Praxis:** Bereits heute befindet sich das Exoskelett Cray X von German Bionic auf dem Markt und verringert beim Heben schwerer Lasten die körperliche Belastung ([www.germanbionic.de](http://www.germanbionic.de)). Auch die Messung und Interpretation von Gehirnaktivitäten, z. B. zur Erkennung von kognitiver Auslastung von Personen, ist bereits technisch möglich ([www.dfki.de](http://www.dfki.de)).





### 5.3.5 BIOINSPIRIERTE, BIOBASIERTE DATENVERARBEITUNG: BEDEUTENDER ENABLER DER BIOLOGISCHEN TRANSFORMATION

Datenverarbeitung ist aus technologischer Sicht eines der bedeutendsten Handlungsfelder für die Umsetzung der Biologischen Transformation. Die Digitalisierung wird als die wichtigste Grundvoraussetzung zur Realisierung biointelligenter Systeme gesehen. In diesem Themenfeld wurden dabei sowohl neue Algorithmen und Kommunikationsmechanismen mit Vorbild in der Biologie (»Software«) als auch visionäre Ansätze einer Datenspeicherung und -verarbeitung mittels biologischer Strukturen (»Hardware«) gesehen. Bereits heute sind Informationstechnologien wichtige Treiber in der biologischen Forschung und Entwicklung.



Handlungsfeld  
Datenverarbeitung  
Ausarbeitung  
(PDF-Dokument)

#### Die Digitale und die Biologische Transformation – Ein intelligentes Wechselspiel

Datenverarbeitung und Informationstechnologie sind die Grundlage der transdisziplinären Forschung und Entwicklung biointelligenter Wertschöpfungssysteme. Das Grundgerüst für die Datenverarbeitung ist eine durchgehende Digitalisierung von biologischen und technischen Systemen. Dazu gehören sowohl die Erfassung als auch die Vernetzung von Material-, Produkt- und Prozessinformationen in der Produktion und während der Produktnutzung bzw. über den gesamten Lebenszyklus. Die informationstechnische Vernetzung ist das große Thema in der Digitalisierung der industriellen Wertschöpfung und im Handlungsfeld Biologie-Technik-Schnittstelle. Beide schaffen die technischen Voraussetzungen für die Datenverarbeitung in der Biologischen Transformation und sind mit entsprechendem Nachdruck voranzutreiben. Es entsteht eine große Menge und Breite an Informationen, die einen tieferen Einblick in die Einflüsse und Wechselwirkungen zwischen Biologie und

## ● Vision und Empfehlung

Technik geben. Damit können Produkte oder Systeme in ihrem Zusammenhang analysiert werden und analog zu einem Subjekt, das Einflüssen in der Umwelt ausgesetzt ist und darauf reagiert, gesehen werden. Erst dadurch sind die technischen Voraussetzungen geschaffen, Systeme zu entwickeln, die Eigenschaften haben oder entwickeln, die typischerweise mit lebenden Systemen aus der Biologie verbunden werden: Wachstum, Entwicklung, Reizbarkeit, Austausch mit der Umgebung usw.

### **Komplexitätsbewältigung und Schaffung von biologisch-technischen Gleichgewichten – Eine der größten Herausforderungen der Biologischen Transformation**

Die Modellierung und Simulation von biologischen Prozessen und Systemen muss angesichts der unübersehbaren Komplexität parallel zur klassischen biologischen und Ökosystemforschung vorangetrieben werden. Durch eine zunehmende Sensorisierung von Produktionsabläufen, aber auch von Produkten entstehen technologische »Ökosysteme«, die im Gleichgewicht gehalten werden müssen. Ein biointelligentes Systemdesign nutzt Prinzipien der Natur für die Gestaltung und Steuerung solcher Gleichgewichte. Im Produktionskontext wird das in kognitiven Maschinen und Prozessen realisiert, die miteinander kommunizieren und sich selbst optimieren bzw. an Veränderungen anpassen.

### **Bioinspirierte Datenverarbeitung – Verbindung von Mensch, Technik und Produktion**

Durch neue Mensch-Maschine-Schnittstellen wird auch der Mensch in digitale, technische Ökosysteme einbezogen. Es wird deutlich, dass für die Forschung in diesem Bereich starke Interdisziplinarität erforderlich ist – eine Aufgabe und Herausforderung, der sich die klassischen, in abgetrennten Domänen agierenden Wissenschaften stellen müssen. Effektive und dezentrale Kommunikations- und Steuerungsmechanismen sind in solchen technischen Ökosystemen notwendig. Dieses Forschungsfeld wird heute dominiert von der Entwicklung Künstlicher Intelligenz. Ansätze wie Neuronale Netze oder Evolutionäre Algorithmen haben heute jedoch die Biologie im Wesentlichen nur im Namen. In der technologischen Anwendung werden größtenteils Algorithmen verwendet, die auf gefundenen abstrakten mathematischen Prinzipien basieren und nicht auf biologischen Vorbildern oder Analogien. Für ein ausreichendes Verständnis und damit eine technologische Umsetzung und Nutzung der Prinzipien der Informationsverarbeitung im Gehirn oder die Anwendung von Optimierungsprinzipien der Evolution müssen noch große Forschungsanstrengungen unternommen werden. Eine Stärkung der Verfahren und Techniken, die die besonderen kognitiven Fähigkeiten des Menschen nachahmen sollen, gilt als vielversprechend, z. B. Maschinelles Lernen, insbesondere Deep Learning. Diese Lernverfahren oder unüberwachtes sowie bestärkendes Lernen müssen entsprechend weiterentwickelt werden. Die Entwicklung und Anwendung bioinspirierter Algorithmen ist dabei kein rein von der Informatik getriebenes Forschungsfeld, sondern stark interdisziplinär. Das Einbringen von Domänenwissen ist für intelligente Algorithmen und das Systemdesign essentiell. Die Datenverarbeitung muss daher in allen Wissenschaftsbereichen ein integraler Bestandteil werden, um in den Domänen eine systemische Vernetzung zu ermöglichen. Das ist sowohl durch entsprechende Ausbildungsinhalte als auch durch Schwerpunktsetzungen in der Forschungsagenda zu realisieren.

### **Datenspeicherung, Datenstrukturen und Datensicherheit – Hohes disruptives Potenzial durch biobasierte Technologien**

Die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe in den Themenfeldern Datenspeicherung, Datenstrukturen und Datensicherheit sind nicht ursprünglich in der Biologischen Transformation begründet, aber aufgrund der großen Datenmengen und komplexen Verknüpfungen in Systemen sind sie von großer praktischer Bedeutung für ihre Umsetzung. Die Themen Datensicherheit, insbesondere auch Distributed Ledger Technologien (auch unter Blockchain bekannt) sind hochrelevant für Systeme, die sich biologische Systeme nutzbar machen oder Schnittstellen zum Menschen aufweisen. Von sehr praktischer Bedeutung ist die Entwicklung von Datenstruk-

turen auf Basis von Ontologien, die eine nachhaltige Datennutzung und Verarbeitung über Domänengrenzen hinweg ermöglichen. Erst damit kann der Aufwand für eine langfristige Datenspeicherung gerechtfertigt werden. Bioelektronik oder Biocomputing wurden im Zusammenhang mit dem Thema Datenverarbeitung ebenfalls genannt. Bioinspirierte oder biobasierte Hardware sind auf Molekülen basierende Systeme, deren Entwicklung sich derzeit noch in der Anfangsphase befindet. Sie sind theoretisch zu extrem hohen Rechenleistungen in der Lage. Neuronale Chips, DNA-Computing, programmierbare Zellnetzwerke etc. haben intensiven Forschungs- und Entwicklungsbedarf an den Schnittstellen, z. B. beim Auslesen von Informationen. Es ist ein Forschungsfeld, das disruptive Innovationen hervorbringen kann.

### **Next Steps – Infrastrukturbildung, Rahmenbedingungen schaffen, ethische Fragestellungen beantworten und die Digitalisierung vorantreiben**

Für Politik und Industrie ergibt sich eine Vielzahl von Gestaltungsthemen, die zwar für die Biologische Transformation von Bedeutung sind, aber größtenteils heute bereits durch andere Bereiche getrieben werden. Der weitere Ausbau der informationstechnischen Infrastruktur ist Voraussetzung für eine weitreichende informationstechnische Vernetzung in der Industrie und die Priorisierung muss aufrechterhalten werden. Datenschutz, Datentransparenz und Standards in der Datenverarbeitung sind regulatorische Aufgaben, die schneller und im Takt mit den fortschreitenden Entwicklungen erledigt werden müssen. Dies bezieht sich auf integrierte personenbezogene Daten und Daten von übergeordnetem Interesse, z. B. bei veränderten Organismen. Dies gilt gleichermaßen auch für Daten, die mit Künstlicher Intelligenz erzeugt werden. Ethische Fragestellungen müssen beantwortet werden, bspw. wie algorithmenbasierte Entscheidungen getroffen werden und welche Verantwortlichkeiten daraus resultieren. Das bezieht sich auch auf moralische Fragen zur Einsetzbarkeit von Künstlicher Intelligenz. Auf die Industrie kommt mit der Biologischen Transformation die Herausforderung zu, Prozesse und Systeme durch entsprechende Auslegungen biointelligent und nachhaltig zu gestalten, z. B. durch eine Vernetzung und Steuerung der betrieblichen Abläufe mit entsprechenden Algorithmen. Das ergibt neue Indikatoren für Prozesse, die sich heute einer einfachen betriebswirtschaftlichen Rechnung noch entziehen. Die informationstechnische Vernetzung von Prozessen und Maschinen, die durch die Transformation im Zug von Industrie 4.0 bereits gestartet ist, muss umfänglich weitergetrieben werden. Die nächsten Schritte sind die Integration von biologischen Modellen und biostatistischen Verfahren mit klassischen betriebswirtschaftlichen und mechanistischen bzw. prädiktiven Modellen (hybrider Ansatz), die eine verständliche algorithmenbasierte Entscheidungsunterstützung, Prozesssteuerung oder Lebensdaueranalyse ermöglicht.

### **5.3.6 ENERGIE: DIE BIOLOGIE ALS VORBILD INDUSTRIELLER ENERGIEVERSORGUNG UND -SPEICHERUNG**

Eine wesentliche Grundvoraussetzung wettbewerbsfähiger industrieller Wertschöpfung ist eine gesicherte Versorgung der Prozesse mit Energie. Der intensive Verbrauch fossiler Rohstoffe zur Energiebereitstellung trägt jedoch maßgeblich zum Klimawandel durch CO<sub>2</sub> und weitere Treibhausgase bei. Eine effiziente und flexible Versorgung der industriellen Prozesse mit Energie steht daher in einem direkten Zusammenhang mit der notwendigen Reduzierung der Umweltbelastung. Sie kann im Handlungsfeld Energieerzeugung und -speicherung erreicht werden, indem auf Prinzipien, die in der Natur etabliert sind oder auf ganze Organismen zurückgegriffen wird.



Handlungsfeld  
Energie  
Ausarbeitung  
(PDF-Dokument)

#### **Flexibilität durch chemische Energieträger als gemeinsame Speicherwährung**

Die wesentlichen Energieträger, die in der Biologie von den Pflanzen durch Photosynthese aus Sonnenenergie zur Verfügung gestellt werden, sind die Stoffklassen der Kohlenhydrate und Fette. Es gibt also in der Biologie, ähnlich wie es sich in der technischen Welt herausgebildet hat, gemeinsame Währungen für Energie. Dieses

## ● Vision und Empfehlung

Prinzip der Nutzung einer Basisenergieform hat sich in der Industrie mit dem elektrischen Strom bereits zu großen Teilen etabliert. Lediglich für mobile Energieträger werden größtenteils fossile Brennstoffe direkt eingesetzt, da die Energiedichte hier eine entscheidende Rolle spielt und andere Energiespeicher in vielen Fällen noch keine wirtschaftliche Alternative darstellen. Elektrische Energie eignet sich zudem gut, um diese aus regenerativen Quellen zu gewinnen. Energie fließt industriellen Prozessen daher auch in naher Zukunft zu einem großen Anteil in Form von elektrischem Strom zu. Kurzfristig gesehen wird elektrische Energie also die wichtigste Währung bleiben und hat im Handlungsfeld Energieerzeugung und -speicherung daher eine hohe Relevanz. Die Speicherung von elektrischem Strom ist dabei nach Ansicht der befragten Experten eine der größten Herausforderungen, an der die Biologische Transformation angreifen sollte. Chemische Energieträger, wie sie in der Natur etabliert sind, können zur Bewältigung dieser Herausforderung einen wichtigen Beitrag leisten. Vor allem E-Fuels/Synfuels wie bspw. Wasserstoff, die mittels elektrischer Energie in sog. Power-to-X-Prozessen erzeugt werden können, sind hoch relevant. Neben einer hohen Energiedichte für Mobilitäts-Anwendungen und der Nutzbarkeit elektrischer Energie zu deren Herstellung besitzen E-Fuels/Synfuels weitere Vorteile. Durch Kraft-Wärme-Kopplung kann beispielsweise zusätzlich zur Rückgewinnung elektrischer Energie auch thermische Energie bereitgestellt werden. Für die im Vergleich zum Strom-Sektor langsamer voranschreitende Energiewende in den Sektoren Wärme und Mobilität haben chemische Energieträger (E-Fuels/Synfuels) daher großes Potenzial.

### **Die Natur als systemisches Vorbild für industrielle Energieerzeugung- und Speicherung**

Um Anleihen aus der Natur für die industrielle Energieversorgung zu übernehmen, die schrittweise in der gegenwärtigen Wertschöpfung umgesetzt werden können, bedarf es intensiver Abstraktion und Transfers. Energie wird in der Natur initial im Wesentlichen durch Pflanzen und ihren photosynthetischen Aufbau (Anabolismus) von Stoffen, die auf einem energetisch höheren Niveau liegen, in das Ökosystem eingebracht. Ein weiteres etabliertes Prinzip der Biologie ist eine sinnvolle Kopplung der stofflichen und energetischen Nutzung dieser Stoffe in den darauffolgenden natürlichen Prozesskaskaden. Gekoppelte Energieströme finden sich in der Industrie zwar bereits heute unter dem Stichwort Sektorkopplung wieder, die Herstellung von Grundstoffen und Materialien sowie die Energieerzeugung erfolgt im Gegensatz zur Natur jedoch meist getrennt voneinander. In einem Energiesystem der Zukunft wird nach dem natürlichen Vorbild die intelligente Verknüpfung von stofflichen und energetischen Prozessen eine zunehmend wichtige Rolle spielen. Dieses Prinzip setzen beispielsweise Bioraffinerien um, indem Nahrungs- und Futtermittel, sowie Grund- und Feinchemikalien als Produkte aus biogenem Material erzeugt werden können. Viele Bioraffinerien sind energieautarke Einheiten, die die benötigte Energie direkt aus dem zu verarbeitenden Biomaterial beziehen. Die erzeugten Stoffe, wie beispielsweise biobasierte Kunststoffe können zudem nach der stofflichen Nutzungsphase energetisch verwertet werden. Es können aber auch Kraftstoffe direkt als Produkte aus biogenem Material erzeugt werden. Bioraffinerien haben großes Potenzial, insbesondere die möglichst vollständige Verwertung biobasierter Roh- und Reststoffe zu ermöglichen und mittels flüssiger oder gasförmiger organischer Energieträger zur regenerativen Energiebereitstellung beizutragen. Biologische Prinzipien, wie beispielsweise neuronale Netze zur Flexibilisierung von Energieversorgungssystemen (Smart-Grids), evolutionäre Algorithmen zur Optimierung von Organismen, die beispielsweise zur Synthese von synthetischen Kraftstoffen verwendet werden können oder Verfahren der künstlichen Photosynthese, die die Energie direkt von der Sonne beziehen, könnten ebenfalls zu großen Fortschritten im Bereich der Energieflexibilität und -effizienz führen.

»Die bioinspirierte Energiespeicherung besitzt enormes Potenzial im Vergleich zu konventioneller Speicherung. Die Unterteilung in kurzfristige (ATP) und langfristige (Fett) Speicherung und deren Zusammenspiel ist bspw. ein Prinzip, das in der Natur viel besser funktioniert als bisher in der technischen Umsetzung.«

*(Prof. Dr. Ernst Ulrich von Weizsäcker, Ko-Präsident Club of Rome)*

## **Integration und Interaktion im Handlungsfeld Energie – Synthetische Biologie als Befähigertechnologie**

E-Fuels bzw. Synfuels sind bereits in vielen Fällen mittels biologischen Prozessen bzw. Organismen zu erzeugen und, je nach Anwendungsgebiet, ineinander zu überführen. Bei der Herstellung von Synthesegas entsteht mit Wasserstoff und CO<sub>2</sub> zum Beispiel Methan. Der Einsatz von Mikroorganismen in mikrobiellen Brennstoff- und Elektrolysezellen und der mikrobiellen Methanisierung ermöglicht es, diese Prozesse mittels biotechnologischen Methoden umzusetzen. Auch in Biogasanlagen sind es Mikroorganismen, die biogenes Material zu Methan umsetzen. Letztendlich werden in solchen Prozessen Energie, CO<sub>2</sub> und Wasser mittels biologischen Organismen zu Methan oder anderen wertvollen Produkten umgewandelt, die zahlreiche industrielle Anwendungsmöglichkeiten besitzen. Im Forschungszweig der synthetischen Biologie wird die Entwicklung und Optimierung von maßgeschneiderten Organismen zu solchen Zwecken erforscht. Die Nutzung von modernen Methoden der Datenverarbeitung (wie bspw. Evolutionsalgorithmen) führte hierbei bereits zu wesentlichen Fortschritten und treibt die Wirtschaftlichkeit von biotechnologischen Prozessen weiter voran. Die Informationsebene als dritte Integrationsebene der biointelligenten Wertschöpfung wird demnach für die Energieerzeugung und -speicherung ebenfalls zunehmend relevant und man kann den Prozess der Biologischen Transformation in diesem Handlungsfeld bereits beobachten. Bio- und informationstechnische bringen enormes Innovationspotenzial mit sich, um eine Konvergenz zwischen biologischen, technischen und informationstechnischen Systemen zu erreichen und damit biointelligente Systeme zu verwirklichen.

## **Infrastruktur und Forschung als Sicherheiten für den Einsatz von Privatkapital**

Einige Empfehlungen, die im Rahmen der Voruntersuchung BIOTRAIN erarbeitet wurden, betreffen strukturelle, politische und organisatorische Gegebenheiten, die um einen erfolgreichen Transformationsprozess zu ermöglichen, verbessert und unterstützt werden sollten. Groß angelegte und wissenschaftlich fundierte Studien mit Prognosen und Technologievergleichen bzw. –Roadmaps für beispielsweise biotechnologisch hergestellte E-Fuels/Synfuels könnten zu einer höheren Sicherheit bei Privatinvestoren beitragen und damit dem Hemmnis des oftmals fehlenden Privatkapitals für Start-Ups und Unternehmensgründungen, die sich mit neuen Technologien beschäftigen, entgegenwirken. Als weiteres Hemmnis wurde in der Voruntersuchung eine fehlende Infrastruktur und fehlende Standardisierung in vielen Bereichen identifiziert. Ein Beispiel hierfür ist die gekoppelte Strom- und Wärmebereitstellung aus Biomasse, die besser auf die Nutzungsprozesse abgestimmt werden sollte. Biomasseheizkraftwerke sollten demnach weg von weniger effizienten Einsatzfeldern wie der Erzeugung von Strom und Gebäudewärme in die industrielle Anwendung für Nieder- und Mitteltemperaturprozesse (<500°C) umgelagert werden. Eine Infrastruktur für Restbiomasse zur energetischen Nutzung in Industrieprozessen ist jedoch noch nicht vorhanden. Dasselbe gilt im Mobilitätssektor für Wasserstoff als derzeit vielversprechendstes E-Fuel/Synfuel für einen zeitnahen breit angelegten Einsatz. Die Infrastruktur für eine flächendeckende Versorgung sollte hierzu schnellstmöglich ausgebaut werden, um den Einsatz und die Entwicklung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen sowie den zugehörigen Technologien zur effizienten Wasserstoff-Synthese voranzutreiben.

## **CO<sub>2</sub> als Baustein für nachhaltige Stoff- und Energieträgerkreisläufe**

Die Visionen der kreislaufbasierten Nachhaltigkeitskonzepte sind in der Gesellschaft bereits bekannt und es findet ein Umdenken in Richtung einer »sauberen« Energieversorgung statt. Dies zeigt beispielsweise die Nachfrage nach alternativen Antriebs- und Energiespeichertechnologien im Automobilbereich und die sich ändernde Gesetzgebung (Abgasnormen, Diesel-Fahrverbote). Jedoch gibt es nach Einschätzung der beteiligten Experten auch gesellschaftliche Hemmnisse im Handlungsfeld Energieerzeugung und -speicherung. CO<sub>2</sub> beispielsweise hat ein negatives Image aufgrund der damit verbundenen klimatischen Einwirkungen auf das Ökosystem (Treibhauseffekt). Diese negative Konnotation hemmt möglicherweise die Umsetzung innovativer

## ● Vision und Empfehlung

Konzepte, die eine intelligente Nutzung von CO<sub>2</sub> als Grundbaustein für die chemische Energiespeicherung ins Auge fassen, beispielsweise durch künstliche Photosynthese. Der nicht berücksichtigte Unterschied von Kreislaufführung und Freisetzung, der bereits in der Gesetzgebung (CO<sub>2</sub>-Grenzwerte, CO<sub>2</sub>-Besteuerung, etc.) verankert ist, behindert die Umsetzung einiger vielversprechender Forschungsansätze nach Ansicht der Experten und Workshop-Teilnehmer. Eine Empfehlung für die Politik lautet daher, die Konzepte der Besteuerung von Kohlendioxid-Emissionen vor diesem Hintergrund zu prüfen, um z. B. aus der Atmosphäre gebundenes CO<sub>2</sub> mit dem emittierten CO<sub>2</sub> zu saldieren. Eine Integration von CO<sub>2</sub> in industrielle Stoff- und Energieträgerkreisläufe bietet nach Einschätzung der Experten großes Potenzial. Die Prinzipien und Prozesse der Biologie sollten hierzu analysiert und als Orientierungsmuster herangezogen werden. Eine chemische Bindung von Wasserstoff-Ionen mittels organischen Trägermolekülen (z. B. Ameisensäure) auf CO<sub>2</sub>-Basis könnte beispielsweise dazu beitragen, dass Wasserstoff als Energieträger in eine besser handhabbare (flüssige) Form überführt werden kann. Nach Meinung der Experten sollte dieses Potenzial einer Integration von CO<sub>2</sub> in Wertschöpfungskreisläufe durch eine stärkere interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Ingenieuren und Biotechnologen besser ausgeschöpft werden und entsprechend gefördert werden.

### **Next Steps – Analysieren, abstrahieren, vernetzen und adaptieren!**

Zusammenfassend ist der wesentliche Schritt für eine ausgeglichene volkswirtschaftliche Energiebilanz eine Etablierung von gekoppelten Stoff- und Energieträgerkreisläufen, innerhalb derer sowohl die Gesamteffizienz auf der Erzeugerseite optimiert, als auch der Verbrauch verringert werden muss. Energieeffizienzmaßnahmen in allen Sektoren der Wertschöpfung (von der Rohstoffgewinnung über die Nutzung bis zur Wiederverwertung) sowie effiziente Energiespeicher-Methoden zur Flexibilisierung der Versorgung sind dafür notwendig. Besonderheiten der Biologie mit hohem Transferpotenzial für die industrielle Energiebereitstellung, -speicherung und -umwandlung haben in diesem Zusammenhang großes Potenzial. Dazu gehören beispielsweise die Adaption von biologischen Prinzipien der Verknüpfung von Energieflüssen und Stoffumwandlungen, wie Bioraffinerien sie beispielsweise bereits umsetzen. Ebenso wird eine Steigerung der Gesamteffizienz des Energieversorgungssystems durch die Etablierung von flexiblen chemischen Basisenergieträgern (E-Fuels/Synfuels) erwartet. Langfristig werden biologische Organismen, die mittels synthetischer Biologie optimiert wurden, weitere Fortschritte hinsichtlich Effizienz- und Flexibilität der Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse ermöglichen. Im Rahmen der Voruntersuchung wurden neue Möglichkeiten und Wege der Umsetzung solcher Maßnahmen identifiziert und zugehörige Handlungs- und Forschungsempfehlungen herausgearbeitet. Die möglichen Fortschritte in den Speichertechnologien zur Flexibilisierung der Energieversorgung und Effizienzsteigerungen der Prozesse, die durch die Nutzung biologischer Prinzipien, Prozesse und Organismen erreicht werden können, haben nach Einschätzung der befragten Experten großes Potenzial, um branchenübergreifend zu mehr Wirtschaftlichkeit und gleichzeitig mehr Nachhaltigkeit in der industriellen Wertschöpfung beizutragen.

Die »next steps« sind daher eine intensiverte Erforschung und Entwicklung der Grundlagen sowie des Transfers von E-Fuels/Synfuels in die breite Anwendung. Die Speicherung von elektrischer Energie (Power-to-X) und die Kopplung der Energiesektoren Strom, Wärme und Mobilität sind hierbei die initialen Schlüsseltreiber. Die biologische Ebene (Synthetische Biologie, Mikrobiologie, Enzymtechnik), die technische Ebene (Anlagentechnik, Prozesstechnik, Automatisierungstechnik) und die Informationsebene (Evolutionalgorithmen, intelligente Regelkonzepte) stellen wesentliche Bausteine für diese Entwicklung bereit, auf denen aufgebaut werden kann. Der Markt- und Kapitalzugang für biobasierte und -inspirierte Forschungs- und Entwicklungsprojekte sollte zudem verbessert werden, um die nötige Skalierungsstufe und Robustheit der Prozesse für einen industriellen Einsatz zu ermöglichen. Technologievergleiche- und Roadmaps können hierzu ebenso beitragen wie infrastrukturelle Anpassungen oder Steuermodelle, die sowohl die Umweltbelastung berücksichtigen als auch die gesamten Wertschöpfungsketten bzw. -kreisläufe betrachten.



### 5.3.7 TECHNIKFOLGEN: TRANSPARENZ, INFORMATIONSZUGANG UND OFFENE DISKUSSIONEN BEGLEITEN DIE TRANSFORMATION

»Das größte Potenzial der Biologischen Transformation besteht in der Landwirtschaft, dem Maschinenbau und der Chemieindustrie. In Summe beläuft sich dies auf bis zu einem Drittel des BIP. Das heißt aber nicht, dass die Biologische Transformation durchweg segensreich ist. Vielmehr als in anderen Bereichen gilt es hier, Technikfolgen-abschätzungen für Einzeltechnologien in allen Fällen der Anwendung umzusetzen, um Gefahren zu identifizieren, wie bspw. die Verselbstständigung von Prozessen bis hin zu deren Unkontrollierbarkeit. In diesem Zusammenhang sind übergeordnete Instanzen notwendig, die die Umsetzung der Technikfolgenabschätzung nach dem Vorsorgeprinzip überprüft und den Technologieeinsatz legitimiert.«

*(Prof. Dr. Ernst Ulrich von Weizsäcker, Ko-Präsident Club of Rome)*



Handlungsfeld  
Technikfolgen  
Ausarbeitung  
(PDF-Dokument)

Eine Vielzahl neuer Technologien findet im Zuge der Biologischen Transformation Eingang in die industrielle Wertschöpfung, und damit in die Gesellschaft und das Leben der Menschen. Um deren Auswirkungen besser vorhersehen zu können und bereits im Vorfeld geeignete Bedingungen zu schaffen, wurde das Handlungsfeld Technikfolgen identifiziert.

#### **Entwicklung von Standards und Wertmaßstäben – Angemessene Rahmenbedingungen für biointelligente Systeme**

Bei der Entwicklung neuer Technologien, die oft gleichzeitig von mehreren Akteuren vorangetrieben wird, entstehen unterschiedliche Formate und Lösungen. Um eine erfolgreiche Umsetzung und Verbreitung dieser Technologien in einer biologisch transformierten Wertschöpfung zu gewährleisten, muss eine Kompatibilität unterschiedlicher Systeme zueinander sichergestellt werden. Diese Aussage ging klar aus den mit verschiedenen Branchenvertretern durchgeführten Workshops hervor. Hierzu bedarf es definierter Standards beispielsweise für die Kommunikation oder für biointelligente Schnittstellen. Industrien und Branchen müssen sich auf gemeinsame Standards für neue bioinspirierte Technologien einigen. Andernfalls kann auch die Politik Normen und Standards festlegen, etwa um Verbraucher zu schützen. Eine gesetzliche Verankerung von Standards und Normen bietet zudem wirtschaftliche Sicherheit für die Akteure. Standards auf internationaler Ebene sind im Zuge der Globalisierung ebenfalls anzustreben. Die befragten Experten fügten hinzu, dass im weiteren Sinne auch gemeinsame Wertmaßstäbe entwickelt werden müssen. Beispielsweise müssen sich Akteure darüber einig sein, inwieweit biologisch transformierte Systeme offen gestaltet werden können, um zwar Adaption zu gewährleisten, aber Missbrauch zu verhindern.

#### **Beherrschbarkeit biointelligenter Systeme und prospektiv orientierte Folgenregulation – Resilienz implementieren und Kontrolle schaffen**

Die Mehrheit der befragten Experten und Workshopteilnehmer geht davon aus, dass die Komplexität von Systemen durch die Biologische Transformation zunimmt (Verarbeitung großer Datenmengen, Aufbau von Netzwerkstrukturen etc.). Daher empfiehlt es sich, die Forschung zur Modellierung hochkomplexer biointelligenter Systeme und Prozesse zu intensivieren und gleichzeitig Forschungsthemen zu initiieren, die sich mit dem Umgang mit Komplexität innerhalb der Systeme beschäftigen. Andererseits sind Prinzipien in der Natur erstaunlich einfach und skalierbar gehalten (bspw. Fibonacci Reihe zur Beschreibung einer optimalen Anordnung von Blättern, Schwarmalgorithmen oder Beinkoordination von Insekten, die auf wenigen Anweisungen beruhen). Bedenken hinsichtlich der Beherrschbarkeit komplexer biologischer Systeme richten sich nach der



## ● Vision und Empfehlung

Auswertung der Projektergebnisse auch auf ungewollte Zustände des Systems. Biologische Systeme könnten erkranken oder mutieren und stellen so eine Gefahr für die Stabilität von Prozessen oder gar für Menschen und Umwelt dar.

Weiterhin können andere epigenetische Effekte oder neue Eigenschaften auftreten, die erst durch das Zusammenwirken verschiedener Teile entstehen. Hier empfehlen wir die frühzeitige Betrachtung solcher Szenarien, speziell derer, die direkt aus der Biologischen Transformation und biointelligenten Systemen resultieren, durch den Gesetzgeber sowie die Schaffung bzw. Anpassung von Mechanismen, die dem entgegenwirken. Hierzu gilt es, auch neuartige Möglichkeiten zur Kontrolle komplexer Ausbreitungsmöglichkeiten (räumlich, zeitlich, systemisch, evolutionär) genetisch veränderter Organismen und freigesetzter Stoffe und den Schutz vor Missbrauch zu prüfen und ggfs. zu überarbeiten. Als Grundlage hierzu dienen bereits bestehende Richtlinien und Gesetze, wie beispielsweise das Gentechnik-Gesetz (GenTG). Um Missbrauch und möglichen Risiken vorzubeugen, sollten diese Aspekte zudem bereits in das Produktdesign einfließen, sodass die Produkte möglichst resilient gestaltet sind (»resilient by design«). Adressiert an die Politik empfehlen wir in diesem Zusammenhang, die Rahmenbedingungen für eine gezielte und faktenbasierte Abschätzung von Gefahrenpotenzialen zu schaffen, die die betroffenen Unternehmen bei deren Risikomanagement-Entscheidungen unterstützen können.

### **Forschungsthemen – Ökosystemforschung und prädiktive Modellierung**

In Forschungsvorhaben zu Ökosystemen und einer prädiktiven Modellierung sollten Methoden und Modelle entwickelt werden, die helfen, die zukünftigen Einflüsse, Entwicklungen und Folgen von Technologien vorherzusagen. Hier sind vor allem die Entwicklung oder Weiterentwicklung von Modellierungsansätzen zur Abbildung von Ökosystemen zu nennen, die Weiterentwicklung von Life Cycle Assessment (LCA), insbesondere für Genome Editing und Künstliche Intelligenz (KI), die Erweiterung des Ökosystemansatzes um industrielle Akteure und die Ausweitung der angewandten Ökosystemforschung und -technik auf biointelligente Technologien. Des Weiteren muss die Bepreisung von Umweltgütern ein wichtiger Bestandteil der aktuellen Ökosystemforschung und prädiktiven Modellierung sein. Hierbei sollen die Umweltauswirkungen und die Nutzung von Naturkapital in die betriebliche Wertschöpfungsrechnung übertragen werden. Darüber hinaus gilt es, Zielkonflikte bei der Einführung bioinspirierter Technologien frühzeitig zu identifizieren.

### **Methoden der Prognostik – Rebound-Effekte und Prädiktion**

Darüber hinaus muss die Wissenschaft die Wirksamkeit von angestrebten Veränderungen untersuchen, um unter anderem deren Nutzen zu beweisen und für die Öffentlichkeit klar herauszustellen. Hier können bspw. Untersuchungen ansetzen, die den tatsächlichen Beitrag von bioinspirierten Technologien zur Ressourceneffizienz konkret bestimmen. In diesem Zusammenhang empfehlen wir auch, die Forschung zu Rebound-Effekten und entsprechende Prädiktionsmethoden innerhalb der Biologischen Transformation zu intensivieren. Betrachtet man die Folgen von Technologien, spielt die Begleitforschung eine wichtige Rolle. Hier sind vor allem Forschungsthemen in Zusammenarbeit mit den Wirtschaftswissenschaften und der Soziologie zu identifizieren und voranzutreiben. So ist unter anderem die Erforschung neuer Arbeitsformen, -modelle und -inhalte und deren Auswirkungen auf den Arbeitsplatz der Zukunft ein wichtiger Ansatzpunkt für begleitende Forschungsbereiche.

### **Rechtliche Grundlagen – Schaffung von Forschungsräumen für Risikotechnologien und Schutz des geistigen Eigentums**

Rechtliche Folgen, die mit der Entwicklung, dem Vertrieb und der Nutzung von neuen Technologien einhergehen, können ganz unterschiedliche Bereiche betreffen. Rechtliche Ungewissheiten müssen frühzeitig identifi-

ziert und geklärt werden. Hier ist vor allem der Aspekt der Produkthaftung zu nennen. Besonders für risikobehaftete Technologien, bspw. in der Biotechnologie, muss gesetzlich geklärt werden, wer für welche Arten des Missbrauchs oder anderer Schäden und deren Beseitigung haftet (z. B. ungewollte Freisetzung von Mikroorganismen aus Prozessen in die Umwelt). Auch die Frage, wie mit Fehlentscheidungen von autonom entscheidenden Systemen und daraus resultierenden Schäden umzugehen ist, muss durch den Gesetzgeber festgehalten werden, wie es z. B. bei autonom fahrenden Transportsystemen bereits umgesetzt wird. Wir empfehlen eine frühzeitige Kooperation von gesetzgebenden Organen mit den entsprechenden Akteuren (Entwickler, Nutzer), um einen rechtlichen Rahmen zu schaffen, der Entwicklern und Nutzern Sicherheit gibt und Räume mit kontrolliertem Risiko für entsprechende Forschungsbemühungen schafft. Im Zuge der Digitalisierung entstanden neue Debatten um den Schutz geistigen Eigentums. Die Bedeutung immateriellen Kapitals wie Daten, Wissen oder Patente ist für die Biologische Transformation enorm. Der Schutz geistigen Eigentums muss deshalb weiterhin gestärkt und auch für zukünftige Technologien klar definiert werden. Weiterhin kommt der Einführung von Regularien eine bedeutende Rolle zu. Mit diesen Regularien kann bspw. die Produktion neuer Materialien und deren Umwelteinflüsse sowie Auswirkungen auf die Gesundheit während und nach der Nutzung geregelt werden. Des Weiteren können Regularien zum Umgang mit möglichen Zielkonflikten, wie der Landnutzungskonkurrenz, eingeführt werden.

### **Next Steps – Technikfolgenabschätzung als Basis für einen zielgerichteten Transformationsprozess**

Die durch die Biologische Transformation aufkommenden Technologien müssen von Beginn an im Rahmen von Technikfolgenabschätzungen mit den damit zusammenhängenden gesellschaftlichen Entwicklungen analysiert werden. Die Entwicklung von Normen und Standards sollte auf Basis dieser Analysen durchgeführt werden und eine Grundlage bilden für den Prozess der Biologischen Transformation der Wertschöpfung.

### **5.3.8 ENTWICKLUNG INNOVATIVER GESCHÄFTSMODELLE: FINANZIERUNGSMÖGLICHKEITEN UND RAHMENBEDINGUNGEN**

»Eine Veränderung von Wertschöpfungsketten unter dem Einfluss der Lebenswissenschaften führt zu einer drastischen Veränderung der Geschäftsmodelle mit neuen Kernkompetenzfeldern, komplexeren, kompakteren und kontinuierlicheren Abläufen. Unternehmen, die bisher nur einzelne Teile abgedeckt haben, müssen sich neu orientieren.«  
(Dr. Uwe Gottschalk, Chief Scientific Officer, Lonza AG)



Handlungsfeld  
Geschäftsmodelle  
Ausarbeitung  
(PDF-Dokument)

Geschäftsmodelle und eine gesunde Innovationskultur sind zu zentralen Themen im Management von Industrieunternehmen. Gesellschaftliche Veränderungen brachten dabei in der Vergangenheit stets neue Geschäftsmodelle mit sich. Eine Herausforderung für die Zukunft ist es in diesem Kontext, Gesetzesgrundlagen und Implementierungen zeitnah für neue Geschäftsmodelle zu schaffen. Dazu müssen diverse Haftungsfragen und flexible Anpassungen an bereits vorhandene Gesetze erfolgen. Entbürokratisierung und der Abbau von Hürden für Unternehmensgründungen (insbesondere Kapitalzugang) spielen hierbei eine wichtige Rolle.

### **Flexibilität, Schnelligkeit und Interdisziplinarität – Erfüllen bisher unbekannter Kundenwünsche**

Bei der Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle sind Flexibilität und Schnelligkeit von erheblicher Bedeutung, um entsprechende Wettbewerbsvorteile zu generieren. Hierfür sind Kenntnisse und Erfahrungen aus unterschiedlichsten Bereichen notwendig, sodass insbesondere Start-ups und junge Unternehmen auf eine

## ● Vision und Empfehlung

interdisziplinäre Personalauswahl achten sollten. Im Gegensatz zu etablierten Geschäftsmodellen, bei denen bekannte und damit berechenbare Bedürfnisse der Kunden befriedigt werden, werden mithilfe neuer Geschäftsmodelle diese Bedürfnisse häufig erst geweckt und so neue Märkte für Produkte und Dienstleistungen geschaffen. Da derartige Geschäftsmodelle mit hohem Risiko verbunden sind, könnte eine Absicherung durch Risikokapital für Geschäftsmodelle mit einer Fokussierung auf interdisziplinäre Vorhaben von Vorteil sein. Auf diese Weise können Biologie, Technologie und Gesellschaft miteinander verknüpft werden. Hierfür muss bei Forschungsausschreibungen insbesondere auf eine interdisziplinäre Zusammenstellung des Konsortiums geachtet werden. Darüber hinaus können staatliche Förderangebote für junge Unternehmen, deren Geschäftsmodelle eine Fokussierung auf interdisziplinäre Themen haben, die Verbreitung und Akzeptanz der Biologischen Transformation weiter erhöhen. Basistechnologien der Biologischen Transformation sind bislang häufig auf wenige Anwendungsfelder beschränkt. Die Interdisziplinarität ermöglicht es jedoch, diese Technologien weiterzuentwickeln und so in die verschiedensten Bereiche vorzustoßen. Zur Erreichung dieser Interdisziplinarität sind möglichst barrierefrei zugängliche Zentren, in denen sich unterschiedlichste Unternehmen ein Testareal teilen, vielversprechend. Das gemeinsame Lernen aus Fehlern, eine neue »Failure«-Kultur führt schließlich zum Entstehen ganz neuer Technologien und Geschäftsmodelle.

### **Start-ups und KMU – Flexible Unternehmensstrukturen bieten hohes Potenzial für disruptive Geschäftsmodelle**

»Ein Unternehmen sollte ein Gesamtorganismus nach dem Vorbild der Natur werden.«

*(Wolf Hirschmann, Geschäftsführender Gesellschafter SLOGAN GmbH)*

Um der Dynamik und Schnellebigkeit neuer Geschäftsmodelle Rechnung zu tragen, sind Forschungsausschreibungen so auszulegen, dass schnelle Auswahlverfahren möglich werden. Hierzu sind ein leichter Zugang zu Förderangeboten und eine Vereinfachung der Förderformate notwendig. Auch der Austausch mit starken Unternehmenspartnern, Fördereinrichtungen und Hochschulen sollte politisch gefördert werden.

Für viele Start-ups und KMUs ist die Einstellung hochqualifizierter Mitarbeiter (z. B. Ingenieure oder Informatiker) schwierig. Die Methodenkompetenzvermittlung erfolgt heute bereits häufig digital. Die visuelle Unterstützung trägt wesentlich zum Lernerfolg bei. Daher gewinnen innovative Technologien wie Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) an Bedeutung, die neue Methodenkonzepte wie Online-Schulungen vorantreiben. Eine Verbesserung der Aus- und Weiterbildungswege ist eine notwendige Maßnahme, um dem Fachkräftemangel entgegenzutreten. Hierzu sind Lehrmaterialien mit interdisziplinären Inhalten zu erarbeiten (s. auch Handlungsfeld Wissenstransfer).

### **Finanzierung – Zugang zu Risikokapital als Innovationsbeschleuniger**

Innovative Geschäftsprozesse und -modelle müssen vor allem wirtschaftlich sein. Unternehmensgründungen im KMU-Bereich müssen in Finanzierungsfragen unterstützt werden, wenn sie in Zukunft konkurrenzfähig zu global agierenden Unternehmen sein sollen. Möglichkeiten der Weiterentwicklung des Crowdfundings und neue Finanzierungsalternativen, bspw. auf Basis von Kryptowährungen (ICOs – Initial Coin Offerings), können über die Einrichtung und Erstellung neuer Plattformen und Foren zur Information und Aufklärung breitere Anwendung finden. Dies schafft insbesondere für Start-ups eine risikokapitalfreundliche Atmosphäre. Ein weiterer Aspekt zu finanziellen Fragen kann über die Diversifizierung von Investitionen in Unternehmensteilen (u. a. F&E) erfolgen. Im Gegensatz zu klassischen Investitionen wird hier in bestimmte Unternehmensbereiche investiert, sodass Investitionskapital konzentriert und zweckgebunden verwendet kann.

Die Messung bzw. Quantifizierung der Vorteile neuer Geschäftsmodelle ist als weiteres Forschungsfeld anzusehen. In diesem Kontext ist der Einbezug von gesellschaftlichen Aspekten, wie etwa ein punktebasiertes

Anreizsystem für gesundheitsfördernde Aktivitäten, denkbar. Ferner sollen Messverfahren zur unternehmensübergreifenden Beurteilung von Benefits sowie neue Verfahren auf ökologischer Basis (z. B. Carbon Footprint) entwickelt werden. Aus ökologischer Sicht ist bspw. die Entwicklung eines nachhaltigen Abfallmanagementkonzepts denkbar, sodass eine ereignisgesteuerte Vergabe von Entsorgungsaufträgen nach diesem Prinzip als potenzielles Anwendungsbeispiel möglich wird.

### **Next Steps – Bewertung, Incentivierung und eine neue Rolle für Konsumenten**

»Für erfolgreiche Innovationen braucht man gute Köpfe, Handlungsspielräume und die Motivation, Produkte für den Markt herzustellen sowie natürlich Vorbilder. Dann steigt auch die Zahl der Unternehmensgründungen in der Biologie wieder an.«

*(Dr. Viola Bronsema, Geschäftsführerin, BIO Deutschland e.V.)*

Des Weiteren sind neue Bewertungs- und Incentivierungsansätze erforderlich, welche nicht nur rein monetäre, sondern auch ökologische Aspekte betrachten. Hierfür ist ein Wandel von Malus-Ansätzen, welche schlechtes Verhalten bestrafen, hin zu Incentivierungsansätzen, welche ein positives Verhalten belohnen, notwendig. Dies kann von der Unternehmensebene bis zur Arbeiterebene erfolgen. Eine zentrale Rolle spielen in diesem Zusammenhang Aspekte der Nachhaltigkeit wie bspw. der Wandel einer linearen Wertschöpfungskette hin zu einer Kreislaufwirtschaft. Dabei könnten Institutionen, die einen wesentlichen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft leisten, aber selbst nicht gewinnorientiert agieren können, von Profitunternehmen unterstützt werden.

Als Forschungsthema kommt die Untersuchung neuer Kundenstrukturen in Betracht, da der Kunde in der Rolle des Prosumers bei der Entwicklung des Produktportfolios zunehmend an Bedeutung gewinnt. Die Verschiebung der Produktion auf der Supply Chain in Richtung des Verbrauchers, bedingt durch den zunehmenden Wunsch nach Individualisierung und Schnelligkeit, wird von den stark zunehmenden Anwendungsbereichen der additiven Fertigung getrieben. Aus dieser Technologie ergeben sich darüber hinaus auch weitere Anwendungsmöglichkeiten im industriellen Umfeld, z. B. im Bereich alternativer Instandhaltungskonzepte.

Ein weiteres Forschungsfeld kundenzentrierter Geschäftsmodelle betrifft unter anderem ökologisch orientierte Abrechnungsmodelle, bspw. im Transportwesen. Hierzu sind Forschungen hinsichtlich ökologisch relevanter Kennzahlen für die Leistungsbestimmung notwendig. Basierend auf Smart Contracts könnten mit Hilfe von Sensordaten derartige Abrechnungen vollständig automatisiert erfolgen. Auch basierend auf der Messung menschlicher Biosignale könnten neue Geschäftsmodelle entstehen, von denen Arbeitgeber wie Arbeitnehmer profitieren können. Geschäftsmodelle, die im Kontext der Biologischen Transformation entstehen, sind häufig für die Öffentlichkeit neu und daher erklärungsbedürftig. Hierfür sind umfangreiche Aufklärungsmaßnahmen erforderlich, welche die Vorteile einer biointelligenten Wertschöpfung für alle Akteure verdeutlichen. Sorgen und Ängste müssen ernst genommen und durch umfangreiche öffentlichkeitswirksame Maßnahmen abgebaut werden. Eine branchenübergreifende Vernetzung und Kommunikation – auch mit Politik und Gesellschaft – auf Plattformen und Foren ist essenziell für die zukünftige Entwicklung und Ausgestaltung neuer Geschäftsmodelle am Standort Deutschland.

### **ANWENDUNGSBEISPIEL 4**

Smart Biomanufacturing Devices – Intelligente Bioproduktionszellen für die dezentrale Produktion  
Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Produktion müssen regional zur Verfügung stehende Rohstoffe und Materialien direkt und vor Ort aufbereitet und zu neuen Produkten verarbeitet werden können. Fortschritte in

der Bioelektrochemie, der synthetischen Biologie, der Digitalisierung und der Vernetzung sowie selbstlernende Algorithmen werden diesen Schritt ermöglichen.

### Heute

Ressourcen und Energie werden zu großen Teilen zentral erzeugt und über weite Strecken transportiert und verteilt, in mehreren Schritten verarbeitet und weiter verteilt. Bspw. wird von fast 6 Millionen Tonnen Kunststoff, die aus Erdöl erzeugt und in Deutschland verwendet werden, nicht einmal ein Fünftel recycelt. Über die Hälfte wird gesammelt und zur Energieerzeugung verbrannt. Rohstoffe werden unter hohen Zeit- und Energieaufwänden über weite Wege zu Produktionsstätten geliefert, dort verarbeitet und wieder auf den Weg zum Kunden geschickt. Das Gleiche gilt für Nahrungsmittel.

### Morgen

Dezentrale Produktion wird durch intelligente Bioproduktionszellen, welche auf der Biotechnologie, der synthetischen Biologie, Bioelektrochemie, künstlicher Intelligenz und der additiven Fertigung bzw. 3D-Bioprinting basieren, ermöglicht. Diese Smart Biomanufacturing Devices übernehmen einen Großteil der Produktionsaufträge für Konsumprodukte und Nahrungsmittel. Sowohl die Rohstoffe als auch die aufzuwendende Energie stammen zu großen Teilen aus Haushalts- und Agrarabfällen, hocheffizienten Urban-Gardening-Anlagen, horizontalen Gärten oder Mikroalgenreaktoren, die bspw. an Gebäudefassaden und -dächern angebracht sind. Wie in der Natur, können diese über organische Synthesewege regeneriert und direkt zu Produkten verarbeitet werden. Die Preise der so produzierten Produkte passen sich an die jeweilige regionale Rohstoffverfügbarkeit unmittelbar an. Industrieunternehmen liefern die hierzu nötigen Produktionselemente in Haushaltsgröße oder stellen dezentrale, hochflexible Produktionsstätten, sogenannte Produktionshubs, zur Verfügung. Digitale Baupläne werden in engem und direktem Austausch mit den Konsumenten entwickelt und stetig optimiert.

Beispiele aus der Praxis: Mikrobielle Brennstoffzellen können lebende Mikroorganismen, die im Rahmen ihres Energiestoffwechsels organische Substanzen verarbeiten, bereits heute unmittelbar zur Energiegewinnung nutzen. Auch das Drucken regelmäßiger Strukturen oder Gewebe aus zuvor gezüchteten einzelnen Zellen (3D-Bioprinting) ist bereits technisch möglich ([www.organovo.com](http://www.organovo.com)).

### 5.3.9 GESAMTGESELLSCHAFTLICHER DIALOG: TRANSPARENZ, INFORMATIONSZUGANG UND OFFENE DISKUSSIONEN BEGLEITEN DIE TRANSFORMATION

»Es muss eine öffentliche Debatte geben, um zu bestimmen in welche Richtung wir uns als Gesellschaft entwickeln wollen. Welche Autonomiegrade sollen Maschinen haben? Wieviel Kontrolle soll der Mensch behalten? Diese Debatte sollte entscheidend von Technikwissenschaftlern, die ethische Aspekte mit reinbringen, und von Sozialwissenschaftlern, die sich um technisches Verständnis bemühen, geprägt werden.«

*(Prof. Dr.-Ing. Siegfried Russwurm, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg)*

Besonders Themen wie gentechnisch veränderte Pflanzen und Organismen oder biointelligente Wertschöpfungssysteme mit hohen Automatisierungsgraden erzeugen in der Gesellschaft schnell Ressentiments. Deshalb ist ein offen geführter gesellschaftlicher Dialog enorm wichtig. Auch stößt der Gedanke einer biologisch transformierten Wertschöpfung in einigen Branchen noch auf Skepsis oder wird dort als wenig relevant eingestuft. Vor allem traditionell geprägte Branchen wie die Metall- und Elektroindustrie seien hier genannt, wohingegen jüngere Branchen, wie die IT- oder Logistik-Industrie, tendenziell aufgeschlossener gegenüber Ansätzen einer biologisch transformierten Wertschöpfung sind. Gleiches gilt für Geschäftsfelder in denen schon seit Langem mit biologischen Prinzipien gearbeitet wird, wie z. B. die Lebensmittel-, Chemie- und Pharmaindustrien.



Handlungsfeld  
Gesellschaftl. Dia-  
log Ausarbeitung  
(PDF-Dokument)

## **Sicherheit – Risikobehaftete Technologien, Datenschutz und die Zukunft der Arbeit**

Der Aspekt Sicherheit hat sich über alle Branchen hinweg als zentral herausgestellt. Hier spielen vor allem Bedenken und Ängste vor dem Missbrauch neuer Technologien eine wichtige Rolle. Besonders häufig wurden hier Gentechnik und damit verbunden genetisch veränderte Organismen genannt, die beim versehentlichen Austreten in die Umwelt eine große Gefahr bedeuten können. Zum einen müssen deshalb Mechanismen gefunden werden, die verhindern, dass biologische Systeme in der Wertschöpfung zur Gefahr werden. Zum anderen muss sichergestellt werden, dass versehentlich freigesetzte Organismen sich nicht unkontrolliert ausbreiten können. Auch der Schutz personenbezogener Daten spielt eine Rolle, da Daten ein wichtiger Baustein biointelligenter Systeme sind. Die Datensicherheit spielt deshalb in einer biologisch transformierten Wertschöpfung eine extrem wichtige Rolle. Die Adressierung und Handhabung dieser Problembereiche wird mit entscheidend sein für den Erfolg der Biologischen Transformation. Hier können Verschlüsselungstechnologien einen Beitrag leisten, diese Risiken zu adressieren. Eine DNA-inspirierte Verschlüsselung von personenbezogenen Daten wäre hier als Beispiel zu nennen. Private Nutzer von Technologien und Konsumenten wollen einerseits die Vorteile der neuen Technologien nutzen können, aber auch sicherstellen, dass ihre Daten, z. B. zur Anfertigung individuell angepasster Produkte, nicht weitergegeben werden. Auch der Arbeitsplatz spielt unter dem Aspekt Sicherheit eine wichtige Rolle. Viele in der industriellen Produktion tätige Menschen haben Angst, durch eine Transformation ihren Arbeitsplatz zu verlieren oder einer sich wandelnden Produktion und neuen Inhalten nicht gewachsen zu sein. Weiterbildungs- und Umschulungsprogramme müssen deshalb angepasst werden. Sicherheit ist demnach in vielen Bereichen ein wichtiger Punkt, den Politik und Industrie im Handlungsfeld »Gesellschaftlicher Dialog« adressieren müssen. Akteure aus unterschiedlichsten Bereichen müssen in diesen Prozess aktiv eingebunden werden.

## **Transparenz und Kommunikation – Pilotprojekte und ein offener Umgang mit Chancen und Risiken**

Eine weitere Basis für einen konstruktiven gesellschaftlichen Dialog ist Transparenz. Industrielle Akteure aller Branchen müssen auf eine transparente Gestaltung ihrer Produktion und Wertschöpfungsketten achten. Hier können Pilotprojekte ansetzen, welche zu Demonstrationszwecken initiiert werden und Möglichkeiten, Entwicklungen, aber auch Risiken bildhafter und transparenter vermitteln. Weiterhin nimmt der einfache Zugang zu umfassenden Produktinformationen eine zentrale Rolle ein. Entsprechende Technologien, die den Zugang zu produktbezogenen Informationen vereinfachen, sollten in Zukunft weiterentwickelt werden. Auch die Politik kann durch eine entsprechende Gesetzgebung und Regularien zu mehr Transparenz in einer biologisch transformierten Wertschöpfung beitragen. Auch Kommunikationsmöglichkeiten kommt innerhalb des gesellschaftlichen Dialogs eine wichtige Rolle zu. Die Schaffung von Austauschmöglichkeiten zwischen Industrie, Forschung, Politik und Gesellschaft, bspw. durch Clearing-Stellen oder Online-Angebote, ist unerlässlich. Außerdem müssen alle Stakeholder frühzeitig in die Debatte mit eingebunden werden, wobei ein offener Umgang mit Chancen und Risiken unerlässlich ist.

## Öffentlichkeitswirksame Präsenz – Instrumente zur Information und Verbreitung

Zur Schaffung eines umfassenden Dialogs, zur Verbreitung des Konzeptes und der Vision der Biologischen Transformation und mithin zur Sicherstellung ihres Gelingens ist die öffentliche Präsenz unerlässlich. Hier gibt es viele Möglichkeiten, angefangen bei der Einrichtung von Blogs zur Biologischen Transformation oder der Etablierung eines internationalen wissenschaftlichen Journals. Außerdem kann durch die staatliche Bezuschussung von kostenlosem Lehr- und Informationsmaterial und dem Versand an Multiplikatoren wie Schulen, Universitäten, Politiker oder Verbände eine breite Öffentlichkeit erreicht werden. Die Einrichtung eines jährlichen Biotransformationskongresses und die Ausschreibung eines Forschungspreises sind weitere empfohlene Instrumente.

## Next Steps – Wissenskommunikation und ein gemeinsamer Sprachraum für die Biologische Transformation

»Es gilt, statt der Wettbewerbsfähigkeit Einzelner die solidarische Kollaboration der Akteure unterschiedlichster Disziplinen und Branchen zu stärken. Und das auf breiter gesellschaftlicher Ebene. Dafür ist essentiell, alle Menschen nach ihrem Grad der Sinnkopplung einzuschließen und sie aktiv an der Gestaltung der Zukunft zu beteiligen.«  
(*Franziska Köppe, madiko Lebens- & Arbeitswelten mit Zukunft*)

Im Handlungsfeld »Gesellschaftlicher Dialog« nimmt die Forschung zu ethischen Fragen einen wichtigen Stellenwert ein, der in einem ersten Schritt durch gezielte Forschungsförderungen unterstützt werden sollte. Zentrale Fragen betreffen dabei die Rolle des Menschen in einer biointelligenten Wertschöpfung und seine Rolle und Verantwortung im Umgang mit biologischen Systemen und der Umwelt. Des Weiteren müssen tiefgreifende technische Veränderungen wie bspw. der Einsatz von Künstlicher Intelligenz und seine Auswirkungen auf Mensch, Natur und Gesellschaft untersucht werden.

Weitere Forschungsthemen müssen sich der Verbreitung von Wissen und Informationen zur Biologischen Transformation widmen. Als wichtiges Themenfeld ist hier die Wissenschaftskommunikation zu nennen, die allgemein verständliche Bilder entwerfen und Inhalte angemessen transportieren muss. Hierfür sind die Schaffung einer gemeinsamen, disziplinübergreifenden Fachsprache und die Erforschung der Bedeutung neuer Kommunikationskanäle für den gesellschaftlichen Dialog unerlässlich. In diesem Zusammenhang empfehlen wir, neue Möglichkeiten des Diskurses zu schaffen. Themen könnten das Rollenbild des Menschen in der biointelligenten Wertschöpfung sein, die Erforschung von Akzeptanzmechanismen und neue Formen der Bürgerbeteiligung.

### 5.3.10 WISSENSTRANSFER: GESTALTUNG VON INTERDISZIPLINÄREM AUSTAUSCH

»Industrielle Wertschöpfung kann erst dann erfolgversprechend biologisch transformiert werden, wenn wir ein Grundverständnis für das Funktionieren natürlicher Ökosysteme und ihrer Biodiversität haben.«  
(*Dr. Stefan Rösler, Geschäftsführer, Oecocoach*)

Der Wissenstransfer ist eines der grundlegenden Handlungsfelder für eine effiziente Forschung und Entwicklung im Rahmen der Biologischen Transformation.



## Bildung und Ausbildung – Interdisziplinarität statt Multidisziplinarität

Wachsende Vernetzung, Digitalisierung und Biologische Transformation bedingen im Rückschluss einen Ausbau der Bildungsbasis. Die Schärfung einer entsprechend informationstechnologischen und biologischen Orientierung der Ausbildung ist hierzu ebenso wichtig wie die Reflexionsfähigkeit des Einzelnen. Durch die effiziente Vermittlung theoretischen Wissens sowie der praxisnahen und problemorientierten Anwendung kann die Aus- und Weiterbildung auf allen Ebenen des Lernens optimiert werden. In der schulischen und der beruflichen Bildung, im akademischen Studium sowie bei der Weiterbildung »On the Job« spielt die stete Weiterentwicklung eines interdisziplinären und multiperspektivischen Verständnisses eine zentrale Rolle. Neue Anforderungen und Qualifikationsbedarf an Mitarbeiter verlangen auch verstärkt prozessorientiertere Ausbildungsinhalte, berufsfeldübergreifendes Fachverständnis und die direkte Verzahnung mit der realen betrieblichen Handlungswelt. Die Vernetzung muss konsequenterweise bereits bei der Vermittlung des Lernstoffes beginnen. Nicht das Aufnehmen, Abspeichern, Ausspucken und Vergessen, wie es in Schule und im Studium Standard ist, sollte das Ziel sein, sondern das permanente Verknüpfen der biotechnischen, technischen und digitalen Lerninhalte. Dies bedarf einer Neustrukturierung von Lehrplänen, einer Abstimmung der Lehrkräfte untereinander und der Durchführung gemeinsamer Veranstaltungen und Praktika. Des Weiteren ist die Biologische Transformation ein Thema, das auch in sozialwissenschaftlichen Fächern wie Gemeinschaftskunde, Politik und Wirtschaft Eingang finden muss. Die Biologische Transformation braucht die Diskussion und die gesellschaftliche Durchdringung in Bezug auf Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung sowie ethische und soziale Aspekte. Für die Entwicklung von Querschnitts-Studienrichtungen (wie z. B. Biointelligente Wertschöpfung), für die berufliche Ausübung von Querschnittsfunktionen, aber auch für die Sicherstellung der Ausbildung von technischen Spezialisten mit tiefgehenden Kenntnissen in den Basisdisziplinen Ingenieurwissenschaften, Biotechnologie und Informatik, wird die heutige Praxis, existierende Module zusammenzuwürfeln nicht zielführend sein. Stattdessen bedarf es neuer Konzepte und der Abstimmung von Lehrinhalten der verschiedenen Disziplinen auf die Ausbildungsziele hin. Bspw. die Einführung von Lehrfächern, die kooperativ von zwei Dozenten verschiedener Disziplinen gehalten werden, das Praktizieren von Interdisziplinarität statt – wie bisher – Multidisziplinarität. Die aus der Hirnforschung bekannten Prinzipien des effektiven Lernens sollten genutzt werden, anstelle der Überfrachtung mit Lerninhalten. Der Ausbildung des Nachwuchses geht die Ausbildung des Lehrpersonals voraus. Es müssen Lehrstühle in den interdisziplinären Schnittstellen zwischen Technik, Biologie und Informatik geschaffen werden, flankiert durch Didaktikforschung für den Transfer von Interdisziplinarität.



Handlungsfeld  
Wissenstransfer  
Ausarbeitung  
(PDF-Dokument)

## Mediale Präsenz – Multiplikatoren zur Verbreitung des Wissens und der Vision der Biologischen Transformation

Ängste können nur durch sachliche Informationen identifiziert und abgebaut werden. Es ist daher wichtig, intensiven Kontakt zu Multiplikatoren aus den verschiedenen Medien aufzubauen und zu halten. Eine offene Informationskultur soll den Gedanken der Biologischen Transformation in die Gesellschaft tragen. Neben der Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit braucht die Biologische Transformation insbesondere auch die Aufmerksamkeit und das Interesse der Industrie. Die Vorstellung biointelligenter Wertschöpfungskonzepte auf Branchentreffen, Messen und in Verbänden, industrienahen Publikationskanälen, wie bspw. einem branchenspezifischen »Ratgebers« mit Checklisten und Fallbeispielen wäre sinnvoll. Auch das gezielte Anbieten von Fortbildungsveranstaltungen zur Biotransformation könnte einen gewünschten Verbreitungseffekt bringen. Auf der Forschungsseite muss das Themenfeld durch europäische aber v. a. durch nationale Forschungsförderung und die mediale Vermarktung der Forschungsergebnisse als best practice und mit flankierenden Maßnahmen wie z. B. der Etablierung von neuen Fachkongressen und Wissenschaftspreisen (beginnend bei Schulwettbewerben zur Nachwuchsförderung, Einrichtung von Graduiertenkollegs und Summer Schools etc.) verbreitet werden. Hierbei sind die Gründung von Netzwerken, Fachgesellschaften, Verbänden etc. auf nationaler und internationaler Ebene essentiell.



### Next Steps – Schaffung eines gesellschaftlichen Momentums für den Transformationsprozess durch öffentliche Präsenz

Die Biologische Transformation kann nur gelingen, wenn man sie von Beginn an auf allen Ebenen des gesellschaftlichen Lebens wahrnimmt. Enorm wichtig ist hier die Verknüpfung zur Nachhaltigkeit als rationale Begründung für ihre Notwendigkeit und für eine positive Wahrnehmung. Für die Initiierung und Koordination der dafür notwendigen Schritte des Wissenstransfers bedarf es einer nationalen Strategie. Der Staat sollte koordiniert und aktiv das Projekt Biologische Transformation steuern und zusammen mit anderen Stakeholdern vorantreiben. Wenn die Vision der biointelligenten Wertschöpfung in Kombination mit einem grundlegenden Verständnis der Basistechnologien und Grundzusammenhänge gesellschaftlich verankert und in der Industrie umgesetzt wird, kann ein gesellschaftliches Momentum erzeugt werden, das den Prozess zunächst initiiert und dann weiterträgt.

»Interdisziplinarität und applikationsspezifische Ausbildungsstrukturen sind Schlüsselfaktoren für eine erfolgreiche Biologische Transformation. Dennoch ist eine solide Grundlagenausbildung gerade in Schlüsseldisziplinen wie z. B. der Systembiologie oder der Bioinformatik weiterhin entscheidend.«

*(Dr. Uwe Gottschalk, Chief Scientific Officer, Lonza AG)*

## ANWENDUNGSBEISPIEL 5

Dezentrale Erzeugung von personalisierten Pharmazeutika – Gesundheit und Ernährung wachsen zusammen  
Im Zuge der Biologischen Transformation wachsen die Bedürfnisfelder Gesundheit und Ernährung zusammen.  
Die Personalisierung von Medizin und Ernährung, intelligente Diagnostik sowie die verbesserte Erhebung von menschlichen Bio- und Gesundheitsdaten werden die Medizin revolutionieren.

### Heute

In der Pharma- und Gesundheitsindustrie ist die Biologische Transformation bereits in vollem Gange. Biologische Verfahren verdrängen seit Jahren chemische Prozesse. Obgleich eine Vielzahl der Medikamente heute zwar biologisch hergestellt wird, sind die Herstellungsprozesse zumeist unflexibel und auf Massenproduktion ausgelegt. Produziert wird nur, wenn es auch wirtschaftlich sinnvoll ist, d. h. eine ausreichende Anzahl an auftretenden Erkrankungen vorliegt (Economy of Scale). Die Pharmazeutika sind zudem weder individuell noch variabel, es erfolgt eine einheitliche Dosierung und Anwendung nach Beipackzettel, die für möglichst viele der Patienten akzeptabel ist. Die Individualität der Patienten kann mit dieser Form der Produktion nicht berücksichtigt werden.

### Morgen

Medizinische Produkte können mittels agilen und adaptiven Bioreaktoren dezentral und biotechnologisch hergestellt werden. Personalisierte Medizin mit individuell angepasster Verabreichung und Zusammensetzung (Online-Messungen und adaptive Dosierungsanpassung) zum Standard. Eine intelligente Diagnostik mittels lernender Algorithmen und Big-Data-Technologien (Datensammlung- und Verarbeitung der gesammelten Erfahrungen) legt die Basis. Die Flexibilität und Vielfalt der Arzneimittel durch eine günstige und individualisierte Entwicklung und Produktion wird durch Genome-Editing-Technologien möglich. Die Akzeptanz gegenüber diesen umstrittenen Technologien wird im Gesundheitsbereich früher erreicht werden als für Konsumprodukte. Nach einer ausreichenden Erprobung und dem sichtbaren Erfolg dieser Technologien wird auch die Ernährung durch diese Technologien verändert werden. Neben der Krankheitsvorbeugung durch individuell optimierte Ernährung, die auf den Technologien der Smart Biomanufacturing Devices und hocheffizienten Horticulture-Anlagen fußt, wird die Aufnahme von Medikamenten durch die Nahrung möglich (z. B. mittels Gene Pharming). Diese beiden Bedürfnisfelder gehen damit mehr und mehr ineinander über.

Beispiele aus der Praxis: Die Machine Learning-Plattform BOSS des schweizerischen Unternehmens **SimplicityBio** analysiert bereits heute Biodaten, um Wissen und Erkenntnisse zu gewinnen, die zum besseren Verständnis von Krankheiten und der Identifizierung von individuell abgestimmten Arzneimitteln beitragen ([www.simplicitybio.com](http://www.simplicitybio.com)).

# 6 FAZIT UND EMPFEHLUNG

Mit den heutigen Produktionsweisen ist eine nachhaltige Befriedigung der materiellen Bedürfnisse zukünftiger Generationen nicht erreichbar. Möglich wird eine nachhaltige Wertschöpfung nach Ansicht von Experten aber über eine Biologische Transformation der industriellen Wertschöpfung. Die Kernziele der vorliegenden Voruntersuchung waren erstmalig die Schaffung eines gemeinsamen Verständnisses dieses Transformationsprozesses und die Analyse des Status Quo für den Wirtschaftsstandort Deutschland im internationalen Vergleich (Stärken, Schwächen, Chancen, Risiken) zu anderen führenden Industrienationen. Darüber hinaus wurden die Basistechnologien der Biologischen Transformation identifiziert und mögliche Entwicklungspfade für den Transformationsprozess abgeleitet, die den aus der Perspektive Deutschlands besten (Technologieführerschaft), den wahrscheinlichsten (aktive Mitgestaltung) und den schlechtesten Fall (Deutschland als Nachzügler) skizzieren. Die Ergebnisse dieses Prozesses dienen als Basis für die Ableitung eines anzustrebenden Zielzustandes sowie möglichen Handlungsoptionen für Entscheidungsträger in der Forschungspolitik und der Fraunhofer-Gesellschaft zur zukünftigen Gestaltung der Forschungs- und Entwicklungslandschaft und Handlungsempfehlungen für die Fraunhofer-Gesellschaft.

Die Status-Quo-Analyse zeigt, dass deutsche Unternehmen derzeit in vielen relevanten Bereichen, die der Biologischen Transformation zuzuordnen sind, in einer aussichtsreichen Position sind, wenn die richtigen Maßnahmen ergriffen werden. Zu den Stärken Deutschlands im internationalen Vergleich zählen beispielsweise die ausgesprochene Leistungsfähigkeit sowohl in der Grundlagen- als auch in der angewandten Forschung sowie hohe Standards im Bereich Umweltschutz und Nachhaltigkeit. Als Schwäche wird z. B. die Aversion gegenüber potenziellen Risiken und disruptiven Veränderungen erkannt, die zu einer vergleichsweise restriktiven Gesetzgebung führt. Eine Schwäche ist auch eine relativ geringe Akzeptanz in Deutschland für nachhaltige Produkte und Technologien in der Umsetzung, da diese in der Regel etwas teurer sind als konventionelle. Nachhaltigkeit wird somit immer noch zu wenig als Marketinginstrument genutzt. Als Chancen werden unter anderem die Regionalisierung und Ressourceneffizienz durch Kreislaufwirtschaft gesehen und als Risiko ist unter anderem eine nicht beherrschbare, steigende Komplexität der Produktionsprozesse durch die neuartigen Wertschöpfungslösungen zu nennen. Die Biologische Transformation bietet gleichzeitig aber auch eine Chance für die Beherrschung von Komplexität, weil sie durch die Digitalisierung getrieben wird. Durch eine umfangreiche Recherche konnten die Aussagen der befragten Experten mit entsprechenden Zahlen, Daten und Fakten untermauert werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Ergebnis eines umfassenden Biologischen Transformationsprozesses eine zukunftsfähige deutsche Volkswirtschaft und erfolgreiche Industrie sein könnte, wenn die in den vorangegangenen Kapiteln vorgeschlagenen Maßnahmen geprüft bzw. ergriffen werden. Durch die Transformation würde eine Konvergenz von biologischen, technischen und informatorischen Systemen herbeigeführt. Die derzeitigen linearen Produktionssysteme lösen sich voraussichtlich zu dezentralen, intelligenten Produktionszellen (Smart Biomanufacturing Devices) auf. Die Biologische Transformation vollzieht sich dabei in drei komplementären Pfaden: Die Inspiration beinhaltet die zunehmende methodische Nutzung von biologischen Prozessen und Prinzipien als strukturelle Blaupause für Wertschöpfungslösungen. Die Integration äußert sich in der Kombination von biologischen Komponenten (Enzymen, Zellen oder Organismen) mit technischen Systemen in industriellen Wertschöpfungsprozessen. Die Interaktion beschreibt eine intelligente Einbindung von biologischen Komponenten in technische Systeme, die sich durch einen zielgerichteten Informationsaustausch zwischen biologischer, technischer und informatorischer Ebene auszeichnen. Solche sogenannten biointelligenten Systeme werden zu den wesentlichen Innovationen des 21. Jahrhunderts gehören.

Aus Unternehmenssicht ist eine offene Innovationskultur Voraussetzung für die Einführung und Umsetzung von Anregungen aus einer Biologischen Transformation. Ebenso wichtig ist das Erkennen daraus abgeleiteter Chancen und Risiken. Eine wesentliche Grundvoraussetzung ist deshalb eine interdisziplinär besetzte Personalstruktur, vor allem in Forschungs- und Entwicklungsbereichen zur Schaffung von bioinspirierten, biobasierten und biointelligenten Wertschöpfungslösungen. Auf strategischer Ebene müssen sich Unternehmen mit neuen Geschäftsmodellen, Produktionsstrukturen und Wertstoffkreisläufen auseinandersetzen, die aus diesen Wertschöpfungslösungen heraus entstehen werden. Der Forschungsbedarf der Unternehmen liegt dabei im Bereich der Verarbeitung von biobasierten multifunktionalen Materialien, der Erforschung und Entwicklung von Schnittstellen zwischen biologischen und technischen Komponenten, sowie der biologisch inspirierten Datenverarbeitung, auch für die notwendigen Lebenszyklusbetrachtungen. Die Unterstützung durch interdisziplinär ausgerichtete (Forschungs-)Einrichtungen, die solche Wertschöpfungslösungen vordenken und ausarbeiten sowie die Industrie, vor allem kleine und mittlere Unternehmen, bei der Umsetzung der neuen Konzepte unterstützen, wäre wünschenswert.

Um zu einem Vorreiter und Leitmarkt der Biologischen Transformation zu werden, wird empfohlen, ein entsprechendes politisches Rahmenwerk zu schaffen, das beispielsweise durch die in Arbeit befindliche Agenda »Von der Biologie zur Innovation« der Bundesregierung geleistet werden kann. Dazu gehört in einem ersten Schritt die Etablierung eines beratenden Organs für die Bundesregierung und die Ministerien sowie die Ausarbeitung einer nationalen Strategie zur Biologischen Transformation. Als »politisches Signal« werden darüber hinaus Bekanntmachungen zu interdisziplinären Verbundvorhaben in den Handlungsfeldern der Biologischen Transformation empfohlen, deren Fokus auf den identifizierten Basistechnologien liegt.

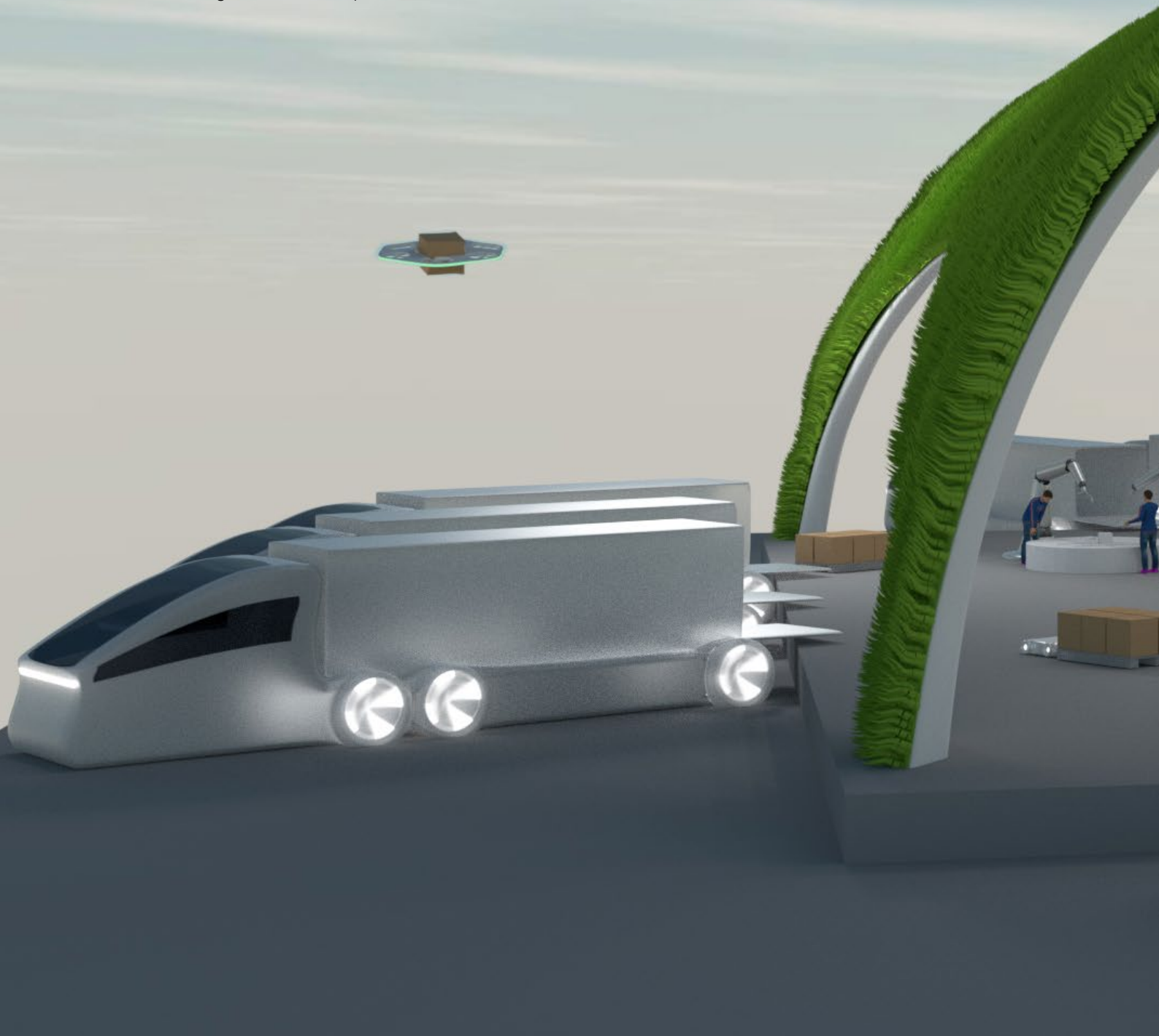
Aus produktionstechnischer Sicht ist beispielsweise ein mögliches Fokusthema die Biointelligente Produktions- und Refabrikationstechnik bzw. -organisation. Hierzu spielen die menschenzentrierte Arbeitsplatzgestaltung und neue Nutzungsmöglichkeiten von bioinspirierten Algorithmen zur Optimierung der Wertschöpfungsorganisation wesentliche Schlüsselrollen. Als weiteres potenzielles Fokusthema ist die Mensch-Technik-Umwelt-Interaktion im Kontext einer biointelligenten Produktion empfehlenswert. Die Entwicklung und Nutzung biobasierter Materialien und die Ausgestaltung zugehöriger Geschäftsmodelle für kreislaufbasierte, dezentrale Wertschöpfungslösungen bilden hier die wesentlichen Schwerpunkte.

In den Forschungsvorhaben sollten dabei Elemente der Handlungsfelder Technikfolgenabschätzung, Geschäftsmodelle, gesamtgesellschaftlicher Dialog und Wissenstransfer verankert werden, um die ökologische und ökonomische Zweckmäßigkeit des Einsatzes neuer Technologien und damit verbundener Geschäftsmodelle bewerten zu können und gesellschaftliche Akzeptanz zu fördern. Mittelfristig werden die Einrichtung von Professuren in den Handlungsfeldern der Biologischen Transformation sowie die Schaffung attraktiver Arbeitsbedingungen für freie und interdisziplinäre Forschung empfohlen. Auf lange Sicht sollte es der Anspruch Deutschlands sein, mindestens zwei interdisziplinäre Forschungs- und Transferzentren zur Biologischen Transformation mit weltweitem Einfluss zu realisieren.

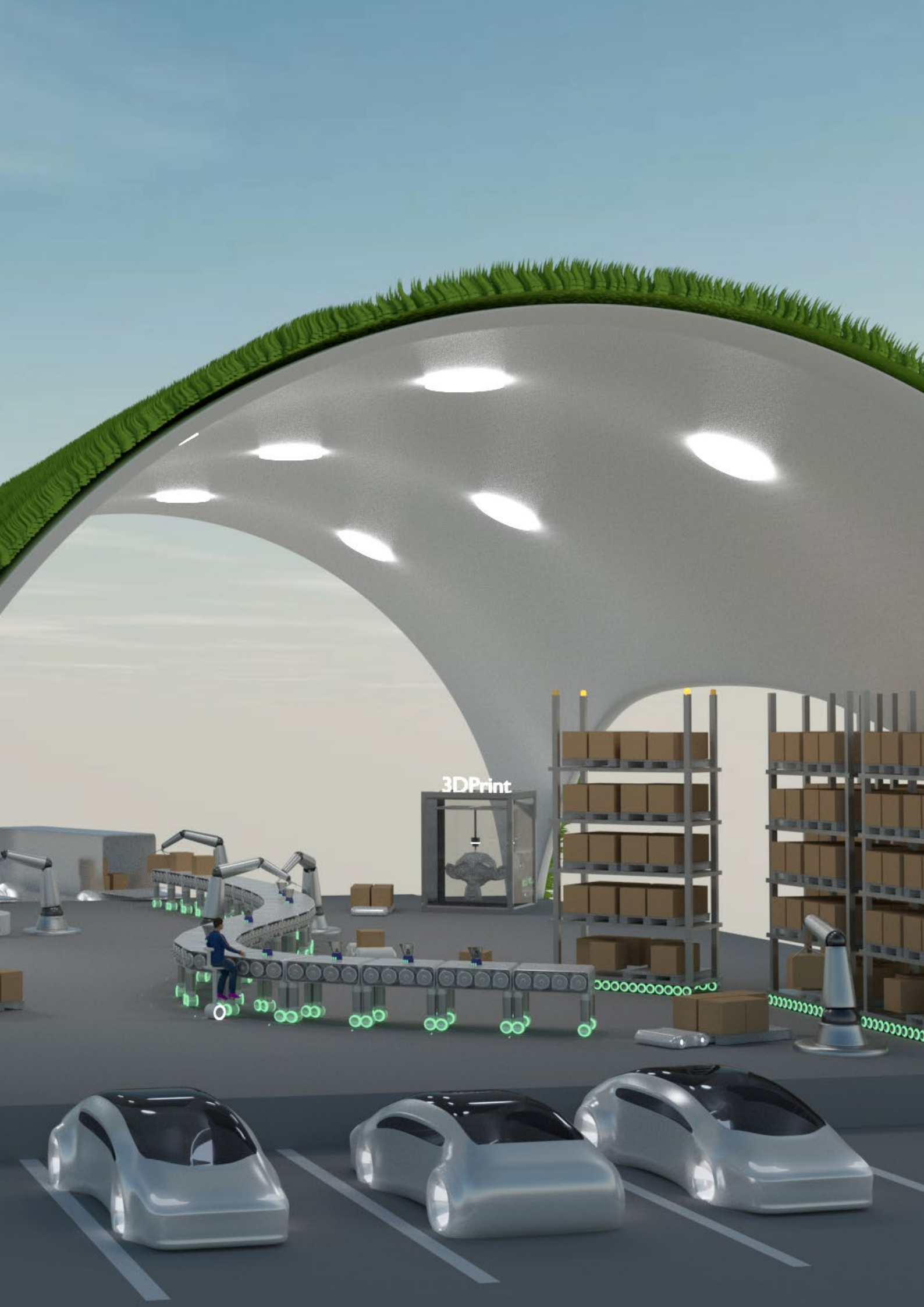
Die BIOTRAIN-Voruntersuchung zeigt zudem deutlich, dass eine restriktive Gesetzgebung (insb. im Bereich der Biotechnologie) ein wesentliches Hemmnis der Biologischen Transformation darstellt. Die Politik sollte sich daher kritisch mit der existierenden Gesetzgebung auseinandersetzen (Bsp.: EUGH-Urteil zu Genome Editing bzw. CRISPR/Cas), um möglicherweise ethisch und sicherheitspolitisch unbegründete gesetzliche Hemmnisse auszuräumen. Ergänzend könnten entsprechende Steuermodelle richtungsweisend für die Umsetzung grüner Technologien wirken.

## **Empfehlungen für die Fraunhofer-Gesellschaft als Bindeglied der Biologischen Transformation zwischen Forschung, Politik und Industrie**

Die Fraunhofer-Gesellschaft sollte sich zum Ziel setzen, die Politik und die Industrie in diesem Transformationsprozess optimal zu unterstützen. Dazu empfehlen wir die Benennung einer koordinierenden Stelle und den Einsatz zentraler Ansprechpartner zur Weiterentwicklung, Moderation und Kommunikation mit den diversen Anspruchsgruppen. In diesem Kontext, sollte das Ziel der Fraunhofer-Gesellschaft sein, die Positionierung als Vorreiterorganisation der Biologischen Transformation in Deutschland und Europa zu festigen. Eine Förderung von weiteren auf die Biologische Transformation aufbauenden Leitprojekten und Clustern, die interdisziplinär ausgerichtet sind, Leuchtturmcharakter besitzen und den Fokus auf Basistechnologien legen, wird in diesem Zusammenhang als zielführend angesehen. In den zehn identifizierten Handlungsfeldern der Biologischen Transformation sollte zudem eine stärkere Förderung der institutsübergreifenden Forschung, vor allem interdisziplinärer Vorhaben, forciert werden. Auf bestehenden Forschungsergebnissen, beispielsweise in der bioinspirierten und biobasierten Produktionstechnik, der Mensch-Maschine-Interaktion und biobasierten Materialentwicklung sollte aufgebaut werden. Darüber hinaus werden interdisziplinäre Begutachtungskommissionen für Vergabeverfahren empfohlen.







3DPrint



# GLOSSAR

**3D-Bioprinting** | Spezielle Form der additiven Fertigung, die es ermöglicht, computergesteuert mit Technologien des Tissue Engineering regelmäßige Strukturen (sogenannte Bioarrays) oder Gewebe aus zuvor gezüchteten einzelnen Zellen herzustellen

**Biodaten** | Hier: physikalische Daten, die Zustände des menschlichen Körpers oder sonstiger Organismen beschreiben

**Bioinformatrisches System** | Komplexes Netzwerk verschiedener Elemente und Einheiten, das sich aus der zielgerichteten Interaktion zwischen biologischer und informatorischer Ebene ergibt.

**Bioinspirierte Wertschöpfung** | Durch eine Imitation natürlicher Phänomene angepasste Wertschöpfung zum Zweck der Lösung essentieller Hausforderungen auf makro- und mikroökonomischer Ebene; Ergebnis des Entwicklungsmodus Imitieren.

**Biointegrierte Wertschöpfung** | Durch Nutzung von Synergien zwischen natürlichen und technischen Prozessen angepasste Wertschöpfung zum Zweck der Lösung essentieller Hausforderungen auf makro- und mikroökonomischer Ebene. Ergebnis des Entwicklungsmodus Integrieren

**Biointelligente Wertschöpfung** | Durch Interaktion biologischer, technischer und informatorischer Prozesse angepasste Wertschöpfung zum Zweck der Lösung essentieller Hausforderungen auf makro- und mikroökonomischer Ebene; Ergebnis des Entwicklungsmodus Interagieren

**Biointelligentes System** | Komplexes Netzwerk verschiedener Elemente und Einheiten, das sich durch eine zielgerichtete Interaktion zwischen biologischer, informatorischer und technischer Ebene auszeichnet. Biointelligente Systeme beinhalten mindestens eine biologische Komponente beinhaltet, die in der Lage ist, einen durch intelligente Informationstechnik regel- bzw. steuerbaren Informationsaustausch mit einem technischen System zu vollziehen (siehe Biologie-Technik-Schnittstelle), sodass ein digitales Abbild dieses Systems bzw. dessen Regelung bzw. Steuerung existiert.

**Biointelligenz** | Verschmelzung der Technik mit der Biologie und der Informationstechnik

**Biologie** | Wissenschaft und Lehre von lebenden Organismen

**Biologie-Technik-Schnittstelle** | Verbindungselement zwischen Technischen und Biologischen Systemen, das zu einem gegenseitigen Austausch von Informationen befähigt

**Biologische Transformation** | Prozess der Wandlung der industriellen Wertschöpfung zum Zweck der Lösung essentieller Hausforderungen auf makro- und mikroökonomischer Ebene; Unterscheidung von drei Entwicklungsmodi: Inspirieren, Integrieren und Interagieren. Fokus auf Wertschöpfungssystemebene (Produkt, Technologie, Unternehmen, Netzwerk, Organisation, Personal)

**Bionik** | Übertragung von Phänomenen der Natur auf die Technik; Unterscheidung von drei Ebenen des Lernens von der Natur: Lernen von den Ergebnissen der Natur, Lernen vom Prozess der Evolution und Lernen von den Prinzipien der Natur

**Bioökonomie** | Transformation einer von fossilen Rohstoffen abhängigen hin zu einer auf nachwachsenden Rohstoffen basierenden Wirtschaft; Zwischenschritt auf dem Weg zu einer flächendeckenden Kreislaufwirtschaft; Fokus auf Gesamtsystemebene (Volkswirtschaft)

**Biotechnisches System** | Komplexes Netzwerk verschiedener Elemente und Einheiten, das sich aus der zielgerichteten Interaktion zwischen biologischer und technischer Ebene ergibt

**Biotechnologie** | Interdisziplinäre Wissenschaft, die sich mit der Nutzung von Enzymen, Zellen und ganzen Organismen in technischen Anwendungen beschäftigt. Unterscheidung von roter, weißer, grüner, grauer, blauer und gelber Biotechnologie

**Blaue Biotechnologie** | Anwendung der Methoden der Biotechnologie auf Lebewesen aus dem Meer

**Cradle-to-Cradle** | Prinzip der Kreislaufwirtschaft (von der Wiege bis zur Wiege). Unterscheidung von technischem und biologischem Kreislauf

**DNA / DNS** | Abk. Desoxyribonukleinsäuren, hochpolymere Kettenmoleküle (Biopolymere), die die Fähigkeit zur identischen Reduplikation besitzen und bei fast allen Organismen (Leben) und Viren Träger der genetischen Information sind

**Digitale Transformation** | Veränderungen von Wertschöpfungssystemen (Unternehmen, Prozessen, Produkten, Technologien, Netzwerken) durch zunehmende Nutzung digitaler Geräte (informationstechnische Vernetzung produktionstechnischer Anlagen). Synonyme: Digitalisierung

**Digitalisierung** | Siehe Digitale Transformation

**Elementarfluss** | Stoff oder Energie, der bzw. die einem in einer Ökobilanzstudie untersuchten Produktsystem zugeführt wird und/oder der Umwelt ohne vorherige Behandlung durch den Menschen entnommen wurde

**Entwicklungsmodus** | Teilprozess der Biologischen Transformation bzw. der zunehmenden Verschmelzung der Disziplinen (Produktions-)technik, Biologie und Informationstechnik

**Enzym** | Organische Biokatalysatoren, meist Proteine, die in Organismen als Katalysatoren an fast allen chemischen Umsetzungen beteiligt sind, indem sie die für den Ablauf jeder chemischen Reaktion erforderliche Aktivierungsenergie herabsetzen

**Gelbe Biotechnologie** | Nutzung von Mikroorganismen zum Zweck der Lebensmittelherstellung

**Graue Biotechnologie** | Nutzung des Stoffwechsels natürlicher Organismen zum Zweck der Beseitigung von Umweltverschmutzungen

**Grüne Biotechnologie** | Anwendung von Mikroorganismen im Agrarsektor zur Züchtung von Pflanzen

**Industrie 4.0** | Digitale Transformation bzw. umfassende Digitalisierung der industriellen Produktion

**Informationstechnisches System** | Komplexes Netzwerk verschiedener Elemente und Einheiten, das sich aus der zielgerichteten Interaktion zwischen informatorischer und technischer Ebene ergibt

**Inspirieren** | Erster Entwicklungsmodus der Biologischen Transformation. Ziel ist die Schaffung einer bioinspirierten Wertschöpfung

**Integrieren** | Zweiter Entwicklungsmodus der Biologischen Transformation. Ziel ist die Schaffung einer biointegrierten Wertschöpfung

**Intelligente Bioproduktionszelle** | Siehe Smart Biomanufacturing Device

**Interagieren** | Dritter Entwicklungsmodus der Biologischen Transformation. Ziel ist die Schaffung einer biointelligenten Wertschöpfung

**Kreislaufwirtschaft** | 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

**Natürliche Ressourcen** | Erneuerbare und nicht erneuerbare Primärrohstoffe, Energieressourcen (Energierohstoffe, strömende Ressourcen, Strahlungsenergie), Luft, Wasser, Fläche/Boden, Biodiversität (genetische Vielfalt, Artenvielfalt, Vielfalt der Ökosysteme), Ökosystemleistungen inklusive der Senkenfunktion der Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft)

**Paradigma** | Grundsätzliche Denkweise und -muster, im industriellen Kontext mit dem Ziel der Lösung einer Wertschöpfungsaufgabe.

**Paradigmenwechsel** | Tiefgreifender wissenschaftstheoretischer und -historischer Wandel, grundlegender Rahmenbedingungen in einem Fachgebiet

**Power-to-X** | Bezeichnung für Technologien zur Speicherung bzw. Nutzung von Stromüberschüssen in Form von chemischen Energieträgern oder Basischemikalien

**Produktionsfaktor** | Materielle und immaterielle Mittel und Leistungen zum Zweck der Produktion von Gütern in einem Wertschöpfungssystem. Bestehend aus Elementarfaktoren und dispositiven Faktoren. Synonym: Ressource

**Produktionstechnik** | Maßnahmen und Einrichtungen zur industriellen Herstellung von Gütern; Entwicklung und Konstruktion der Güter gehen der Produktion voran.

**Prosument** | Ein Prosument (engl. Prosumer) ist ein Verbraucher (Konsument), der professionellere Ansprüche an ein bestimmtes Produkt stellt und mit diesen Ansprüchen bereits in den Produktentstehungsprozess eingreift und daran direkt beteiligt ist.

**Ressource** | Siehe Produktionsfaktor

**Ressourceneffizienz** | Verhältnis eines bestimmten Nutzens zu dem dafür erforderlichen Einsatz an natürlichen Ressourcen

**Rote Biotechnologie** | Nutzung von (gentechnisch veränderten) Mikroorganismen zum Zweck der Wiederherstellung und Erhaltung der menschlichen Gesundheit; derzeit bedeutendster Zweig der Biotechnologie (80 % des dt. Umsatzes)

**Smart Biomanufacturing Device** | Dezentrales Produktionssystem, das organische Reststoffe lokal zu neuen Produkten oder Energie verarbeiten kann. Synonym: Intelligente Bioproduktionszelle.

**Social Networked Industry** | Zielzustand eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems im Kontext der Veränderung der Rolle des Menschen im Zuge der Digitalisierung. Der Mensch steht im Zentrum von Wertschöpfung und Logistik und antizipiert seine spezifischen Fähigkeiten und Bedürfnisse in der Kommunikation und Interaktion mit autonom interagierenden cyber-physischen Systemen.

**System** | Komplexes Netzwerk verschiedener Elemente und Einheiten

**Technikfolgenabschätzung** | Beobachtung und Analyse von Trends in Wissenschaft und Technik und der damit zusammenhängenden gesellschaftlichen Entwicklungen

**Technologiebasierte Bedarfswirtschaft** | Nachhaltige Wirtschaftsform und Zielzustand der Biologischen Transformation der Wertschöpfung

**Tissue Engineering** | (engl. für Gewebekonstruktion bzw. Gewebezüchtung) Überbegriff für die künstliche Herstellung biologischer Gewebe durch die gerichtete Kultivierung von Zellen

**Weißer Biotechnologie** | Industrielle Nutzung der Biotechnologie zum Zweck der Realisierung einer abfall- und schadstofffreien Wertschöpfung; derzeit weit verbreitet in Pharma-, Medizin- und Chemiebranche

**Wertschöpfungssystem** | Gesamtheit aller Elemente und Einheiten eines gerichteten Netzwerks zum Zweck der Realisierung einer ganzheitlichen Wertschöpfung

# BETEILIGTE

## Für die Unterstützung im Beirats oder Begleitkreis danken wir ...

**Prof. Dr. Reiner Anderl**, Präsident, Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz / TU Darmstadt; **Dr. Stefan Breit**, Geschäftsführer Technik, Miele; **Michael Fraede**, Senior Vice President System Technology, Zimmer Group; **Prof. Dr. Jörg Hacker**, Präsident, Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina; **Prof. Dr. Hartmut Hirsch-Kreinsen**, Wirtschafts- und Industriosozologie, TU Dortmund; **Prof. Dr. Antonia Kesel**, Technische Zoologie und Bionik, Hochschule Bremen; **Prof. Dr. Torsten Kröger**, Intelligente Prozessautomatization und Robotik, Karlsruher Institut für Technologie; **Christian Lenges**, Geschäftsentwicklung Biomaterialien, DUPONT; **Dr. Christian Patermann**, EU-Programmdirektor a. D. und Berater; **Prof. Dr. Sabine Pfeiffer**, Institut für Soziologie, FAU Erlangen-Nürnberg; **Prof. Dr. Gunther Reinhart**, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, TU München; **Dr. Kathrin Rübberdt**, Leiterin Biotechnologie und Kommunikation, DECHEMA; **Dr. Hans Jörg Stotz**, Leiter des Bereichs Internet of Things, SAP; **Dr. Ljuba Woppowa**, Geschäftsführerin Technologies of Life Sciences, VDI-TLS; **Dr. Holger Zinke**, Gründer und CEO, BRAIN AG

## Für die Mitarbeit als Experte und/oder Workshopteilnehmer danken wir ...

**Osh. Agabi**, Gründer und CEO, Koniku Inc.; **Dr. Gerd Bachmann**, Technologieberater, Abteilung Zukünftige Technologien Consulting, VDI Technologie-Zentrum GmbH; **Thomas Bächle**, CEO, Sanitätshaus Bächle GbR; **Prof. Dr. Wilhelm Bauer**, Institutsleiter, Fraunhofer IAO; **Prof. Dr. Thomas Bayer**, Dekan Fachbereich Chemieingenieurwesen, Provisdis Hochschule; **Dr. Thomas Behr**, Leiter RD/RTH Hardware & Digital Technologies, Daimler AG; **Dr. Markus Bieri**, Geschäftsführer, ECOBEL GmbH; **Dr. Lars Böttcher**, President R&D Process Technologies, Sartorius; **Jannis Breuninger**, Leiter Produktentwicklung, Mecuris GmbH; **Tobias Brode**, Geschäftsfeldleiter Medizin- und Biotechnik, Fraunhofer IPA; **Prof. Dr. Ralph Bruder**, Institut für Arbeitswissenschaft, TU Darmstadt; **Prof. Dr. Gerald Byrne**, College Principal and Dean of Engineering, University College Dublin (IRL); **Prof. Leo K. Cheng**, Bioengineering Institute, University of Auckland; **Prof. Dr. Lucio Colombi Ciacchi**, Hybrid Materials Interfaces Group, Universität Bremen; **Dr. Rosita Cottone**, Referentin in Referat 511, BMBF; **Prof. Dr. Rüdiger Dillmann**, ehem. Leiter Humanoids and Intelligence Systems Laboratories, Karlsruher Institut für Technologie; **Prof. Dr. Dimitri Dimitrov**, Industrial Engineering, University Stellenbosch (SA); **Kai Uwe Dobbertin**, Produktentwickler, Kurago Biotek; **Frank Eicher**, Betriebsrat, Fraunhofer IPA; **Andreas Eigenberger**, Fachbeirat Medizintechnik, Verein Deutscher Ingenieure e.V.; **Rudolf Einsiedel**, Vertriebsleiter, CORDENKA GmbH; **Helgo Feige**, Projektleiter Symbiofilter, Aqua Light GmbH; **Prof. Robert J. Full**, Center for Interdisciplinary Biological Inspiration in Education and Research (CIBER), UC Berkeley (USA); **Dr. Christoph Glasner**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fraunhofer UMSICHT; **Dr. Uwe Gottschalk**, Chief Scientific Officer, Lonza AG; **Dr. Verena Grimm**, Projektleiterin, BIOREGIO Stern; **Dr. Tim Guhl**, Department Manager Smart Manufacturing and Robotics at Saint-Gobain Sekurit, Saint-Gobain; **Mathias Haas**, Geschäftsführender Gesellschafter, SLOGAN Werbung Marketing Consulting GmbH; **Prof. Dr. Hugo Hämmerle**, Geschäftsführer, Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut (NMI), Universität Tübingen; **Dr. Thomas Helle**, Geschäftsführer, Novis GmbH; **Gihan Hewage**, Bio-based Materials and Chemicals Intelligence, Lux Research Inc.; **Wolf Hirschmann**, Geschäftsführender Gesellschafter, SLOGAN

## ● Beteiligte

Werbung Marketing Consulting GmbH; **Markus Hittmann**, Abteilungsleiter, ANDREAS STIHL AG & Co. KG; **Prof. Dr. Ulrich Holzbaur**, Professor für Nachhaltige Entwicklung, Projektmanagement und quantitative Methoden, Hochschule Aalen; **Dr. Raimund Jäger**, Gruppenleiter Polymertribologie und biomedizinische Materialien, Fraunhofer IWM; **Arnd Jambor**, Leiter Fahrzeug Vorentwicklung i. R., Daimler AG; **Prof. Dr. Albert Jeltsch**, Abteilungsleiter Biochemie, Institut für Biochemie und Technische Biochemie, Universität Stuttgart; **Frank Jirjis**, Gründer, sustainpoint; **Dr. Günter Jordan**, Associated Partner, A.T. Kearney GmbH; **Dr. Peter Klein**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Abteilung Optimierung, Fraunhofer ITWM; Franziska Köppe, Inhaberin, Madiko Lebens- und Arbeitswelten mit Zukunft; **Dr. Hubert Kramer**, Forschungskoodinator, Fraunhofer-Gesellschaft; **Raphael Lang**, Gründer / CTO, BABYBE GmbH; **Dr. Klaus Marx**, ehem. Director Robotic Systems, Robert Bosch GmbH; **Dr. Tino Langer**, Abteilungsleiter, Fraunhofer IWU; **Prof. Dr. Norbert Link**, Group Coordinator, Institute for Applied Research, Karlsruher Institut für Technologie; **Prof. Phillip B. Messersmith**, Bioengineering, Materials Science and Engineering, UC Berkeley (USA); **David Minzenmay**, Corporate Sector Research and Advance Engineering Construction, Robert Bosch GmbH Renningen; **Wolfgang Müller-Pietralla**, Abteilungsleiter Zukunftsforschung, Volkswagen AG; **Dr. Odd Myklebust**, Product and Production Development, SINTEF Raufoss Manufacturing AS (NOR); **Dr. Michaela Noll**, Geschäftsführerin, Amedrix GmbH; **Dr. Klaus-Stephan Otto**, Geschäftsführender Gesellschafter, SLOGAN Werbung Marketing Consulting GmbH; **Prof. Enzo Palombo**, Department of Chemistry and Biotechnology, Swinbourne University of Technology (AUS); **Thomas Pflugfelder**, Senior Consultant / Head of Electric Mobility Infrastructure, Siemens AG; **Prof. Dr. Andreas Pott**, Juniorprofessor am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen, Universität Stuttgart; **Prof. Dr. Ulrich Prahl**, Professor für Umformtechnik, TU Freiberg; **Frank Reinauer**, Leiter Produktion und Innovation Biomaterialien, KLS Martin Group; **Prof. Dominiek Reynaerts**, Head of Micro and Precision Engineering Group, KU Leuven (BEL); **Dr. Stefan Rösler**, Geschäftsführender Gesellschafter, OekoCoach; **Dr. Arne Rost**, Head of Technology Cluster Robotics, BSH Hausgeräte GmbH; **Dr. Elisabeth Saken-Braunstein**, Referentin, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg; **Dr. Walter Schaaf**, Abteilungsleiter Vorentwicklung, J. Schmalz GmbH; **Dr. Jochen Schließer**, Leiter Research Strategy and Innovation Process, Festo AG & Co. KG; **Jürgen R. Schmid**, Geschäftsführender Gesellschafter, Design Tech; **Dr. Ulrike Schmid-Staiger**, Gruppenleiterin Technische Mikrobiologie, Fraunhofer IGB; **Dr. Urs Schneider**, Bereichsleiter, Fraunhofer IPA; **Dr. Hans-Peter Schöner**, Senior Automotive Expert, Daimler AG; »Insight from Outside« – Consulting; **Prof. Dr. Thomas Speck**, Leiter Plant Biomechanics Group und Direktor des Botanischen Gartens, Universität Freiburg; **Claus Spiecker**, Senior Research, Fachhochschule Potsdam; **Dr. Thomas Sommer-Dittrich**, Daimler AG; **Prof. Dr. Rudolf Stauber**, Geschäftsführer, Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie (IWKS); **Dr. Thomas Stegmaier**, Abteilungsleiter, Deutsches Institut für Textil- und Verfahrenstechnik; **Dr. Reinhard Stumpe**, Transfermanager Produktionstechnologie, Wirtschaftsförderung Stuttgart; **Paul Tan**, CEO, NZeno (NZ); **Quirin Tyroller**, BMW AG; **Dr. Ana Lucia Vasquez**, Gruppenleiterin Aseptische Technologien, Fraunhofer IGB; **Prof. Dr. Ernst Ulrich von Weizsäcker**, Ko-Präsident, Club of Rome; **Dr. Manfred Wittenstein**, Vorsitzender des Aufsichtsrats der WITTENSTEIN SE; u. v. m.

*Namentlich genannt wurden nur Personen, die einer Veröffentlichung ihrer Teilnahme zugestimmt haben.*



ISBN 978-3-8396-1433-4



9 783839 614334