

BEAUFTRAGT VOM



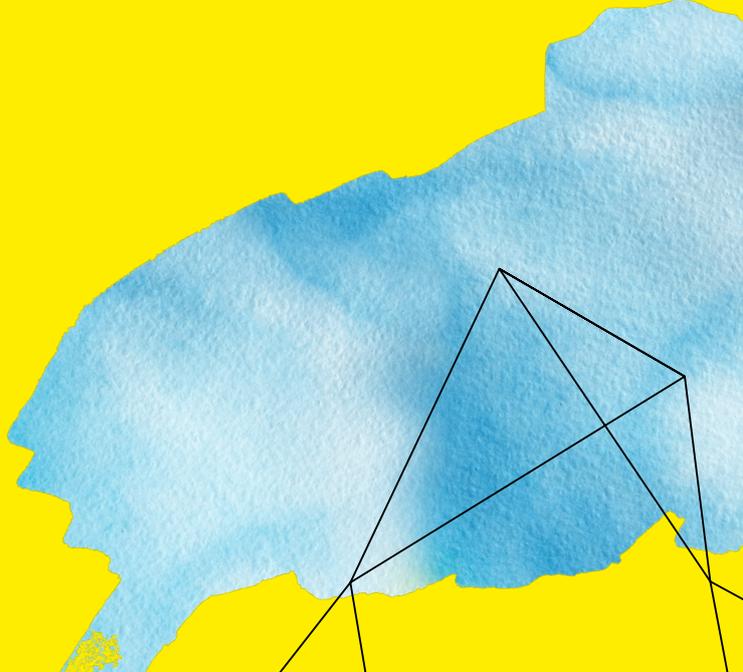
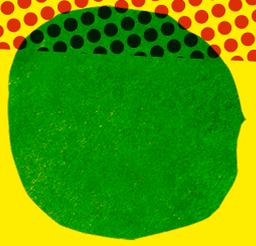
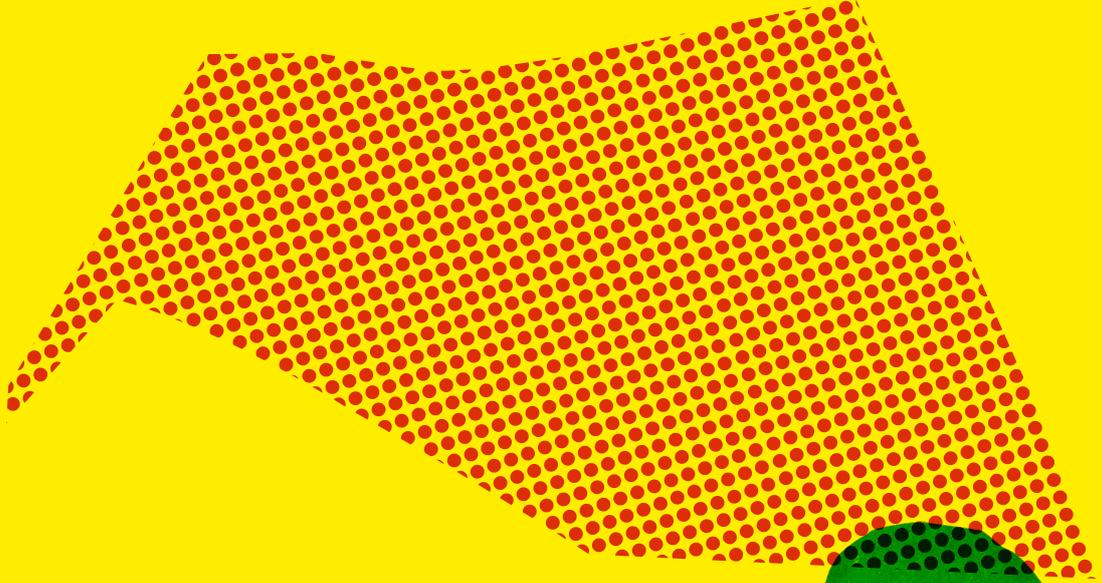
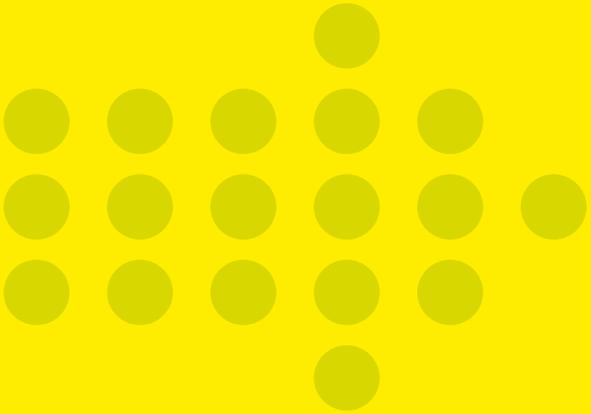
Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



AUF DEM WEG IN EIN HYBRIDES ZEITALTER?

# DIE WECHSELSEITIGE ENTGRENZUNG VON TECHNOLOGIE UND BIOLOGIE

Studie (Kurzfassung)



## **Autorinnen und Autoren:**

Cordula Klaus  
Silvert von Saldern  
Dr. Christian Grünwald  
Michael Astor  
Lennart Galdiga  
Max Irmer  
Julian Sachs  
Jonathan-Aton Talamo

März 2022

Für den Inhalt zeichnen die externen Autorinnen und Autoren verantwortlich. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und die Vollständigkeit der Angaben. Die in der Veröffentlichung geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit der Meinung des BMBF übereinstimmen. Zudem sind die in der Studie skizzierten Szenarien nicht als Prognosen zu verstehen und stellen nicht unbedingt wünschenswerte Zukunftsbilder für die Bundesregierung oder das Zukunftsbüro des BMBF dar.

Diese Publikation entstand im Rahmen des Dienstleistungsauftrags „Zukunftsbüro des Foresight-Prozesses (Foresight III)“ der Prognos AG und der Z\_punkt GmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), Referat – Strategische Vorausschau; Partizipation; Soziale Innovationen.

## Inhaltsverzeichnis

Die wichtigsten Ergebnisse in Kürze .....	2
<b>1 TRANSFORMATION AUF DEM SPRUNG: BIODIGITALE INNOVATIONEN .....</b>	<b>5</b>
<b>2 MÖGLICHKEITSRAUM ZUKUNFT .....</b>	<b>8</b>
2.1 Technology-Push: Zukunftsprägende Technologien .....	9
2.2 Demand-Pull: Zukunftsprägende gesellschaftliche Entwicklungen .....	12
2.3 Entgrenzung in den 2030ern: Anwendungsszenarien .....	14
2.3.1 Anwendungsszenario 1: Der europäische Weg .....	16
2.3.2 Anwendungsszenario 2: Wettbewerbsmodus .....	17
2.3.3 Anwendungsszenario 3: Rückkehr der Blöcke .....	18
2.3.4 Anwendungsszenario 4: Tempounterschiede .....	19
2.3.5 Anwendungsszenario 5: Das Bonus-System .....	20
2.3.6 Anwendungsszenario 6: Regionale Ökologisierung .....	21
<b>3 FORSCHUNGSSTAND UND ENTWICKLUNGSPERSPEKTIVEN .....</b>	<b>22</b>
<b>4 METHODIK .....</b>	<b>24</b>
<b>5 QUELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>26</b>
Ansprechpartnerinnen und Ansprechpartner / Impressum .....	29

## Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1: Zentrale Technologien der Technisierung des Menschen .....	10
Tabelle 2: Zentrale Technologien der Biologisierung von Technik .....	11
Tabelle 3: Übersicht über Gesellschaftstrends .....	13
Abbildung 1: Matrix der biodigitalen Anwendungstechnologien und ihr Auftreten in den Anwendungsszenarien .....	15
Abbildung 2: Überblick über angewandte Methoden .....	25

## Die wichtigsten Ergebnisse in Kürze

### Kernpunkte der Studie

Das Menschengehirn mit WLAN-Schnittstelle und lebendige Roboter mit Gefühlen? Eine seltsame Zukunft kündigt sich an. Deren mögliche Ausprägungsformen auszuleuchten ist Ziel der vorliegenden Studie. Dazu werden **aktuelle technologische und gesellschaftliche Entwicklungen**, die zukünftig zu einer **Entgrenzung von Biologie und Technologie** beitragen könnten, untersucht. In **Anwendungsszenarien** werden diese kontextualisiert: In welchen Lebensbereichen könnten die Technologien in Zukunft eingesetzt werden? Und wie könnte sich infolgedessen der Alltag der Menschen darstellen?

**Die Entgrenzung, das heißt die Verschiebung der Grenzen von Biologie und Technologie, ist kein neues Phänomen, jüngst zeichnet sich jedoch eine neue Dimension der Entgrenzung ab.**

Es findet nicht nur eine zunehmende Konvergenz biologischer und technologischer – insbesondere digitaler – Systeme statt. Ihre Kombination miteinander erfolgt in einer neuen Intensität und Qualität, die immer mehr auf eine beidseitige Verschmelzung abzielt und damit auf das Entstehen hybrider biodigitaler Entitäten.

**Impulse zur Entgrenzung von Biologie und Technologie setzen beide Seiten. Die Fortschritte in den Bereichen stimulieren sich zunehmend wechselseitig.**

- *Technisierung von Biologie (insb. des Menschen):* Lebende Organismen werden durch Eingriffe in die Funktionsweise mithilfe von Technologie optimiert.
- *Biologisierung von Technologie:* (Digitale) Technologien werden durch die Integration von Lebewesen oder Verfahren optimiert, die Eigenschaften lebendiger Organismen hervorrufen.

Aktuelle Forschungserkenntnisse zeigen zwar, dass der Weg zum Durchbruch biodigitaler Innovationen oder sogar „Mischwesen“ noch weit ist. Gleichwohl ist in diesem Gebiet eine zunehmende Forschungsdynamik zu verzeichnen.

**Das wahrgenommene Entgrenzungspotenzial wandelt sich dynamisch mit der Verschiebung des Möglichen.**

Der öffentliche Diskurs zur Entgrenzung unterliegt einem beständigen Wandel: Das, was als Entgrenzung wahrgenommen wird, verändert sich stetig mit dem aktuellen Entwicklungsstand der Technologie sowie ihrer Verbreitung und Akzeptanz. So ist vieles, was früher eine Entgrenzung darstellte, heute bereits Alltag. Grundsätzlich wird die Verschiebung menschlicher Fähigkeiten in der Öffentlichkeit schneller und stärker als Entgrenzung wahrgenommen als umgekehrt die Verschiebung technologischer Grenzen. Zudem werden Technologien, die Leistung steigern oder neue Fähigkeiten ermöglichen, als stärkere Entgrenzung wahrgenommen werden als jene, die versehrte Fähigkeiten wiederherstellen.

**Entgrenzung entsteht nicht im luftleeren Raum. Sie wird beeinflusst durch zukunftsprägende technologische Entwicklungen und Gesellschaftstrends.**

Zum einen verknüpfen biodigitale Anwendungstechnologien wie z. B. smarte Kontaktlinsen, Neuroprothesen und Exoskelette, Gehirnschnittstellen, intelligente Medikamente oder künstliche Organe den menschlichen Körper mit der digitalen Welt (Technisierung von Biologie). Zum anderen wird Technologie in Form von menschenähnlichen Robotern, hybriden Nanorobotern, Technologien zur Datenverarbeitung (z. B. als Biocomputer) oder biologisierte Technologie als Produktionsmittel

(z. B. Zellfabrik) zunehmend lebendiger. Diese Fortschritte treffen auf veränderte Bedürfnisse und Einstellungen der Gesellschaft. Motiviert durch Alterung, Gesundheitstrends, Werteentwicklung und beschleunigte Technologiediffusion steigert sich die Entgrenzungsgeschwindigkeit grundlegend.

**Die biodigitalen Anwendungstechnologien könnten zukünftig ein hohes Veränderungspotenzial für die Gesellschaft entwickeln, vor allem im Themenbereich Gesundheit und Umwelt. Ihre Entwicklungsperspektive ist jedoch von längeren Entwicklungszeiten und Herausforderungen geprägt.**

Publikations- und Patentveröffentlichungen zeigen, dass in den vergangenen Jahren die Forschungsaktivitäten stark angestiegen sind. Bei der Technisierung des Menschen konzentriert sich die Forschung vor allem auf intelligente Medikamente, Exoskelette und Gehirnschnittstellen. Im Bereich Entgrenzung der Technologie fokussieren sich FuE-Aktivitäten auf humanoide und weiche Robotik und Biosensoren. Die Technologien werden heute vor allem für den medizinischen und militärischen Einsatz erforscht, zukünftige Herausforderungen resultieren vor allem auch aus den Bereichen Umwelt und Energie, wobei die Medizin ihren hohen Stellenwert behalten wird.

Größere Herausforderungen für den Markteintritt der biodigitalen Innovationen stellen lange Entwicklungszeiten (Einsatz nach 2030), Skalierbarkeit, die Balance von Nutzen- und Schadpotenzialen (Dual-Use-Technologien) sowie die Demonstration des Mehrwerts gegenüber konventionellen Technologien dar. Themen wie Datenschutz, Cybersicherheit und Kontrollierbarkeit der Technologien sind zentral für eine gesellschaftliche Akzeptanz und Verbreitung und könnten die Entgrenzungsdynamik verlangsamen oder auch stoppen.

**Die Folgen der Entgrenzung wurden an den sechs Anwendungsszenarien gespiegelt. Diese zeigen ein breites Spektrum an möglichen Entgrenzungsdynamiken.**

- **Anwendungsszenario 1: Der europäische Weg**  
Im Deutschland der 2030er-Jahre gelten strenge Technologiestandards. Stark risikobehaftete Technologien, gerade aus dem nicht europäischen

Ausland, sind nicht zugelassen. Viele Technologien tragen das Label „Made in Europe“. Deren Entgrenzungspotenziale sind gering bis moderat.

- **Anwendungsszenario 2: Wettbewerbsmodus**  
Die technologische Dynamik in den 2030er-Jahren in Deutschland ist hoch, ebenso das Entgrenzungspotenzial von Technologien. Solange sich ein echter sozialer oder ökonomischer Mehrwert ergibt und die Risiken einschätzbar bleiben, ist die Verschmelzung von Biologie und Technologie legitim.
- **Anwendungsszenario 3: Rückkehr der Blöcke**  
Im extrem schwierigen geopolitischen Umfeld der 2030er-Jahre ist der primäre Zweck von Entgrenzungstechnologien klar definiert: Sicherheit, Profilierung nach außen und Gewährleistung der nationalen Versorgungssicherheit. Technologische Durchbrüche kommen vor allem aus dem militärischen Bereich.
- **Anwendungsszenario 4: Tempounterschiede**  
Die Verbreitung von Entgrenzungstechnologien in den 2030er-Jahren ist ein Spiegelbild der gesellschaftlichen Polarisierung. Die Wissenselite nutzt sie progressiv in Beruf und Freizeit, die Bevölkerungsteile mit mangelnder Kaufkraft und fehlendem Marktzugang aufgrund der schlecht ausgebauten Infrastrukturen dagegen nicht.
- **Anwendungsszenario 5: Das Bonus-System**  
Entgrenzungstechnologien kommen in Deutschland im Jahr 2030 hauptsächlich zur Daten- und Verhaltenserfassung für das Punktesystem zum Einsatz. Sie steuern, überwachen und geben Optimierungsvorschläge im gesamten Alltag. Auch die Nutzung bestimmter Entgrenzungstechnologien selbst, etwa solcher, die den eigenen ökologischen Fußabdruck verringern, wird vom Punktesystem positiv honoriert.
- **Anwendungsszenario 6: Regionale Ökologisierung**  
Im Deutschland der 2030er-Jahre stammen viele Entgrenzungstechnologien aus regionalen Open-Source-Communities. Das zentrale Einsatzfeld der Entgrenzungstechnologien ist der Umweltschutz. Zusätzlich leisten sie einen wichtigen Beitrag zu neuen Möglichkeiten von Selbstverwirklichung und Teilhabe.

## Über alle Anwendungsszenarien hinweg lassen sich übereinstimmende Elemente der Entgrenzungsdynamik ausmachen.

- In allen Anwendungsszenarien kommen fortschrittliche Formen digitaler Androiden, smarterer Wearables und komfortabler Exoskelette zum Einsatz. Digitale Androiden und smarte Wearables sind bereits heute weit verbreitet. Exoskelette dagegen werden erst vereinzelt in Nischen genutzt.
- Ebenso von hoher zukünftiger Bedeutung sind biohybride, lebende Materialien und Biosensoren. Sie kommen in fünf der sechs Anwendungsszenarien zum Einsatz. Gerade für kritische Herausforderungen in den Bereichen Umwelt und Energie spielen sie eine wichtige Rolle, etwa um die Energieeffizienz von Prozessen zu erhöhen oder die Emission von Schadstoffen zu reduzieren.
- Über die Szenarien hinweg sind neben Umwelt und Energie auch die Bereiche Gesundheit und Arbeit die wichtigsten Anwendungsfelder von Entgrenzungstechnologien. Hier bringen sie einen erheblichen Zugewinn an Kontrolle, Komfort sowie körperlicher und geistiger Entlastung.
- Je stärker die Entgrenzung einer Technologie ist, desto größer sind auch die mit ihrem Einsatz verbundenen Herausforderungen. Der Umgang damit und die Frage, ob eine Technologie zugelassen oder gesellschaftlich akzeptiert wird, ist von Szenario zu Szenario unterschiedlich. Einen großen Einfluss haben die wirtschaftliche Situation und das politische Umfeld innerhalb des jeweiligen Szenarios. Die Entgrenzung könnte vor allem im Themenbereich Gesundheit und Umwelt stattfinden, ihre Entwicklungsperspektive ist jedoch von längeren Entwicklungszeiten und Herausforderungen geprägt.

### Hinweis zur Langfassung der Studie

Dies ist die Kurzfassung der Studie. Eine Langfassung der Studie mit weiteren Details zu den Ergebnissen der Studie sowie zur verwendeten Methodik findet sich zum Download auf [vorausschau.de](http://vorausschau.de).





1

# TRANSFORMATION AUF DEM SPRUNG: BIODIGITALE INNOVATIONEN

Die Suche nach Erklärungen und Lösungen für gesellschaftliche Herausforderungen liegt in der Natur des Menschen. Ebenso das Streben nach Leistungs-optimierung.<sup>1</sup> Aus diesen Motivationen heraus werden bestehende Techniken sowie (menschliche) Fähigkeiten fortlaufend verbessert und erweitert. Eine entscheidende Rolle dabei stellte stets das Phänomen der Entgrenzung – d. h. die Verschiebung von Grenzen – zwischen Technologien und biologischen Systemen dar. Jüngst zeichnet sich eine neue Dimension der Entgrenzung ab: Es findet nicht nur eine zunehmende Konvergenz biologischer und technologischer – insbesondere digitaler – Systeme statt. Ihre Kombination miteinander erfolgt in einer neuen Intensität und Qualität, die immer mehr auf eine beidseitige Verschmelzung abzielt und damit auf das Entstehen hybrider biodigitaler Entitäten.<sup>2</sup>

In vielen Bereichen und mit unterschiedlichen Verfahren wird an einer Verschmelzung biologischer und technologischer bzw. digitaler Elemente ge-

arbeitet. Die Grenzverschiebung erfolgt von beiden Seiten, und Fortschritte stimulieren sich zunehmend wechselseitig:

- **Technisierung von Biologie (insb. des Menschen):** Lebende Organismen werden durch Eingriffe in die Funktionsweise mithilfe von Technologie optimiert (z. B. mit Implantaten, Exoskeletten und Wearables). Neu sind vor allem der Eingriff in zunehmend hochsensible Bereiche, wie etwa in das Gehirn, und die Betrachtung des Menschen als Wesen, das nach vorhersehbaren Regeln und Mechanismen funktioniert, die technologisch repliziert werden können.<sup>3</sup>
- **Biologisierung von Technologie:** (Digitale) Technologien werden durch die Integration von Lebewesen oder Verfahren optimiert, die Eigenschaften lebendiger Organismen hervorrufen (z. B. Selbstorganisation, Selbstheilung, Reproduktion und Kognition). Kern dieses Trends ist die Annäherung der Technologie an ein lebendiges Vorbild in Form, Aussehen, Verhalten oder Fähigkeiten, weswegen teilweise auch von „lebender“ Technologie die Rede ist.<sup>4</sup>

1 Vgl. Fellmann, M.; Krause, T. (2015).

2 Wesentliches Merkmal von Entgrenzung ist der dynamische Entwicklungsverlauf, der sich insbesondere im öffentlichen Diskurs niederschlägt: Das, was als Entgrenzung wahrgenommen wird, verändert sich stetig mit dem aktuellen Stand der Technologie sowie ihrer Verbreitung und Akzeptanz.

3 Vgl. van Est, R. et al. (2011). S. 13 ff.

4 Vgl. van Est, R. et al. (2011) und Bedau, M. A. et al. (2009).

Aktuelle Forschungsbemühungen zeigen zwar, dass der Weg zum Durchbruch biodigitaler Innovationen oder sogar von „Mischwesen“ noch weit ist. Große Hürden finden sich heute etwa im Hinblick auf Kompatibilität zwischen lebenden Organismen und Maschinen. Gleichwohl ist in diesem Gebiet eine zunehmende Forschungsdynamik zu verzeichnen. Sie wird auf der einen Seite befeuert durch transformative wissenschaftliche und technologische Entwicklungssprünge (Technology-Push, siehe Kapitel 2.1) und auf der anderen Seite angetrieben durch verschiedene gesellschaftliche Trends (Demand-Pull, siehe Kapitel 2.2).

### **Künftige Veränderungspotenziale der Entgrenzung**

Die wechselseitige Entgrenzung verspricht, einer tiefgreifenden Erweiterung menschlicher und technologischer Fähigkeiten Vorschub zu leisten. Die Verschmelzung von Biologie und Technologie könnte die Vorteile beider Welten miteinander vereinen. Biologische Organismen und Funktionen könnten in beispiellosem Maße kontrollier- und programmierbar werden und „starre“ Technologien Merkmale von eigenständigem Leben entwickeln. Dabei betreffen biodigitale Innovationsfelder zahlreiche zentrale Lebensbereiche und könnten in einem neuen „hybriden Zeitalter“ unser Verständnis vom Menschen, von der Gesellschaft und der Art zu leben nachhaltig transformieren.<sup>5</sup>

Transformative Anwendungspotenziale ergeben sich etwa aus der Vernetzung von digitaler Technologie und menschlichem Körper (siehe auch Kapitel 2.1 für einzelne technologische Beschreibungen). Gehirnschnittstellen zur direkten Einbindung von Gedanken in den digitalen Informationsfluss, neuartige Wearables zum Biodatenmonitoring und unterstützende Roboteranzüge könnten die menschliche Leistungsfähigkeit auf bisher nie da gewesene Art und Weise optimieren und erweitern. Aber auch in der medizinischen Anwendung könnte die Konvergenz durch intelligente Medikamente, Micro-Roboter, Neuroprothesen und künstliche Organe ein disruptives Potenzial entfalten. Es zeichnet sich die Möglichkeit einer individualisierten und personalisierten Medizin mit reduzierten Kosten und größerer Effizienz des Gesundheitssektors ab.

Demgegenüber könnte die Verbindung biologischer Strukturen mit technologischen Werkzeugen neue Wege für den Einsatz von Technologie in Natur und Umwelt eröffnen. Biosensoren, Micro-Roboter und hybride Solarzellen könnten zukünftig einen nachhaltigen Beitrag für den Klimaschutz, die Biodiversität und Ernährung ermöglichen. Durch eine Biologisierung der Industrie etwa mit Zellen als Produktionsmitteln oder semilebendigen Materialien könnte auch der Fertigungsprozess nachhaltiger gestaltet werden. Während humanoide Roboter und Menschen imitierende Software zu täglichen Interaktionspartnern werden könnten, ist selbst die Datenverarbeitung durch biologische Computer und DNA-Datenspeicherung zukünftig vielleicht ein Gegenstand der Entgrenzung. Die wechselseitige Entgrenzung könnte das Verhältnis von Mensch und Technik, aber auch von Mensch und Natur grundlegend und nachhaltig verändern. Einige Visionen gehen sogar so weit, ein „posthumanistisches Zeitalter“ zu postulieren. Der Mensch bzw. das Gehirn würde dann gänzlich mit superintelligenten Maschinen eins werden und die menschliche Natur dadurch neu definieren.<sup>6</sup>

Die Sprengkraft einer zunehmenden Grenzauflösung zwischen Biologie und Technologie zeigt sich deshalb auch in weitreichenden ethischen und regulatorischen Herausforderungen. Beispiele wären Fragen wie „Inwiefern könnten einzelne Gruppen durch biodigitale Innovationen ausgegrenzt oder soziale Spaltungen befördert werden?“ oder „Welche neuen Erkrankungen könnten entstehen?“. Eine frühzeitige wissenschaftliche und gesellschaftliche Debatte der Entgrenzungsthematik scheint somit unverzichtbar.

#### **Hinweise zur Langfassung der Studie**

Eine detaillierte Definition von Entgrenzung findet sich in Kapitel 2 *Entgrenzung: Die Auflösung der Grenze zwischen Technologie und Biologie* der Langfassung.

5 Vgl. Chui, M.; Evers, M.; Zheng, A. (2020).

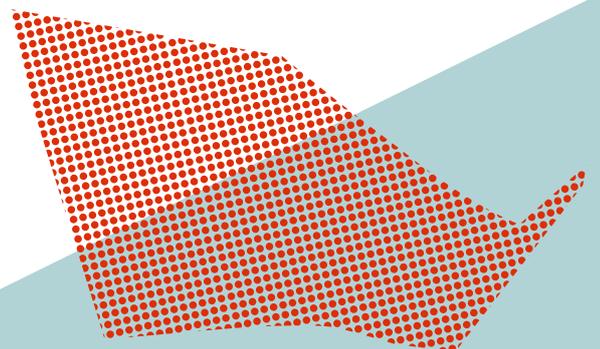
6 Vgl. Dermühl, K. (2015). S. 51, und Kehl, C.; Coenen, C. (2016). S. 143.



## Zielsetzung der Studie

### Die Ziele auf einen Blick

- Darstellung relevanter Trends und Treiber durch die Identifikation von biodigitalen Anwendungstechnologien (Technology-Push) und Gesellschaftsentwicklungen (Demand-Pull)
- Beschreibung des derzeitigen Forschungsstands und zukunftssträchtiger Anwendungsperspektiven der biodigitalen Technologien
- Beschreibung unterschiedlicher Zukünfte (Anwendungsszenarien): Kontextualisierung der Entwicklungsmöglichkeiten relevanter Technologien und Gesellschaftstrends



# 2

## MÖGLICHKEITSRAUM ZUKUNFT

Welche Formen der Entgrenzung sind in Deutschland in den 2030er-Jahren vorstellbar? Welche Technologien könnten hierfür zum Einsatz kommen? Welche gesellschaftlichen Entwicklungen könnten die Akzeptanz dieser Technologien befördern, und welche Anwendungskontexte und Lebensbereiche würden hiervon maßgeblich betroffen sein? Diese und andere Fragen werden in diesem Kapitel beantwortet. Mithilfe von Anwendungsszenarien werden sechs unterschiedliche mögliche Zukunftsbilder zur Entgrenzung in Deutschland in den 2030ern skizziert. Die Erarbeitung der Szenarien (siehe Kapitel 2.3) fußte auf drei wichtigen Säulen:

- Technologien, die für die Entwicklung biodigitaler Innovationen zukunftsprägend sein könnten und ein hohes Entgrenzungspotenzial aufweisen

- Gesellschaftliche Entwicklungen, die die Akzeptanz von entgrenzenden Technologien befördern könnten
- Den Rahmen bildet jeweils eines der sechs Szenarien aus der Studie „Zukunft von Wertvorstellungen der Menschen in unserem Land“<sup>7</sup> (Globalszenarien).

Die Synthese aus den Globalszenarien, den biodigitalen Anwendungstechnologien und den Gesellschaftsentwicklungen erlaubt die Formulierung komplexer Wirkzusammenhänge, aus denen sich die sechs Anwendungsszenarien ergeben. Im Fokus beschreiben diese mögliche Entwicklungen und Auswirkungen von entgrenzenden Technologien in den 2030ern.

7 Prognos AG; Z\_punkt GmbH The Foresight Company (2020).

## 2.1 Technology-Push: Zukunftsprägende Technologien

Begünstigt wird die Verschmelzung von Technologie und Biologie nicht zuletzt durch das zunehmende interdisziplinäre Zusammenspiel der folgenden vier wissenschaftlichen Schlüsselbereiche: Nanotechnologie, Biologie oder auch Biotechnologie, Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) und Kognitionswissenschaften bzw. -technologie, auch bezeichnet als NBIC-Konvergenz. Sie gilt als wesentliche Grundlage neuartiger und vielversprechender (biodigitaler) Innovationen, die auch als „neue Technologiewelle“<sup>8</sup> bezeichnet wird. In zunehmendem Maße befeuert das synergetische Zusammenspiel der Disziplinen die Entwicklungsmöglichkeiten der jeweils anderen. So erlauben Weiterentwicklungen in den Informationstechnologien den biologischen Wissenschaften, große Datenmengen kosteneffizient zu sammeln, zu verarbeiten und auszuwerten. Fortschritte im Bereich der Lebenswissenschaften wiederum ermöglichen die Anwendung technologischer Konzepte auf Lebewesen wie etwa die passgenaue Programmierung und Synthetisierung von lebenden Organismen.<sup>9</sup> Dabei kann die fortschreitende Entgrenzung von Biologie und Technologie auf wachsender Rechenkapazität, neuen Big-Data- und Cloud-Computing-Entwicklungen sowie einer stetigen Miniaturisierung von Endgeräten und elektronischen Einzelkomponenten aufbauen. Für die künftige Konvergenzdynamik sind daneben insbesondere Fortschritte in den Methoden der Künstlichen Intelligenz relevant, die in einer Vielzahl von Anwendungsfällen die notwendige Datenverarbeitung optimiert.<sup>10</sup>

Aus dem Zusammenspiel dieser Wissenschaften entstehen zunehmend anwendungsoffene Innovationsprozesse, die aus der Verbindung biologischer und technologischer Konzepte grundlegende Zukunftstechnologien schaffen. Um den Möglichkeitsraum einer zukünftigen Gesellschaft darstellen zu können, wurden deshalb zentrale Technologien für die Entgrenzung biologischer und technologischer Systeme identifiziert (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2). Diese wurden im Rahmen der beiden Entgrenzungsdimensionen systematisiert und in übergreifenden Kategorien zusammengefasst.

### Von intelligentem Medikament bis Gehirnschnittstelle: Neue Technologien verknüpfen den menschlichen Körper mit der digitalen Welt

Die Anwendungstechnologien zur Verbindung des menschlichen Körpers mit technologischen Artefakten erfüllen zum einen medizinische Motivationen und zielen zum anderen auf die Reproduktion (versetzter) biologischer Funktionen. So wurden bereits große Fortschritte bei der Erstellung smarter Medizin, von Neuroprothesen und synthetischen Körperersatzprodukten erreicht. Intelligente Medikamente könnten zukünftig die effiziente und individuelle Therapie von Erkrankten ermöglichen, indem Wirkstoffe erst auf digitale Signale von außen freigesetzt oder gezielt an der Schadstelle erstellt werden.<sup>11</sup> Für ähnliche Zwecke werden Micro- und Nanobots entwickelt – also passgenau designte molekulare Roboter, die körperliche Funktionen überwachen und als Vielzweckagenten etwa beim Wirkstofftransport fungieren könnten.<sup>12</sup> Auf Ebene des Gesamtkörpers könnten durch die Verbindung von körpereigenen Nervenbahnen und Prothesen Hilfsmittel mit „lebensechtem Gefühl“ entstehen. Von Maschinenhänden bis zu Retinaimplantaten mit einem erweiterten Funktionsspektrum wäre potenziell sogar eine Steigerung der menschlichen Sinnesorgane ins Übermenschliche denkbar.<sup>13</sup> Innerhalb des Körpers könnten künftig synthetische Organe und künstliches Blut zum Einsatz kommen, um den chronischen Mangel an Spenderorganen zu lindern.<sup>14</sup> Die gezielte Züchtung von Zellen zu künstlichen Organen steht dabei mit Verfahren zum 3D-Druck biologischen Gewebes in Konkurrenz.

Zum anderen zielen Forschungsbestrebungen auf die Steigerung und das Übertreffen bestehender menschlicher Fähigkeiten. Zentral ist dabei der technologische Zugriff auf das menschliche Nervensystem. So stehen Gehirn-Maschine-Schnittstellen im Mittelpunkt einer Entwicklung, die versucht, eine Verbindung zwischen menschlicher Gehirnaktivität

8 Nordmann, A. (2004) und vgl. Roco, M. C.; Bainbridge, W. S. (2002).

9 Nowogrodzki, A. (2018).

10 Webb, S. (2018).

11 Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten und Deutsche Apothekerzeitung (2017). Vgl. auch Entwicklungen des US-amerikanischen Start-ups Proteus in Kooperation mit Novartis.

12 Vgl. Gutierrez, B.; Bermúdez, C. V.; Ureña, Y. R. C. (2017). Vgl. auch Entwicklungen von Unternehmen wie Bionaut Labs.

13 Vgl. Normann, R. A. (2007).

14 Vgl. Wenzel, S.; Schwarz, T. (2020).

**Tabelle 1: Zentrale Technologien der Technisierung des Menschen**

Technologiefeld	Relevante Anwendungstechnologien
(Smarte) Wearables	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Smart Glasses und smarte Kontaktlinsen</li> <li>➤ RFID-Chips und digitale Tattoos</li> </ul>
Exoskelette und (Neuro-)Prothesen	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Exoskelette (mit Gehirnschnittstellen)</li> <li>➤ Motorische und sensorische Prothesen</li> </ul>
Neuroelektrische Schnittstellen	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Nicht invasive, einseitig ableitende oder stimulierende Verfahren (Elektroenzephalografie, transkranielle Magnet- und Gleichstromstimulation, tiefe Hirnstimulation, Elektrozeutika)</li> <li>➤ Invasive bidirektionale Verfahren (Brain-to-Machine-, Brain-to-Brain- und Brain-to-Cloud-Schnittstellen)</li> <li>➤ Whole-Brain-Emulation / Mind-Uploading</li> </ul>
(Flüssige) Organe auf Basis synthetischer Biologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Künstliches Blut und künstliche Organe</li> </ul>
Smarte medizinische Technologien	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Intelligente Medikamente sowie Nano- und Microbots</li> </ul>

Quelle: © Eigene Darstellung Prognos AG und Z\_punkt 2021.

und digitaler Rechenleistung zu schlagen.<sup>15</sup> Zukünftig könnte die Steuerung komplexer (mit dem Körper verbundener) Maschinen wie Drohnen oder Exoskelette durch „Gedankenkraft“ geschehen.<sup>16</sup> Aber auch eine Verbindung von menschlichem Bewusstsein und Internet wäre bei hinreichendem Wissenschaftsfortschritt über Brain-to-Cloud-Interfaces oder Mind-Uploading denkbar. Dabei ist derzeit ungewiss, ob zunächst nur ableitende und nicht invasive Verfahren (z. B. EEG) oder auch stimulierende, invasive und bidirektionale Verfahren auf Akzeptanz der Nutzenden stoßen werden. Aber auch weniger sensible Formen der digitalen Steigerung menschlicher Fähigkeiten werden erforscht. So könnte mit Wearables wie smarten Brillen oder smarten Kontaktlinsen der digitale Informationsfluss reversibel mit dem menschlichen Körper verbunden werden.<sup>17</sup> Auch miniaturisierte Schaltkreise könnten – als digitale Tattoos auf oder als RFID-Chips unter der Haut – den Körper in ein umfassendes digitales Ökosystem des Internets der Dinge und Lebewesen

einbinden.<sup>18</sup> Zu einer Steigerung der Fähigkeiten im mechanischen Sinne könnten vor allem Exoskelette beitragen. Diese am Körper getragenen Maschinen könnten vom Arbeitsplatz bis zum Militär Unterstützung bei körperlicher Tätigkeit gewähren.<sup>19</sup> Insgesamt ergibt sich ein differenziertes Bild des Entgrenzungspotenzials, in dem vor allem von invasiven und irreversiblen Technologien eine starke Wirkung auf das Werteverständnis der Menschen ausgeht.

### **Von Robotern bis Biocomputer: Biosysteme sind Vorbild und Optimierungsmethode für Technik**

Die entgrenzenden Technologien der Biologisierung von Technik vertreten sehr verschiedene Ansätze und fächern sich in drei recht unabhängige Felder auf: Robotik, Biocomputing und biologisierte Produktionsmittel. Roboter werden zusehends menschlicher. Sie lernen das zwei- und vierbeinige Laufen (Laufroboter<sup>20</sup>) oder den „weichen Griff“ und Verformbarkeit

15 Kehl, C. (2016). S. 11 ff. Vgl. auch Bestrebungen von Unternehmen wie Neuralink oder Kerne.

16 Vgl. Collinger, J. L. et al. (2013). Vgl. auch Projekte des Facebook Reality Labs.

17 Vgl. auch experimentelle Entwicklungen von Samsung, Google und Sony oder medizinisch orientierte des Unternehmens Mojo Vision.

18 Vgl. Chadwick, L. (2020). Vgl. Produkte des schwedischen Start-ups Biohax in Kooperation mit NXP Semiconductors.

19 Ergebnisse der Delphi-Befragung. Vgl. auch den Exoskelett-Roboter HAL des Unternehmens Cyberdyne.

20 Vgl. Produkte der Firma Boston Dynamics.

**Tabelle 2: Zentrale Technologien der Biologisierung von Technik**

Technologiefeld	Relevante Anwendungstechnologien
Zentrale Technologien der Biologisierung von Technik	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Laufroboter und weiche Roboter</li> <li>› Humanoide Roboter, Androiden und digitale Androiden</li> </ul>
Micro- und Nanobots aus lebendigem Material	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Biohybride und biologische Roboter</li> <li>› Synthetische Zellen</li> </ul>
Technologien zur Datenverarbeitung	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Biologische (DNA- und RNA-)Computer, hybride Prozessoren, DNA-Datenspeicherung</li> <li>› Biosensoren</li> <li>› Organs-on-a-Chip</li> </ul>
Biologisierte Technologie als Produktionsmittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Biomanufaktur und biohybride Materialien</li> <li>› Semiartifizielle Photosynthese</li> </ul>

Quelle: © Eigene Darstellung Prognos AG und Z\_punkt 2021.

(softe Robotik). Immer größere Anstrengungen werden mit dem Ziel getätigt, sie in menschlicher Umgebung einsetzbar zu machen (humanoide Robotik<sup>21</sup>) oder sie dem Menschen bis zur Verwechselbarkeit anzunähern (Androiden<sup>22</sup>). Mit KI-Software ausgestattet, könnten sie unsere Emotionen verstehen und unseren Alltag von der Einkaufsberatung bis zum Hotelservice bereichern.<sup>23</sup> Dabei ist eine Umsetzung als menschenähnliche Software ohne Roboterkörper (digitale Androiden) für die Begleitung unseres virtuellen Lebens die wahrscheinlichste.<sup>24</sup> Aber auch auf Mikro- und Nanoebene werden Roboter erstellt, zunehmend unter Verwendung von biologischen Strukturen. Als Mikroagenten übernehmen sie im Körper oder in der Natur Aufgaben, für die bisherige technische Instrumente zu groß und zu zerstörerisch waren. Von der nachhaltigen Beseitigung von Umweltverschmutzung bis zur Reinigung von Arterien können biohybride und biologische Roboter oder auch synthetische Zellen als autonome Agenten in menschlichem Interesse handeln.

Das Biocomputing versucht, die Vorteile biologischer Strukturen für die Datenverarbeitung zu nutzen. So soll das Material unserer Gene, die DNA, als Medium

zur Speicherung digitaler Daten genutzt werden. Diese bietet durch platz- und kosteneffiziente langfristige Speichermöglichkeiten einen enormen Vorteil gegenüber derzeitiger Magnetbandspeicherung. Durch DNA-Datenspeicherung könnte ein enormer Anstieg der Datenverarbeitung durch ein weitläufiges Internet der Dinge ermöglicht werden.<sup>25</sup> Biologische Strukturen wie DNA und mRNA sollen jedoch auch selbst als Rechner genutzt werden. Die sogenannten biologischen Computer könnten durch ihre hohe Parallelität und Energieeffizienz eine Alternativtechnologie zum Quantencomputing darstellen. Biosysteme werden derzeit bereits standardmäßig als sogenannte Biosensoren in der Datenverarbeitung eingesetzt. Biosensoren nutzen als Teil ihrer Messtechnik biologische Strukturen, um etwa Umweltbelastung, Lebensmitteltoxine oder Blutzucker zu messen. Durch künftige Erweiterung und spezielles Design könnten Biosensoren umweltverträglich und autonom im Körper und in der Natur eingesetzt werden.<sup>26</sup>

Auch die biodigitale Verknüpfung in der Industrie wird zunehmend erforscht. Im Vordergrund der Biomanufaktur steht die biologische Zelle als neues Produktionssystem. Speziell designte Zellen erstellen gewünschte Produkte oder Verarbeitungsprozesse

21 Vgl. Boston Dynamics Laufroboter „Atlas“ oder Agility Robotics „Digit“.

22 Vgl. Produkte von u. a. Fest oder von BMBF-geförderten Start-ups wie Robotise GmbH, MetraLabs GmbH, Mojin Robotics GmbH etc.

23 Vgl. Sonnenberg, V. (2016).

24 Vgl. Samsungs NEON-Projekt.

25 Vgl. Lee, S. Y. (2019). Insbesondere Microsoft fördert dieses Themenfeld aktiv.

26 Vgl. Ibrahim, A. U. et al. (2020). Vgl. das im „BIO Go“-Programm vom BMBF geförderte Unternehmen Dynamic Biosensors GmbH.

als Teil ihres Stoffwechsels (z. B. Chemikalien, Brenn- oder Wirkstoffe<sup>27</sup>). Mit dem Wechsel zu biobasierten – nachwachsenden – Produktionsmitteln und Werkstoffen könnten in der sogenannten Bioökonomie wichtige Beiträge zur Nachhaltigkeit bei gleichzeitigem Wachstum geleistet werden.<sup>28</sup> Die Werkstoffe selbst sollen als biohybride Materialien lebendig werden. Biologische Zellen und unbelebtes Material werden verschmolzen, um die Vorteile beider Stoffe zu vereinen.<sup>29</sup> Es entstehen etwa selbstheilende Grundstoffe, die sich nach einem inneren Bauplan selbst aufbauen. Das Entgrenzungspotenzial im

Rahmen der Biologisierung besteht vor allem bei autonomen Technologien und solchen, die von biologischen Systemen kaum zu unterscheiden sind.

### Hinweise zur Langfassung der Studie

Eine detaillierte Beschreibung der biodigitalen Anwendungstechnologien findet sich in Kapitel 4 *Steckbriefe der biodigitalen Anwendungstechnologien* der Langfassung.

## 2.2 Demand-Pull: Zukunftsprägende gesellschaftliche Entwicklungen

Die Entwicklung der Zukunftstechnologien und ihre Anwendungsfelder sind nicht unabhängig von gesellschaftlichen Prozessen und Bedürfnisentwicklungen. Neben dem Technologieschub entscheidet sich die Ausrichtung der Innovationsprozesse auch durch den Nachfragesog („Demand-Pull“). Gerade soziale und gesellschaftliche Trends treten durch eine Veränderung des Nachfrageverhaltens in eine komplexe Wechselwirkung mit der Technologieentwicklung. Für die wechselseitige Entgrenzung sind neben großen übergreifenden Dynamiken wie dem demografischen Wandel auch soziale Trends bedeutsam, die sich spezifisch auf Gesundheit und Körperbewusstsein fokussieren. Sich abzeichnende Veränderungen in der gesellschaftlichen Werteorientierung und eine stärkere Technologiedurchdringung des Alltags werden ebenfalls entscheidenden Einfluss auf die künftige Akzeptanz und Entwicklungsrichtung der Entgrenzungstechnologien nehmen (siehe Tabelle 3).

### Alterung, Gesundheitsmessung, Wertewandel und Technologieverbreitung steigern die Nachfrage und Akzeptanz biodigitaler Technologien

Durch den **demografischen Wandel** wird die Zahl der Menschen im jüngeren Alter sinken, während gleichzeitig die Zahl der älteren erheblich steigen wird. Diese Entwicklung wird die Nachfrage nach Technologien erhöhen, die Teilhabe und ein gesundes Leben auch im hohen Alter ermöglichen. Insbesondere im medizinischen Bereich sind Wirkungen auf die Nachfrage und Akzeptanz etwa von intelligenten Medikamenten, Neuroprothesen oder synthetischen Körperersatzprodukten zu erwarten.

Einige enger umgrenzte **Gesundheitstrends** wie die E-Health- und Quantified-Self-Bewegung, der Trend zum Gesundheits-Enhancement und die steigende Akzeptanz von Körperdesign stehen sehr direkt mit biodigitalen Innovationen in Verbindung. E-Health- und Quantified-Self-Bewegung etwa streben nach einem optimalen Nutzen der Digitalisierung in Form der digitalen Durchdringung des Gesundheitsbereichs und der vollständigen Messung von Gesundheitsdaten. Die erhöhte Messbarkeit gesundheitlicher Daten ermöglicht im gleichen Zuge den Trend zur Gesundheitsmaximierung z. B. durch Anreize („Nudging“) bei der Tarifbildung und Boni

27 Vgl. Wu, Y. et al. (2019). Vgl. etwa BASF, Bayer oder AGC Biologics.

28 Vgl. BMBF (2020).

29 Vgl. INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien (2020).

**Tabelle 3: Übersicht über Gesellschaftstrends**

Trendbereich	Konkrete Gesellschaftstrends
Gesamtgesellschaftliche Entwicklung	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Demografischer Wandel</li> </ul>
Gesundheits- und Körpertrends	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ E-Health- und Quantified-Self-Bewegung</li> <li>➤ Steigende gesellschaftliche Akzeptanz von „Körperdesign“</li> <li>➤ Von der Gesunderhaltung zum Enhancement</li> </ul>
Veränderung der Werteorientierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Wachsendes Nachhaltigkeitsbewusstsein</li> <li>➤ Zunehmende Individualisierung</li> <li>➤ Bedeutungsverlust von Religion</li> <li>➤ Professionalisierung von Freizeitaktivitäten</li> </ul>
Allumfassende Verbreitung digitaler Technologien im Alltag	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Smart Living und virtuelle Assistenten</li> <li>➤ Mensch-Maschine-Kollaboration in der Arbeitswelt</li> <li>➤ Verbreitung von Robotik in Erziehung und Pflege</li> <li>➤ Ausbreitung von Mixed Realities</li> </ul>

Quelle: © Eigene Darstellung Prognos AG und Z\_punkt 2021.

für gesunde Lebensstile. Diese Entwicklungen konvergieren mit einer steigenden gesellschaftlichen Akzeptanz und Bedeutung der Körperveränderung. Die weite Verbreitung von plastischer Chirurgie, Tattoos, Piercings oder Bodybuilding könnte ebenso die Grundlage für die Akzeptanz noch umfassenderen „Körperdesigns“ durch technologische „Aufwertung“ bilden. Als Nischenphänomen könnte es durch Do-it-yourself-Biologie (DIY-Biologie) – also biologische, chemische oder technische Eingriffe in Organismen mit dem Ziel der Veränderung und Verbesserung des Körpers – zu Entgrenzungen infolge eines Human Enhancements kommen. DIY-Biologie ermöglicht es auch geübten Amateuren, den Körper zu optimieren.<sup>30</sup> Die Bereitschaft, zur Gesundheitsvorsorge und Selbstoptimierung auch stärkere Eingriffe durchzuführen, dürfte also in Zukunft noch steigen. Die biodigitalen Bewegungen könnten die Technologieadaption von datenproduzierenden Innovationen im Bereich Wearables wie Smart Devices, RFID-Chips und digitalen Tattoos, aber auch von Biosensoren beschleunigen.<sup>31</sup> In stärkeren Szenarien der Entgrenzung ist auch die Verbreitung von Micro- und Nanobots zur individuellen Messung von biologischen Vorgängen im

Körperinneren oder die Steigerung der Sinnesfähigkeiten mit Neuroprothesen denkbar.

In der Gesellschaft zeigen sich ebenso **Veränderungen der Werteorientierung**, die sich verstärkend auf die Akzeptanz entgrenzender Innovationen auswirken könnten. So verstärkt das Web 2.0 mit seinem Potenzial, die Einzelne bzw. den Einzelnen zum Massenmedium werden zu lassen, schon bestehende Individualisierungstendenzen. Eine „Gesellschaft der Singularitäten“ ist im Entstehen, in der aufgrund erhöhter Vergleichbarkeit im Web das Einzigartige prämiert wird und Menschen mit originellen Interessen und kuratierten Biografien gefragt sind.<sup>32</sup> Biodigitale Technologien könnten deshalb in Zukunft dazu verwendet werden, durch Inkorporation von Technologie „besonders“ sein zu können. Wohnumgebungen könnten durch biohybride Materialien personalisiert werden, synthetische Zellen und intelligente Medikamente könnten körperindividuelle Wirkstoffpräparate zielgerichtet freigeben oder Brain-Machine-Interfaces und künstliche Organe die Einzigartigkeit von Körper und Geist befördern. Die steigende Individualisierung deckt sich mit einer schrumpfenden Bedeutung der Religion

30 Zoidl, F. (2019).

31 Ingenieur.de (2019).

32 Reckwitz, A. (2017).

und kirchlicher Autoritäten.<sup>33</sup> Der Verlust von Vertrauen in religiöse Institutionen könnte auch zu einem schwindenden Rückhalt religiös motivierter moralischer Tabus führen und wegen des ausbleibenden Widerstands die Entgrenzungsdynamik weniger hemmen. Das Nachhaltigkeitsbewusstsein der deutschen Gesellschaft wächst unter anderem wegen der näher rückenden Konsequenzen des Klimawandels.<sup>34</sup> Diese Werteumorientierung könnte sich zwiespältig auf die Technologieadaption biogigitaler Innovationen auswirken. So versprechen viele biogigitale Technologien wie das Bio-Manufacturing oder biohybride Materialien eine nachhaltige und umweltschonende Produktion.<sup>35</sup> Auch der Einsatz von Mikro- und Nanoagenten bietet die Chance, globale Umweltprobleme wie Mikroplastik im Weltmeer zu lösen. Allerdings sind die Risiken, die von biologisierten Technologien für bestehende Ökosysteme aufgrund der großen Autonomie und Selbstreplikation ausgehen, beispiellos. Bereits bestehende Bedenken gegenüber genmodifizierten Biosystemen könnten sich ausweiten. Eine für den „Naturzustand“ eintretende Bevölkerung könnte somit den Einsatz von Produkten aus der Konvergenz von Technologie und Biologie verzögern.

Neuartige Technologien verbreiten sich im Zuge der **Digitalisierung schnell und umfassend im Alltag**. So steigt die Bedeutung nicht nur von kollaborativen Robotern bei der Arbeit, sondern es wird auch erhebliches Potenzial von Roboterunterstützung in der Pflege und in der Erziehung gesehen. Auch die Verbreitung von Smart-Living-Systemen, also die

intelligente Vernetzung smarterer Geräte, nimmt zu, und für einen immer größeren Teil der Bevölkerung ist die Unterhaltung mit ihrem Smartphone in nativer Sprache dank Smart Assistants (wie Siri) Normalität. Der Siegeszug der Digitalisierung lässt zunehmend die virtuelle und die physische Welt miteinander verschmelzen, sodass Augmented und Virtual Reality über Hologramme und 3D-Brillen ihre Nische verlassen und ein immer größeres Unterhaltungspublikum anziehen. Diese Berührungspunkte mit neuen und digitalen Technologien könnte den Normalitätsmaßstab in der Mensch-Technik-Interaktion verschieben und zu einem wachsenden Wunsch nach Nähe in der digitalen Welt führen. Grundsätzlich könnte dieser gesellschaftliche Trend alle biogigitalen Anwendungstechnologien betreffen, am ausgeprägtesten könnten aber die digitalisierungsnahen Schnittstellen wie Brain-Machine-Interfaces und die Robotik von der Verschiebung des heute Gängigen profitieren. Gleichzeitig könnte eine zu große biologische Nähe der Innovationen die gesellschaftliche Akzeptanz vermindern, da eine stetige Kontrollierbarkeit von Biosystemen auf dem Niveau technischer Systeme zunächst nicht zu erwarten ist.

#### Hinweise zur Langfassung der Studie

Eine detaillierte Beschreibung der Gesellschaftstrends findet sich in Kapitel 3.2 *Demand-Pull: Zukunftsprägende gesellschaftliche Entwicklungen* der Langfassung.

## 2.3 Entgrenzung in den 2030ern: Anwendungsszenarien

Als Grundlage für die Anwendungsszenarien dienen die sechs Werteszenarien aus der Studie „Zukunft von Wertvorstellungen der Menschen in unserem Land“.<sup>36</sup> Sie beschreiben sechs mögliche Zukunftsbilder der

deutschen Gesellschaft im Jahr 2030. Die unterschiedlichen Rahmenbedingungen innerhalb der Szenarien wirken als zentrale Treiber und Einflussgrößen darauf, wie sich Entgrenzung in Deutschland in den 2030er-Jahren entfalten könnte. Sie sind der globale Orientierungsrahmen für die Anwendungsszenarien. Innerhalb der Anwendungsszenarien werden die folgenden Fragestellungen für die 2030er-Jahre adressiert:

<sup>33</sup> Bundeszentrale für politische Bildung (2020).

<sup>34</sup> Umweltbundesamt (2020).

<sup>35</sup> Cumbers, J. (2020).

<sup>36</sup> Prognos AG; Z\_punkt GmbH The Foresight Company (2020).

**Abbildung 1: Matrix der biodigitalen Anwendungstechnologien und ihr Auftreten in den Anwendungsszenarien**

	Anwendungsszenario					
	1	2	3	4	5	6
	Der europäische Weg	Wettbewerbsmodus	Rückkehr der Blöcke	Tempo-unterschiede	Das Bonus-System	Regionale Ökologisierung
Exoskelette	■	■	■	■	■	■
Smart Glasses und smarte Kontaktlinsen	■	■	■	■	■	■
Sensorische Neuroprothesen					■	
Künstliches Blut	■	■		■	■	
Intelligente Medikamente				■	■	
Nicht invasive, unidirektionale Gehirnschnittstellen	■					
Invasive, bidirektionale Gehirnschnittstellen			■	■		
Mind-Uploading				■		
Brain-Brain-Interfaces						
Künstliche Organe		■	■	■		
Nano-/Microbots		■		■	■	
Transkranielle Magnetstimulation bzw. Gleichstromstimulation		■				
Biohybride Roboter	■		■	■		■
Synthetische Zellen	■	■	■			■
Biosensoren	■	■	■		■	■
Biohybride, lebende Materialien	■	■	■	■		■
Biofabrikation und Bio-Manufacturing	■	■	■			■
Hybride Prozessoren	■					■
DNA-basierte Datenspeicherung			■		■	
Humanoide und weiche Roboter	■	■	■			■
Digitale Androiden	■	■	■	■	■	■
Androiden mit Allround-Funktionalität		■		■		

Quelle: © Eigene Darstellung Prognos AG und Z\_punkt 2021. Blaue Färbung gibt Vorkommen der Anwendungstechnologien im Szenario an.

- Wie entwickelt sich die Entgrenzung in Alltag und Arbeitsleben?
- Welche Rolle spielt die Entgrenzung in Wissenschaft und Forschung?
- Welche Gestalt haben der politische Rahmen und die Regulierung mit Blick auf die Entgrenzung?

Die obige Abbildung gibt einen Gesamtüberblick darüber, welche Technologien in welchen Szenarien zum Einsatz kommen.

**Hinweise zur Langfassung der Studie**

Eine detaillierte Beschreibung der Anwendungsszenarien findet sich in Kapitel 3.3 *Anwendungsszenarien: Entgrenzung in den 2030ern* der Langfassung.

## 2.3.1 Anwendungsszenario 1: Der europäische Weg

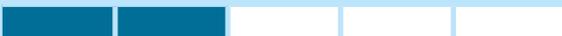


### Szenariorahmen

Wer von Deutschland in den 2030er-Jahren spricht, spricht auch über Europa. Die EU und ihre Mitgliedstaaten verfolgen in einem harten globalen Wettbewerb eine selbstbewusste und eigenständige Industriepolitik.

### Technisierung biologischer Systeme

Entgrenzungspotenzial



Verwendete biodigitale Technologieanwendungen

Nicht invasive Gehirnschnittstellen	Smart Glasses und smarte Kontaktlinsen
Künstliches Blut	Exoskelette

### Biologisierung von Technologie

Entgrenzungspotenzial



Verwendete biodigitale Technologieanwendungen

Digitale Androiden	Humanoide Roboter
Biosensoren	Biofabrikation
Biohybride Materialien	Synthetische Zellen
Biohybride Roboter	Hybride Prozessoren

### Kernpunkte des Szenarios

- Die Menschen in Deutschland sind gegenüber Technologien und Entgrenzung **positiv eingestellt**.
- In Europa gelten **hohe Technologie-Standards**. Das Risikoprofil bestimmt den Einsatz von Technologien. Daher vertrauen die Menschen **Technologien „Made in Europe“**.
- Entgrenzung erfolgt im Vergleich zu anderen Ländern in der **„Light-Version“**: Permanente Transparenz und Kontrolle über Technologien sind wichtige Zulassungskriterien.
- **Enhancement und Entlastung** durch Entgrenzungstechnologien sind stark gefragt, also die Erweiterung bzw. Steigerung „natürlich“ menschlich möglicher Fähigkeiten.
- Umweltschutz ist ein **kontrovers diskutiertes Einsatzfeld** von Entgrenzungstechnologien, gerade mit Blick auf den Einsatz von Technologien, die vermehrt biologische Eigenschaften integrieren. Deren künftige Kontrollierbarkeit ist schwieriger abzuschätzen als jene aus der digitalen Welt.

### Exemplarische Anwendungsfelder der Entgrenzung

#### Arbeit

- Smarte Wearables als „Digital Companions“ mit kontextrelevanten Informationen
- Digitale Androiden als virtuelle Assistenzsysteme
- Biohybride Materialien zur Verbesserung des Arbeitsschutzes
- Körperliche Entlastung

#### Forschung und Entwicklung

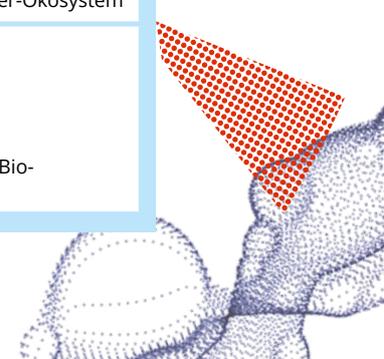
- Biroboter, Organs-on-a-Chip und synthetische Zellen als Alternative zu Tierversuchen
- Künstliche Simulation komplexer natürlicher Systeme für Risikobewertungen
- Biohybride Prozessoren für europäisches Rechner-Ökosystem

#### Gesundheit und Pflege

- Exoskelette in physiotherapeutischen Anwendungen
- Künstliches Blut bei Engpässen bei Bluttransfusionen
- Humanoide Roboter als Unterstützung von Pflegerinnen und Pflegern in der Altenpflege

#### Umwelt und Energie

- Digitale Assistenten für Energieberatung
- Biosensoren für Erfassung von Emissionen
- Biomimetische Energiespeicher
- CO<sub>2</sub>-absorbierende, biohybride Materialien und Bio-Manufacturing (etwa für grünen Wasserstoff)



## 2.3.2 Anwendungsszenario 2: Wettbewerbsmodus



### Szenariorahmen

Deutschland erfährt in den 2030er-Jahren eine Phase neuer ökonomischer Liberalisierung. Die Handlungsmaximen eines fairen Wettbewerbs und Eigeninitiative führen zu neuer wirtschaftlicher Dynamik.

### Kernpunkte des Szenarios

- Selbst ist der Mensch: **Erfindungsgeist und Eigeninitiative** eröffnen ganz neue Dimensionen des technologischen Fortschritts.
- Solange sich ein echter **sozialer oder ökonomischer Mehrwert** ergibt, ist die Verschmelzung von Biologie und Technologie legitim.
- Um den herausfordernden Alltag zu meistern, greifen die Menschen begeistert alles auf, was **Erleichterung** verspricht.
- Der stark kompetenzbasierte und auf kurzfristige Tätigkeiten ausgerichtete Arbeitsmarkt erfordert zunehmend die vorübergehende **Optimierung spezifischer Fähigkeiten**.
- Der Einsatz von Entgrenzungstechnologien schafft **neue Drucksituationen**. Die Risiken des extremen Einsatzes von „biotechnischen Substanzen im beruflichen Kontext“ rufen Kritik hervor.

### Technisierung biologischer Systeme

Entgrenzungspotenzial

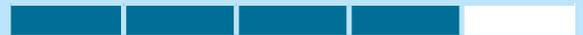


Verwendete biodigitale Technologieanwendungen

Künstliche Organe	Nanobots
Künstliches Blut	Exoskelette
Transkranielle Magnetstimulation	Smart Glasses und smarte Kontaktlinsen

### Biologisierung von Technologie

Entgrenzungspotenzial



Verwendete biodigitale Technologieanwendungen

Digitale Androiden	Humanoide Roboter
Biosensoren	Biofabrikation
Biohybride Materialien	Synthetische Zellen
Androiden mit All-round-Funktionalität	

### Exemplarische Anwendungsfelder der Entgrenzung

#### Freizeit

- Digitale Androiden zur Organisation des Privat- und Familienlebens
- Allround-Androiden in Haushalten als „Butler“
- Extremkletter- und Survivalaktivitäten mit Exoskeletten
- Softe Roboter zur Bewältigung von Stress- und Drucksituationen im Alltag

#### Kommunikation

- Erste Versuche mit 3D-gedruckten Anzügen aus synthetischen Zellen für haptisches Feedback von digitalen Androiden
- Kommunikation zwischen digitalen Androiden von Bürgerinnen und Bürgern sowie Organisationen als Standard

#### Arbeit

- Magnetstimulation zur Optimierung der kognitiven Leistungsfähigkeit und Förderung der Kreativität
- Künstliches Blut und Nanobots zur Steigerung der Konzentrations- und Leistungsfähigkeit

#### Bauen

- Simulation von Stadtplanungsprojekten über selbstlernende, biohybride Computersimulationen
- Biohybride Materialien: Selbstheilung, Energiegenerierung, CO<sub>2</sub>-Absorption durch intelligente Baustoffe





### 2.3.3 Anwendungsszenario 3: Rückkehr der Blöcke



#### Szenariorahmen

Abschottung statt Exportnation: In den 2030er-Jahren ist Deutschland geprägt von sozialen Herausforderungen und einem schwierigen geopolitischen Umfeld.

#### Technisierung biologischer Systeme

Entgrenzungspotenzial



Verwendete biodigitale Technologieanwendungen

Invasive Gehirnschnittstellen	Smart Glasses und smarte Kontaktlinsen
Künstliche Organe	Exoskelette

#### Biologisierung von Technologie

Entgrenzungspotenzial



Verwendete biodigitale Technologieanwendungen

Digitale Androiden	Humanoide Roboter
Biosensoren	Biofabrikation
Biohybride Materialien	Synthetische Zellen
Biohybride Roboter	DNA-basierte Datenspeicherung

#### Kernpunkte des Szenarios

- **Entgrenzung zur Abgrenzung:** Entgrenzungstechnologien dienen vorrangig der nationalen Sicherheit, der Profilierung nach außen und der Gewährleistung der nationalen Versorgung.
- **„Virtuelle Bodyguards“:** Digitale Androiden identifizieren durch fremde KI gestreute Angriffe. Der Staat nutzt sie, damit sich alle an die strengen Sicherheitsvorgaben im Netz halten.
- Hackingsichere **biologische Datenspeicher** erleben einen Boom: Neben den klassischen Mikrochips werden biologische Verbindungen wie Nukleinsäure (DNA) als portable Speicher bzw. als Token für das Freischalten von digital gesicherten Zugängen eingesetzt.
- Technologische Durchbrüche entstehen im Jahr 2030 hauptsächlich durch **militärische Investitionen** zur Vorbereitung auf ein befürchtetes „Cybergeddon“.
- Forscherinnen und Forscher widmen sich der Entwicklung neuer **biohybrider Materialien** zur Verringerung der Abhängigkeit von risikobehafteten Beschaffungsquellen.

#### Exemplarische Anwendungsfelder der Entgrenzung

##### Familie und Freunde

- Wahrnehmung der Anwendung im Privaten als Kontrollverlust
- Entgrenzung als Lebensstil der Elite: digitale Androiden zur Kommunikation oder Verschleierung, Biosensorimplantate zum Vitaldaten-Monitoring

##### Gesundheit

- Etablierung von Exoskeletten als Gesundheitsprävention im Alter
- Softe Roboter mit Empathiefähigkeit zur Behandlung von Einsamkeit
- Einsatz von Smart Glasses zur Diagnose im medizinischen Bereich

##### Militär

- Tests mit künstlichen Organen und synthetischen Zellen zur Heilung bzw. für die Leistungsoptimierung von (digitalen) Soldatinnen und Soldaten

##### Arbeit

- Brain-Computer-Interfaces zur Erstellung von 3D-Modellen durch reine Vorstellungskraft und Weitergabe von Fähigkeiten und Fertigkeiten
- Biohybride Robotik in der Produktion

## 2.3.4 Anwendungsszenario 4: Tempounterschiede



### Szenariorahmen

Ungewollte Bumerangeffekte: In den 2030ern hat der Standort Deutschland infolge geringer Reformaktivität an Attraktivität verloren, während die gesellschaftliche Polarisierung zugenommen hat.

### Kernpunkte des Szenarios

- Die **soziale Polarisierung** in Deutschland in den 2030er-Jahren spiegelt sich auch in der Nutzung und Verbreitung von Entgrenzungstechnologien wider: progressiv in Städten, gering auf dem Land.
- In vielen Unternehmen sind Entgrenzungstechnologien zu einem unverzichtbaren **Teil der Unternehmenskultur** geworden. Ganze Wertschöpfungsprozesse würden ohne sie zusammenbrechen.
- **Roboter prägen den Arbeitsalltag.** Eine Unterscheidung zwischen menschlicher Arbeitskraft und Robotern ist kaum noch möglich. Roboterklone handeln wie ihre menschlichen Pendanten.
- Der zunehmende **Zeit- und Leistungsdruck** zwingt Menschen, noch mehr Technologien zu nutzen, um den wachsenden Anforderungen gerecht zu werden. Der mentale Stress wächst.
- Im Sinne der Wirtschaft: Strenge **Technologie-regulationen bleiben aus**, um progressive Unternehmen nicht abzuschrecken und den Wirtschaftsstandort nicht zu gefährden.

### Technisierung biologischer Systeme

Entgrenzungspotenzial



Verwendete biodigitale Technologieanwendungen

 Invasive Gehirnschnittstellen	 Smart Glasses und smarte Kontaktlinsen
 Mind-Uploading	 Exoskelette
 Nanobots	 Intelligente Medikamente
 Künstliche Organe	 Künstliches Blut

### Biologisierung von Technologie

Entgrenzungspotenzial



Verwendete biodigitale Technologieanwendungen

 Digitale Androiden	 Biohybride Roboter
 Biohybride Materialien	 Androiden mit Allround-Funktionalität

### Exemplarische Anwendungsfelder der Entgrenzung

#### Sicherheit

- Biohybride Sicherheitsroboter als technische Wachleute
- Biohybride Materialien als intelligente Alarmanlagen

#### Arbeit

- Weiterbildung über Daten-Upload in Brain-Computer-Interfaces
- Androiden mit Allround-Funktionalität als menschenähnliche Mitarbeitende
- Digitale Androiden als Verhandlungspartner

#### Umwelt

- Intelligente Medikamente oder Therapien mit künstlichem Blut zur Optimierung des Wärmehaushalts des Körpers zum Schutz vor Extremhitze
- Biohybride Exosuits mit aktiver Klimaregulation
- Klimaadaptive Gebäudehüllen mit biohybriden Materialien

#### Alltag und Freizeit

- Digitale Androiden für virtuelle Spielwelten
- Digitale Androiden als „bester Freund“ oder „beste Freundin“ und universeller Support in allen Lebenslagen (eingebettet in smarten Kontaktlinsen oder invasiven Gehirnschnittstellen)

## 2.3.5 Anwendungsszenario 5: Das Bonus-System



### Szenariorahmen

Ein Punktesystem als zentrales politisches Steuerungsinstrument bestimmt das Deutschland der 2030er-Jahre. Trotz freiwilliger Basis und demokratischer Spielregeln erzeugt es sozialen Druck zur Teilnahme, z. B. über den ständigen Wettbewerb in sozialen Netzwerken.

### Technisierung biologischer Systeme

Entgrenzungspotenzial



Verwendete biodigitale Technologieanwendungen

Sensorische Neuroprothesen	Smart Glasses und smarte Kontaktlinsen
Nanobots	Exoskelette
Intelligente Medikamente	Künstliches Blut

### Biologisierung von Technologie

Entgrenzungspotenzial



Verwendete biodigitale Technologieanwendungen

Digitale Androiden	DNA-basierte Datenspeicherung
Biosensoren	

### Kernpunkte des Szenarios

- Im Bonus-System dienen Entgrenzungstechnologien als ermöglichende Elemente für die **Verhaltens- und Datenerfassung**. Der Umgang mit Technologien im Alltag ist selbstverständlich.
- Ein Leben ohne digitale Assistenzsysteme, personalisierte Avatare oder digitale Androiden ist für die allermeisten Menschen kaum noch vorstellbar. Sie geben regelmäßig **Optimierungsvorschläge**.
- Insbesondere im Gesundheitswesen hat sich der Gedanke der Punkteoptimierung durchgesetzt, ein Paradigmenwechsel vom **behandelnden zum präventiven Gesundheitssystem** hat sich vollzogen.
- Gerade im Kontext des **Umwelt- und Klimaschutz**es wird die Nutzung von Technologien, die das eigene Umweltverhalten dokumentieren, über Punkteanreize belohnt.
- Die Politik zieht oder definiert **ethische Grenzen** entlang von Technologien, wo die Zielerreichung hin zu einer nachhaltigen, gesunden und wettbewerbsfähigen Gesellschaft nicht gefährdet ist.

### Exemplarische Anwendungsfelder der Entgrenzung

#### Freizeit und Konsum

- Autonome Kaufentscheidungen und Freizeitplanungen durch digitale Androiden
- Erfassung des Kauf- und Freizeitverhaltens durch smarte Wearables wie Smart Glasses oder smarte Kontaktlinsen

#### Umwelt und Energie

- Biosensoren zur weitläufigen Erfassung von Emissionen und Materialströmen
- Dokumentation des Konsum- und Wegwerfverhaltens über smarte Wearables

#### Gesundheit und Ernährung

- Nutzung von Exoskeletten bei körperlich anstrengenden Tätigkeiten
- Dokumentation der Gesundheitsdaten durch smarte Wearables und Nanobots
- Entscheidungsunterstützung durch digitale Androiden

## 2.3.6 Anwendungsszenario 6: Regionale Ökologisierung



### Szenariorahmen

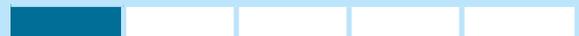
Die Marktwirtschaft ist in den 2030er-Jahren in Deutschland sozial-ökologisch ausgerichtet. Als neue zentrale Indikatoren gelten unter anderem Nachhaltigkeit, Lebensqualität und „Zeitwohlstand“. An diesen orientiert sich fast die gesamte Gesellschaft.

### Kernpunkte des Szenarios

- Die Menschen sehen die fortschreitenden Entgrenzungen durch Technisierung und Biologisierung positiv, wenn sie einen **nachhaltigeren Lebensstil** ermöglicht.
- So ergreifen die Menschen **aufgeschlossen jede technologische Möglichkeit**, die den ökologischen Fußabdruck vermindert und gleichzeitig ein Mehr an Lebensqualität liefert.
- **Entgrenzungstechnologien sind oft lokal zugeschnitten.** Viele Lösungen, z. B. digitale Androiden und korrespondierende Apps, werden crowdbasiert in lokalen Communitys entwickelt.
- Viele der mittlerweile etablierten Technologien gehen auf die **Experimentierfreude** und das schöpferische Wirken von Bürgerinnen und Bürgern zurück.
- Entgrenzungstechnologien leisten nicht nur einen positiven Beitrag zum **Umweltschutz**, sondern bieten auch neue Möglichkeiten zur **Selbstverwirklichung und Teilhabe** von Menschen.

### Technisierung biologischer Systeme

Entgrenzungspotenzial



Verwendete biodigitale Technologieanwendungen

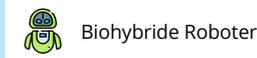
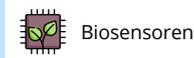
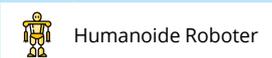


### Biologisierung von Technologie

Entgrenzungspotenzial



Verwendete biodigitale Technologieanwendungen



### Exemplarische Anwendungsfelder der Entgrenzung

#### Industrielle Prozesse

- Biosensoren zur Überwachung des Austritts von Schadstoffen in die Umwelt – auch in der Landwirtschaft
- Kleine Bioroboter zur Schadstoffbekämpfung und Aufbereitung in Abwasser- und Recyclinginfrastrukturen

#### Mobilität

- Exoskelette als neue Form der Mikromobilität (via Verleihsysteme)
- Substitution realer Mobilität durch Entgrenzungstechnologien: virtuelle Treffen mittels weicher, kleidungsähnlicher Exoskelette und Force-Feedback-Funktion

#### Wohnen und Haushalt

- Digitale Androiden für nachhaltiges Energie- und Wärmemanagement
- Energiemanagement durch biohybride Materialien
- Humanoide Roboter zur Unterstützung bei Alltagstätigkeiten und der Pflege von Angehörigen

#### Forschung und Entwicklung

- Intensive Forschung an biohybriden Materialien
- Weite Verbreitung von DNA-Speichern und biologischen Computern
- Experimentieren mit neuen Methoden des Bio-Manufacturing etwa für künstliches Fleisch

# FORSCHUNGSSTAND UND ENTWICKLUNGS- PERSPEKTIVEN

Die identifizierten Anwendungstechnologien der wechselseitigen Entgrenzung generieren ein reges und jährlich steigendes Forschungs- und Patentierungsinteresse. Sowohl die Technisierung des Menschen als auch die Biologisierung der Technologie weisen dabei dynamische Entwicklungsverläufe auf. Gemessen am Publikationsaufkommen in der Forschung zeigt sich die Technisierung des Menschen in den letzten zehn Jahren dynamischer und kann die Biologisierung von Technologie deutlich überholen. Die Biologisierung von Technologie hingegen weist ein höheres Patentierungsaufkommen auf. Dies könnte darauf hinweisen, dass im Bereich der biologisierten Technologie sehr konkrete und eng abgesteckte Einsatzszenarios vorliegen. Demgegenüber könnte die größere Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen zur Technisierung des Menschen darauf deuten, dass ein breiteres Anwendungspotenzial erforscht wird und ein prinzipielles Interesse an den Möglichkeiten der Technisierung des Menschen besteht. Eine zukünftige Wechselwirkung und Synergie beider Entgrenzungsdimensionen deutet sich etwa in den doppelten Nutzungspotenzialen von Micro- und Nanobots mit lebendigen oder unbelebten Materialien im Körper und in der Natur

an. Dabei sind Fortschritte der Entgrenzung einer Seite auch für die Entgrenzung von der anderen Seite verwendbar. Denkbar wäre etwa der Einsatz biohybrider Materialien und Biomanufaktur-Methoden sowohl in der Produktfertigung als auch im Körper, etwa für künstliche Organe.

## Wie Technologie im Körper Einzug hält: rasanter Anstieg der Erforschung intelligenter Medikamente und großes Patentaufkommen für Exoskelette und Gehirnschnittstellen.

Insbesondere für die Technologien zur Technisierung der Menschen gehen viele der Expertinnen und Experten in der Delphi-Befragung von einer Markteinführung noch vor 2030 aus (für neun der zwölf abgefragten Technologien). Nur bidirektionale, invasive Gehirnschnittstellen, Brain-Brain-Interfaces und das Mind-Uploading werden als Zukunftstechnologien mit deutlich längeren Entwicklungszeiten angesehen. Während den marktnäheren Technologien ein mittleres bis hohes Entgrenzungspotenzial zugesprochen wird, ist es für die marktferneren Technologien sogar sehr hoch. Auch in der Publika-

tionstätigkeit zeigt sich ein enormer Anstieg zu Themen der Technisierung des Menschen seit 2017. Dieser Trend wird insbesondere durch eine rasante Steigerung der Publikationsrate im Bereich intelligenter Medikamente mit einem ruckartigen Anstieg um 180 Prozent auf knapp 6.900 Publikationen getrieben. Intelligente Medikamente sind auch in den Patentanmeldungen seit 2017 stark gestiegen, zeigen jedoch im Vergleich zu Exoskeletten und Gehirnschnittstellen ein geringeres jährliches Grundniveau an Patentanmeldungen. Diese Technologien werden wiederum in den Forschungspublikationen weniger stark fokussiert. Gesundheitsrelevante Anwendungstechnologien wie Neuroprothesen, künstliches Blut, künstliche Organe und Micro- bzw. Nanobots weisen kleinere Forschungs-Communitys auf, die in den letzten Jahren eher moderat anwachsen. Im Sinne des Entgrenzungspotenzials wird der Technisierung der Menschen im öffentlichen Diskurs, in den Interviews mit Expertinnen und Experten und der Delphi-Befragung eine größere Relevanz zugesprochen. Dabei wird die Verschiebung menschlicher Fähigkeiten schneller und stärker als Entgrenzung wahrgenommen als umgekehrt die Verschiebung technologischer Grenzen. Dies trifft insbesondere für leistungssteigernde Technologien zu und weniger stark für wiederherstellende Technologien.

### **Technologie wird lebendig: Biosensoren dominieren Forschung und Patente, aber auch die humanoide Robotik bildet einen FuE-Schwerpunkt.**

Die Technologien zur Biologisierung von Technik werden von den Expertinnen und Experten aktuell mehrheitlich weiter vom Markteintritt entfernt beurteilt. Ausnahmen sind Biosensoren, biohybride Materialien, die Biomanufaktur und humanoide Roboter, deren wirtschaftlicher Einsatz schon vor 2030 absehbar erscheint. Auch die Publikationen zur Biologisierung der Technik entwickelten sich weniger dynamisch, verbleiben aber seit langer Zeit mit moderatem Wachstum auf hohem Niveau. Die Patententwicklung hingegen zeigt sich stärker als die Patentzahlen zur Technisierung des Menschen. Hier wie auch in den wissenschaftlichen Publikationen wird die Dynamik von den Beiträgen zu Biosensoren dominiert, die den größten Teil der Publikationen und Patente ausmachen. Patentierungen fanden darüber hinaus vor allem zu Themen

der humanoiden und weichen Robotik sowie der synthetischen Zellen statt. Dies überschneidet sich zum Teil mit dem deutlichen Wachstum, das die Forschungsfelder humanoider und weicher Robotik und die Biomanufaktur verzeichnen konnten. Aber auch kleinste Felder wie die DNA-Datenspeicherung konnten sich mit großem Wachstum als Forschungsfeld etablieren, was sich noch nicht in größeren Patentaktivitäten niederschlägt.

### **Deutschland kann in Europa eine führende Rolle einnehmen, im internationalen Vergleich besetzen derzeit die USA und China die Poleposition.**

Im internationalen Vergleich zeigt sich ein starker wissenschaftlicher Forschungswettbewerb zwischen den USA und China, die in allen biodigitalen Anwendungstechnologien an erster und zweiter Stelle der Veröffentlichungsranglisten stehen. Insbesondere China konnte einen dramatischen Anstieg seiner Publikationsaktivität verzeichnen. Deutschland zeigt grundsätzlich eine recht breite Aufstellung seiner Forschungsaktivitäten und kann sich meist an dritter bis fünfter Stelle positionieren. Gerade in den letzten Jahren konnte Deutschland aber nicht gänzlich mit der dynamischen Entwicklung anderer Länder wie China, aber auch Südkorea mitgehen. In den Patentanmeldungen zeigen sich ebenfalls die USA und Südkorea stark und zeichnen für einen hohen Anteil der gesamten Patente verantwortlich. Die chinesischen Aktivitäten sind ebenfalls besonders häufig unter den Anmeldeländern zu finden. Deutschland kann an dritter Stelle der Anmeldeländer eine führende Rolle in Europa einnehmen. Es zeigt ein höheres Patentierungsaufkommen als etwa Frankreich, Großbritannien oder die Schweiz.

#### **Hinweise zur Langfassung der Studie**

Eine detaillierte Beschreibung zum Forschungsstand und den Entwicklungsperspektiven der biodigitalen Anwendungstechnologien inklusive der zugrunde liegenden Quellen, findet sich in Kapitel 3.1 *Forschungsdynamik und Entwicklungsperspektiven der Anwendungstechnologien* und in Kapitel 4 *Steckbriefe der Anwendungstechnologien der Langfassung*.

# 4

## METHODIK

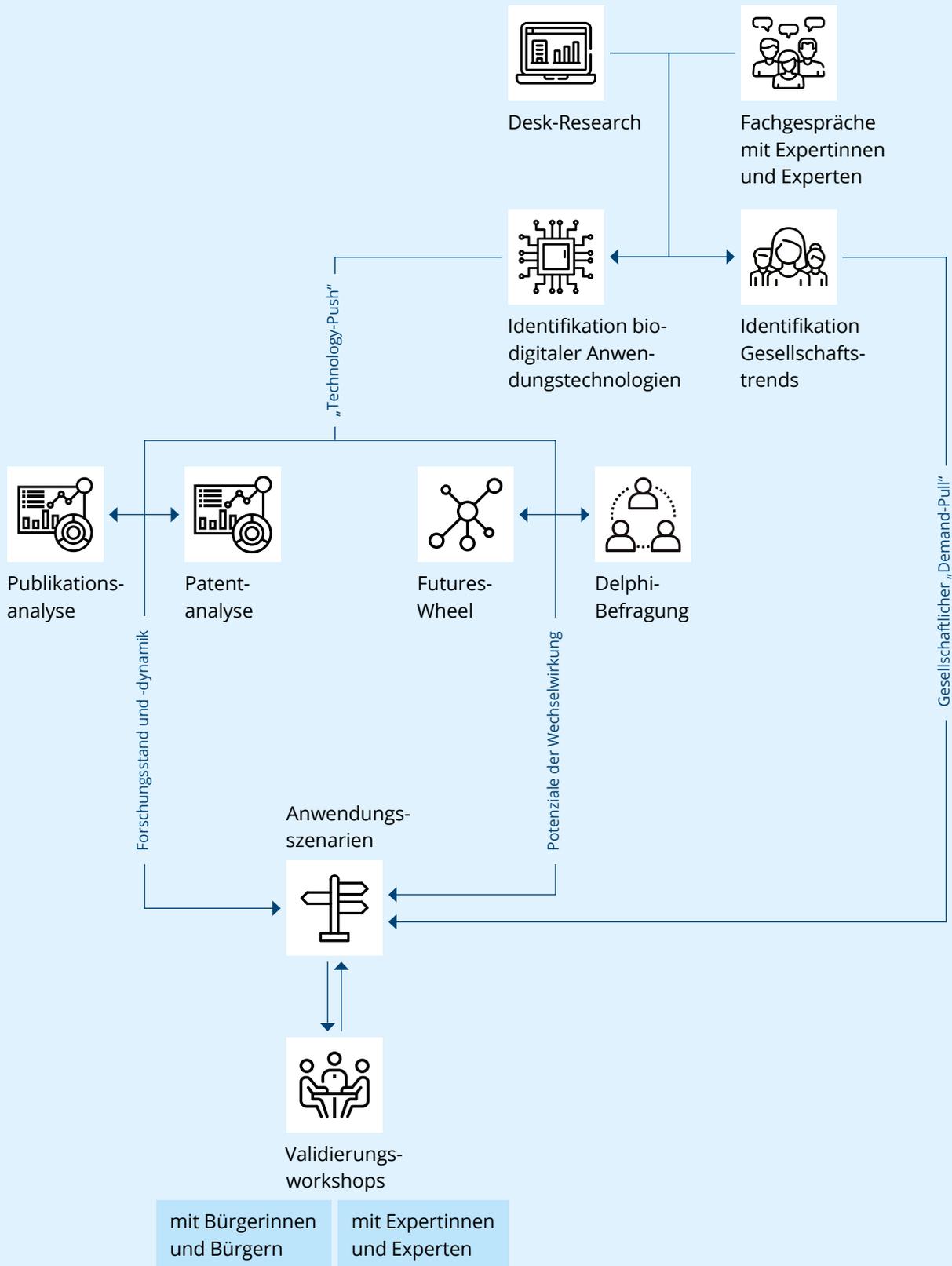
Die Studie stützt sich auf ein umfassendes Methodenrepertoire zum einen aus klassischen, wissenschaftlich fundierten Methoden, wie z. B. der Literatur-, Patent- oder Publikationsanalyse oder den Interviews mit Expertinnen und Experten. Zum anderen kommen etablierte Foresight- und Beteiligungsmethoden zum Einsatz, wie etwa eine Delphi-Befragung, ein Futures-Wheel-Workshop und die Erarbeitung von Anwendungsszenarien sowie ein Validierungsworkshop der Szenarien mit Expertinnen und Experten und ein Workshop mit Bürgerinnen und Bürgern zur Diskussion potenzieller Formen der

zukünftigen Entgrenzung. Explorative und zukunfts-offene sowie dialogorientierte Foresight-Methoden stützen sich folglich auf eine solide empirische Basis, die die Forschungsdynamik nachzeichnet und zugleich Entwicklungsperspektiven erfasst.

### Hinweise zur Langfassung der Studie

Eine detaillierte Beschreibung der Methodik findet sich in Kapitel 5 *Methodik* der Langfassung.

**Abbildung 2: Überblick über angewandte Methoden**



Quelle: © Eigene Darstellung Prognos AG und Z\_punkt 2021.

# QUELLENVERZEICHNIS



Bedau, M. A. et al. (2009). Living Technologies: Exploiting Life's Principles in Technology. *Artificial Life*, 16(1), S. 89–97.

BMBF (2020). Bioökonomie als gesellschaftlicher Wandel. Publikationen. Online unter: [https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/7/24072\\_Biooekonomie\\_als\\_gesellschaftlicher\\_Wandel.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/7/24072_Biooekonomie_als_gesellschaftlicher_Wandel.pdf?__blob=publicationFile&v=3) (Stand: 10.01.2022).

Bundeszentrale für politische Bildung (2020). Religion. Eurobarometer-Umfrage, Angaben in Prozent der Bevölkerung, Deutschland, West- und Ostdeutschland, 2018. Online unter: <https://www.bpb.de/nachschlagen/zahlen-und-fakten/soziale-situation-in-deutschland/145148/religion> (Stand: 01.10.2020).

Chadwick, L. (2020). Will microchip implants be the next big thing in Europe? Euronews. Online unter: <https://www.euronews.com/2020/05/12/will-microchip-implants-be-the-next-big-thing-in-europe> (Stand: 25.11.2020).

Chui, M.; Evers, M.; Zheng, A. (2020): How the Biorevolution could transform global competitive landscapes. McKinsey Global Institute. Online unter: <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/how-the-bio-revolution-could-transform-the-competitive-landscape> (Stand: 10.01.2022).

Collinger, J. L. et al. (2013). High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia. *The Lancet*, 2013, 381. Jg., Nr. 9866. S. 557–564.

Cumbers, J. (2020). The Future of Manufacturing Is Built with Biology. Or, how this Biotech Startup is Challenging the Trillion-Dollar Global Chemical Industry. Online unter: <https://www.forbes.com/sites/johncumbers/2020/04/23/the-future-of-manufacturing-is-built-with-biology-or-how-this-biotech-startup-is-challenging-the-trillion-dollar-global-chemical-industry/?sh=33d411763566> (Stand: 10.01.2022).

Der Spiegel (Online) (2020). Versuche mit Schweinen. Elon Musk präsentiert Gehirn-Computer-Schnittstelle. Online unter: <https://www.spiegel.de/netzwelt/elon-musk-praesentiert-gehirn-computer-schnittstelle-a-e5fe3272-0e5f-4c88-bcde-68be07e1bc81> (Stand: 10.01.2022).

Dermühl, K. (2015). The Body Beyond Nature? Exploration, invasive Technologien, gesellschaftliche Implikationen. Institut Futur, Freie Universität Berlin. Online unter: [https://www.ewi-psy.fu-berlin.de/einrichtungen/weitere/institut-futur/\\_media\\_design/IF-Schriftenreihe/1501\\_iF-Schriftenreihe\\_Dermuehl\\_Body\\_Beyond\\_Nature\\_online.pdf](https://www.ewi-psy.fu-berlin.de/einrichtungen/weitere/institut-futur/_media_design/IF-Schriftenreihe/1501_iF-Schriftenreihe_Dermuehl_Body_Beyond_Nature_online.pdf) (Stand: 10.01.2022).

Deutsche Apothekerzeitung (2017). „Intelligente“ Tablette mit Sensor. Kontrolliert „Big Brother“ bald Daten aus dem Magen? Online unter: <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2017/daz-46-2017/intelligente-tablette-mit-sensor> (Stand: 10.01.2022).

van Est, R. et al. (2011): Making Perfect Life Bio-Engineering (in) the 21st Century. Monitoring Report Phase II. European Parliament. Online unter: [https://www.europarl.europa.eu/stoa/en/document/IPOL-JOIN\\_ET\(2011\)471570](https://www.europarl.europa.eu/stoa/en/document/IPOL-JOIN_ET(2011)471570) (Stand: 10.01.2022).

Fellmann, M.; Krause, T. (2015). Was gibt s denn da zu gucken? Süddeutsche Zeitung Magazin. Online unter: <https://sz-magazin.sueddeutsche.de/wissen/was-gibt-s-denn-da-zu-gucken-81086> (Stand: 03.02.2022).

Gutierrez, B.; Bermúdez, C. V; Ureña, Y. R. C. (2017). Nanobots: development and future. International Journal of Biosensors & Bioelectronics, S. 146–151. Online unter: <https://medcraveonline.com/IJBSBE/nanobots-development-and-future.html> (Stand: 10.01.2022).

Ibrahim, A. U. et al. (2020). Futuristic CRISPR-based biosensing in the cloud and internet of things era: an overview. Multimedia Tools and Applications. Online unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11042-020-09010-5> (Stand: 10.01.2022).

Ingenieur.de (2019). Kontaktlinse mit Akku erkennt körperliche Veränderung. Online unter: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/ittk/kontaktlinse-mit-akku-erkennt-koerperliche-veraenderung/> (Stand: 26.11.2020).

INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien (2020). Living Materials 2020: Programmierbare „Lebende Materialien“ eröffnen neue Möglichkeiten. Online unter: <https://www.leibniz-inm.de/pressemitteilung/living-materials-2020-programmierbare-lebende-materialien-eroeffnen-neue-moeglichkeiten/> (Stand: 10.01.2022).

Kehl, C. (2016). TA-Projekt: Mensch-Maschine-Entgrenzungen. Maschinenmenschen, Menschmaschinen: Science-Fiction oder realistische Möglichkeit? Online unter: [https://www.itas.kit.edu/downloads/tab-brief/tb045\\_kehl15b.pdf](https://www.itas.kit.edu/downloads/tab-brief/tb045_kehl15b.pdf) (Stand: 10.01.2022).

Kehl, C.; Coenen, C. (2016). Technologien und Visionen der Mensch-Maschine-Entgrenzung. Sachstandsbericht zum TA-Projekt: Mensch-Maschine-Entgrenzungen: zwischen künstlicher Intelligenz und Human Enhancement. Arbeitsbericht Nr. 167. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). Online unter: <http://www.itas.kit.edu/pub/v/2016/keco16a.pdf> (Stand: 08.12.2020).

Lee, S. Y. (2019). DNA Data Storage Is Closer Than You Think. Scientific American. Online unter: <https://www.scientificamerican.com/article/dna-data-storage-is-closer-than-you-think/> (Stand: 27.11.2020).

Loeffler, J. (2019). What is DNA Computing, How Does it Work, and Why it's Such a Big Deal. Interesting Engineering. Online unter: <https://interestingengineering.com/what-is-dna-computing-how-does-it-work-and-why-its-such-a-big-deal> (Stand: 23.11.2020).

Nagels, P. (2020). Forscher haben erstmals „lebende“ Mini-Roboter erschaffen. Die Welt. Online unter: <https://www.welt.de/kmpkt/article205068398/Aus-Froschstammzellen-Forscher-haben-erstmal-lebende-Mini-Roboter-erschaffen.html> (Stand: 27.11.2020).

Nordmann, A. (2004). Converging Technologies – Shaping the Future of European Societies. Online unter: [https://www.philosophie.tu-darmstadt.de/media/institut\\_fuer\\_philosophie/diesunddas/nordmann/cteks.pdf](https://www.philosophie.tu-darmstadt.de/media/institut_fuer_philosophie/diesunddas/nordmann/cteks.pdf) (Stand: 07.12.2020).

Normann, R. A. (2007). Technology Insight: future neuroprosthetic therapies for disorders of the nervous system. *Nature Clinical Practice Neurology*, 2007, 3. Jg., Nr. 8, S. 444–452.

Nowogrodzki, A. (2018). The automatic-design tools that are changing synthetic biology. *Nature*, 2018, 564. Jg., Nr. 7735, S. 291–292.

Prognos AG; Z\_punkt GmbH The Foresight Company (2020). Studie: Zukunft von Wertvorstellungen der Menschen in unserem Land. Online unter: [https://www.vorausschau.de/SharedDocs/Downloads/vorausschau/de/BMBF\\_Foresight\\_Wertestudie\\_Langfassung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.vorausschau.de/SharedDocs/Downloads/vorausschau/de/BMBF_Foresight_Wertestudie_Langfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=1) (Stand: 17.01.2022).

Reckwitz, A. (2017). *Die Gesellschaft der Singularitäten*. Berlin: Suhrkamp.

Roco, M. C.; Bainbridge, W. S. (2002). Converging technologies for improving human performance: Integrating from the nanoscale. *Journal of nanoparticle research*, 2002, 4. Jg., Nr. 4, S. 281–295.

Sonnenberg, V. (2016). Humanoide Roboter werden zu vielseitigen Helfern (Interview mit Tamim Asfour, dem Leiter des Lehrstuhls für „Hochperformante Humanoide Technologien“ am Karlsruher Institut für Technologie). Online unter: <https://www.elektronikpraxis.vogel.de/humanoide-roboter-werden-zu-vielseitigen-helfern-a-547886/> (Stand: 10.01.2022).

Umweltbundesamt (2020). Umweltbewusstsein und Umweltverhalten. Online unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/umweltbewusstsein-umweltverhalten> (Stand: 10.01.2022).

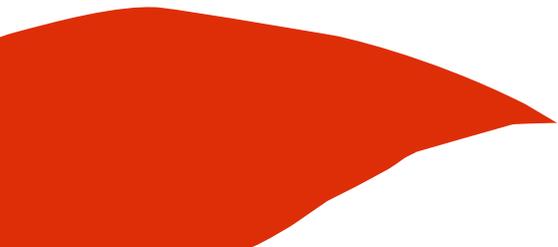
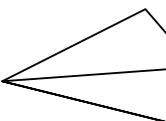
Webb, S. (2018). Deep learning for biology. *Nature*, 2018, 554. Jg., Nr. 7690, S. 554.

Wenzel, S.; Schwarz, T. (2020). Organe züchten. *Planet Wissen*. Online unter: <https://www.planet-wissen.de/gesellschaft/medizin/organverpflanzung/pwieorganezuechten100.html> (Stand: 10.01.2022).

Woopen, C.; Bruder Müller, M.; Jeschke, S.; Jung, M.; Vogel, J. (2020). „Bio-IT-Innovationen“. Impulspapier aus dem Hightech-Forum. Online unter: [https://www.hightech-forum.de/wp-content/uploads/hft\\_impulspapier\\_bio\\_it\\_innovationen.pdf](https://www.hightech-forum.de/wp-content/uploads/hft_impulspapier_bio_it_innovationen.pdf) (Stand: 10.01.2022).

Wu, Y. et al. (2019). Construction of Microbial Cell Factories by Systems and Synthetic Biotechnology. *Systems and Synthetic Biotechnology for Production of Nutraceuticals*, S. 9–43. Online unter: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-0446-4\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-0446-4_2) (Stand: 10.01.2022).

Zoidl, F. (2019). Biohacking: Sich Tag und Nacht selbst optimieren. *Der Standard*. Online unter: <https://www.derstandard.at/story/2000100630835/biohacking-sich-tag-und-nacht-selbst-optimieren> (Stand: 26.11.2020).



## **Ansprechpartnerinnen und Ansprechpartner Kampagnenbüro Strategische Vorausschau**

Torstraße 49, 10119 Berlin

Telefon: +49 30 818777158

E-Mail: kontakt@vorausschau.de  
presse@vorausschau.de

Internet: vorausschau.de

## **Ansprechpartnerinnen und Ansprechpartner Zukunftsbüro**

### **Michael Astor**

Supervision und Gesamtprojektleitung  
bei der Prognos AG

### **Dr. Elena Aminova**

Projektleitung bei der Prognos AG

### **Dr. Christian Grünwald**

Projektleitung bei der Z\_punkt GmbH

## **Impressum**

### **Herausgeber**

Prognos AG  
Europäisches Zentrum für Wirtschaftsforschung  
und Strategieberatung  
Goethestraße 85, 10623 Berlin

Z\_punkt GmbH  
The Foresight Company  
Schanzenstraße 22, 51063 Köln

### **Stand**

Februar 2022

### **Druck**

BMBF

### **Text**

Prognos AG  
Z\_punkt GmbH

### **Gestaltung**

familie redlich AG – Agentur für Marken und Kommunikation  
KOMPAKTMEDIEN – Agentur für Kommunikation GmbH

### **Bildnachweise**

Szenario 1, S. 16:

AdobeStock: olegkruglyak3//DigitalGenetics/majeczka/peresanz/  
GDM photo and video/Arcansél/AlexBr/tippapatt/vitaliy\_melnik/  
cevahir87/evening\_tao/Roman Babakin/Nikolay N. Antonov  
Getty Images: kampee patisena/Lennart van den Berg/500px

Szenario 2, S. 17:

AdobeStock: Animaflora PicsStock/kinwun/THINK b/helivideo/heli-  
video/tridland/Javier/3355m/PixAchi/fizkes/hansenn/Gorodenkoff/  
sveta/chesky/chesky/foxyburrow/unlimit3d/Balint Radu/IRStone/  
joyfotoliakid/motortion/olegkruglyak3/DigitalGenetics/peresanz  
Getty Images: Colin Anderson Productions Pty Ltd/ViewStock/  
BrankoPhoto/Terry Vine/Xia Yang

Szenario 3, S. 18:

AdobeStock: ah\_fotobox/Tiberius Gracchus/ah\_fotobox/vulcanus/  
Viorel Sima/Ljupco Smokovski/theartofpics/slobodan/aapsky/  
De Visu/AGPhotography/batuhan toker/tinkerfrost/mchlskhrv/  
srckomkrit/srckomkrit/Kruwt/franz massard/olegkruglyak3  
Getty Images: Busà Photography/macroworld

Szenario 4, S. 19:

AdobeStock: Valmedia/Chris/yavi/shintartanya/ginton/lehic/  
sharplaninac/kintarapong/leszekglasner/next143/Freepik/  
olegkruglyak3/DigitalGenetics/majeczka/helivideo/tridland/  
batuhan toker/JackF/Iakov Kalinin  
Getty Images: inzheng/Alex Saurel/Kevin Dodge

Szenario 5, S. 20:

AdobeStock: Digital Mammoth/New Africa/VRD/krissikunterbunt/  
Ljupco Smokovski/Wordley Calvo Stock/Freepik/ghoststone/  
contrastwerkstatt/astrossystem/olegkruglyak3/DigitalGenetics  
Getty Images: Ada Summer/Xuanyu Han/funky-data

Szenario 6, S. 21:

AdobeStock: reimax16/reimax16/scharfsinn86/Wolfilser/steuccio79/  
Herr Loeffler/New Africa/olegkruglyak3/majeczka/tridland  
Getty Images: Westend61/Tom Werner/Thanasis Zovoilis/Lennart  
van den Berg/500px

Diese Publikation wird von der Prognos AG und der Z\_punkt  
GmbH kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf  
bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien  
oder Gruppen eingesetzt werden.

