

Studie (Langfassung)

AUF DEM WEG IN EIN HYBRIDES ZEITALTER? DIE WECHSELSEITIGE ENTGRENZUNG VON TECHNOLOGIE UND BIOLOGIE

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.

Autorinnen und Autoren:

Cordula Klaus
Sivert von Saldern
Dr. Christian Grünwald
Michael Astor
Lennart Galdiga
Max Irmer
Julian Sachs
Jonathan-Aton Talamo
[Bundesministerium für Bildung und Forschung]

April 2022

Inhaltsverzeichnis

Die wichtigsten Ergebnisse in Kürze.....	4
1. Einleitung.....	7
1.1 Transformation auf dem Sprung: Biodigitale Innovationen	7
2. Entgrenzung: Die Auflösung der Grenzen zwischen Technologie und Biologie	9
2.1 Merkmale von Entgrenzung	11
2.2 Stufen der Entgrenzung	13
2.2.1 Technisierung biologischer Systeme: Entgrenzung des Menschen	13
2.2.2 Biologisierung technischer Systeme: Entgrenzung von Technologie	15
3. Möglichkeitsraum Zukunft	17
3.1 Technology-Push: Zukunftsprägende Anwendungstechnologien	17
3.2 Demand-Pull: Zukunftsprägende gesellschaftliche Entwicklungen	20
3.2.1 Gesamtgesellschaftliche Entwicklung	20
3.2.2 Gesundheits- und Körpertrends.....	21
3.2.3 Veränderung der Werteorientierung.....	22
3.2.4 Allumfassende Verbreitung digitaler Technologien im Alltag	25
3.3 Anwendungsszenarien: Entgrenzung in den 2030ern	27
3.3.1 Anwendungsszenario 1: Der europäische Weg	29
3.3.2 Anwendungsszenario 2: Wettbewerbsmodus	36
3.3.3 Anwendungsszenario 3: Rückkehr der Blöcke.....	41
3.3.4 Anwendungsszenario 4: Tempounterschiede.....	48
3.3.5 Anwendungsszenario 5: Das Bonus-System	54
3.3.6 Anwendungsszenario 6: Regionale Ökologisierung	60
4. Steckbriefe der biodigitalen Anwendungstechnologien	66
4.1 Technisierung biologischer Systeme: Entgrenzung des Menschen	66
(Smart) Wearables	66
Exoskelette und (Neuro-)Prothesen.....	69
Neuroelektronische Schnittstellen	73
(Flüssige) Organe auf Basis synthetischer Biologie	79
Smarte medizinische Technologien	81
4.2 Biologisierung technischer Systeme: Entgrenzung von Technologie	85
Menschen- und tierähnliche Roboter	85
Micro- und Nanobots aus lebendigen Materialien	90

Technologien zur Datenverarbeitung	93
Biologisierte Technologie als Produktionsmittel	98
5. Methodik	101
6. Glossar	103
7. Quellenverzeichnis	107
8. Anhang	124
Übersicht über die Interviewpartnerinnen und -partner sowie Workshopteilnehmerinnen und -teilnehmer	124
Ansprechpartnerinnen und Ansprechpartner	128
Impressum	129

Die wichtigsten Ergebnisse in Kürze

Kernpunkte der Studie

Das Menschengehirn mit WLAN-Schnittstelle und lebendige Roboter mit Gefühlen? Die nähere Zukunft könnte ganz neue Formen der Verbindung von Biologie und Technologie bereithalten. 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, d. h. 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 (insbesondere 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 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 Technologien 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 verstärkt 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 solche, 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, smarter 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 finden in fünf der sechs Anwendungsszenarien Anwendung. 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.

1. EINLEITUNG

Anfang des Jahres 2020 stellte Elon Musk einen neuen Prototypen seiner Firma Neuralink vor: Ein Chip im Gehirn soll zukünftig als Schnittstelle dienen, um per Bluetooth-Funk Informationen und Gedanken auf einen Computer oder ein Smartphone zu übermitteln. In einer ersten Basisanwendung wurde das Gerät bereits einem Schwein implantiert und Signale erfolgreich transportiert: Jedes Mal, wenn das Schwein etwas mit dem Rüssel berührte, wurden die dazugehörigen Gehirnaktivitäten in Form von elektrischen Signalen auf einem Bildschirm sichtbar. Von hier aus braucht es jedoch noch einige Entwicklungsschritte bis zu Elon Musks Vision: „Ihr werdet eure Erinnerungen speichern und sie möglicherweise auch in einen anderen Körper oder einen Roboter herunterladen können. [...] Die Zukunft wird seltsam sein.“¹

1.1 Transformation auf dem Sprung: Biodigitale Innovationen

In vielen Bereichen und mit unterschiedlichen Verfahren wird an einer Verschmelzung biologischer und technologischer bzw. digitaler Elemente gearbeitet. Die dabei entstehenden biodigitalen Innovationen könnten zukünftig zu einem Aufweichen der Grenzen zwischen technologischen (insbesondere digital-basierten) und biologischen Systemen führen. Diese neue Durchlässigkeit der Grenze wird zudem von beiden Seiten vorangetrieben:

- Einerseits durch den Versuch, den Menschen (bzw. biologische Systeme) zu optimieren, indem der Körper und seine Funktionen mit artifiziellen technologischen Produkten verknüpft oder sogar verschmolzen werden (**Technisierung von Biologie**).
- Andererseits durch die Optimierung von Technologie, indem auf diese Eigenschaften lebender Organismen übertragen werden, bzw. durch den zunehmenden Einsatz lebender Zellen in und für Technologien (**Biologisierung von Technologie**).

Aktuelle Forschungsbemühungen zeigen zwar, dass der Weg zum Durchbruch biodigitaler Innovationen oder sogar von „Mischwesen“ noch weit ist. Große Hürden finden sich heute vor allem noch mit Blick auf die Kompatibilität zwischen lebenden Organismen und Maschinen. Dennoch gibt es in vielen Bereichen Entwicklungen, die als erste Zwischenschritte auf dem Weg zur Entgrenzung von Mensch und Technologie und umgekehrt zu werten sind.

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 Mensch, der Gesellschaft und der Art zu leben transformieren. Disruptive Anwendungspotenziale ergeben sich etwa aus der Vernetzung von Technologie mit dem menschlichen Körper. Gehirnschnittstellen zur direkten Einbindung von Gedanken in den digitalen Informationsfluss, neuartige Wearables zum Biodatenmonitoring und unterstützende Roboteranzüge könnten die menschliche Leistungsfähigkeit optimieren und erweitern. Dem gegenüber könnte die Verbindung biologi-

¹ Der Spiegel (Online) (2020).

scher Strukturen mit technologischen Werkzeugen neue Wege für den Einsatz von Technologie in Natur und Umwelt eröffnen.

Zielsetzung

Die vorliegende Studie untersucht mögliche Zusammenspiele aktueller technologischer Entwicklungen und sich abzeichnender Gesellschaftstrends, die eine zukünftige Entgrenzung von Biologie und Technologie vorantreiben könnten. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf der Darstellung denkbarer und möglicher Anwendungsszenarien der biodigitalen Technologien und ihres Veränderungspotenzials, d. h., in welchen Kontexten sie in Zukunft eingesetzt werden könnten und wie sich infolgedessen der Alltag und bestimmte Lebensbereiche der Menschen darstellen könnten.

Zielsetzung der Studie

- Darstellung relevanter Trends und Treiber durch die Identifikation von biodigitalen Anwendungstechnologien (Technology-Push) und relevanten Gesellschaftsentwicklungen (Demand-Pull)
- Beschreibung des derzeitigen Forschungsstands und zukunftssträchtiger Anwendungsperspektiven der biodigitalen Technologien
- Beschreibung unterschiedlicher Zukünfte (Anwendungsszenarien) auf Basis relevanter Anwendungstechnologien und der gesellschaftlichen Trends

Methodik und Studienaufbau

Die Studie stützt sich dabei 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 zukunftsoffene sowie dialogorientierte Foresight-Methoden stützen sich folglich auf eine solide empirische Basis, die die Forschungsdynamik nachzeichnet und zugleich Emerging Issues erfasst. Diese Vertiefungsstudie im Rahmen des Foresight-Prozesses III des BMBF knüpft durch die Einbettung der Studienergebnisse in die Globalszenarien² direkt an die im Sommer 2020 veröffentlichte Wertestudie³ des Foresight-Prozesses an.

Die Studie ist wie folgt strukturiert: In Kapitel 2 werden im Wesentlichen auf Basis der Literaturschau und der Gespräche mit den Expertinnen und Experten Merkmale der Entgrenzung und ihrer verschiedenen Stufen entwickelt. Kapitel 3 beschreibt unterschiedliche Zukünfte einer potenziellen Entgrenzung – ausgehend von bestimmten Technologien. Dabei sind die Beschreibungen eingebettet in sechs unterschiedliche und gleich plausible Globalszenarien. Kapitel 4 fokussiert auf die Beschreibung aktueller gesellschaftlicher Trends, die eine Entgrenzung in der Zukunft verstärkt vorantreiben könnten, und gibt einen Überblick über aktuelle Technologien, deren Forschungsdynamik sowie Emerging Issues und Entwicklungspotenziale. Kapitel 5 beschreibt die Vorgehensweise und die Methoden im Detail.

² Die sechs Szenarien lauten: Szenario 1 – Der europäische Weg, Szenario 2 – Wettbewerbsmodus, Szenario 3 – Rückkehr der Blöcke, Szenario 4 – Tempounterschiede, Szenario 5 – Das Bonus-System und Szenario 6 – „Ökologische Regionalisierung. In Kapitel 3 werden die Globalszenarien jeweils in einer Kurzversion eingeführt. Die ausführlichen Versionen können in der Studie „Zukunft der Wertvorstellungen in unserem Land“ unter www.vorausschau.de nachgelesen werden.

³ Prognos AG; Z_punkt GmbH The Foresight Company (2020).

2. ENTGRENZUNG: DIE AUFLÖSUNG DER GRENZEN ZWISCHEN TECHNOLOGIE UND BIOLOGIE

Die Suche nach Erklärungen und Lösungen für gesellschaftliche Herausforderungen liegt in der Natur des Menschen. Ebenso das Streben nach Leistungsoptimierung.⁴ 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 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 auch in einer neuen Intensität und Qualität, die immer mehr auf eine Verschmelzung dieser abzielt und damit auf das Entstehen hybrider biodigitaler Entitäten.⁵

Die Grenzverschiebung zwischen Technologie und Biologie erfolgt von beiden Seiten

Deutlich werden im Zuge der Entgrenzung **zwei Bewegungen**, u. a. stimuliert durch Fortschritte in dem jeweils anderen Bereich und damit wechselseitig:

- **Die Technisierung von Biologie, insbesondere des Menschen**⁶: die Optimierung von lebenden Organismen durch Eingriffe in die Funktionsweise mithilfe von Technologie, d. h. durch künstliche Artefakte, insbesondere physiologische technologische Produkte (z. B. Implantate, Exoskelette, Wearables etc.).⁷ Neu daran sind vor allem der Eingriff in zunehmend hochsensible Bereiche, wie etwa in das Gehirn, und die zunehmende Betrachtung des Menschen als Wesen, das nach vorhersehbaren Regeln und Mechanismen funktioniert, die künstlich repliziert werden können.⁸
- **Die Biologisierung von Technologie**: die Optimierung von Technologien durch Eigenschaften, die mit lebenden Organismen assoziiert werden (z. B. Selbstorganisation, Selbstheilung, Reproduktion und Kognition). Kern dieses Trends ist die Integration von biologischen Systemen in Technologien bzw. die Annäherung daran in Form, Aussehen und Verhalten, weswegen teilweise auch von „lebender“ Technologie die Rede ist.⁹

⁴ Vgl. Fellmann, M.; Krause, T. (2015) und <https://www.hightech-forum.de/publication/bio-it-innovationen/>

⁵ 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.

⁶ Der Fokus wird im Folgenden bewusst auf den Menschen gelegt, wenngleich es ähnliche Bestrebungen für Pflanzen und Tiere gibt. Nach Helmut Plessners anthropologischem Ansatz ist der Mensch im Gegensatz zu Tieren und Pflanzen nicht nur ein „Naturwesen“, sondern zeichnet sich u. a. auch durch seine Fähigkeit zur Selbstreflexion aus. Damit gehen von einer Technologisierung des Menschen im Vergleich zu Tieren und Pflanzen weitaus höhere Implikationen aus. Andererseits dient die Fokussierung der Eingrenzung des Themenfelds.

⁷ Eine Optimierung des Menschen kann auch mit nicht technischen Mitteln oder durch technische Verfahren wie z. B. Medikamente, genetische Verfahren etc. stattfinden. Dieser Bericht fokussiert jedoch explizit auf die Entgrenzung des Menschen durch artifizielle physiologische Produkte. Andere Optimierungsarten werden nicht weiter berücksichtigt.

⁸ Vgl. van Est, R. et al. (2011), S. 13 ff.

⁹ Vgl. van Est, R. et al. (2011) und Bedau, M. A. et al. (2009).

Human Enhancement als visionäres Ziel der menschlichen Optimierung

Das Bestreben der Menschen, die eigenen Fähigkeiten zu verbessern oder sich sogar ganz neu zu erschaffen, wird auch unter dem Schlagwort Human Enhancement diskutiert.¹⁰ Dabei unterliegt die Motivation zum Enhancement einer großen Bandbreite, deren Übergänge zudem oft fließend sind:

- **Therapeutisches Enhancement:** die „Wiederherstellung oder Bewahrung der physischen oder psychischen Gesundheit“¹¹ aufgrund einer medizinischen Indikation
- **Nicht therapeutisches Enhancement:** die Erweiterung bzw. Steigerung „natürlicher“, menschlich möglicher Fähigkeiten ohne medizinische Notwendigkeit und damit die Veränderung und Verbesserung bereits existierender Eigenschaften.¹² Menschen, deren Ziel die Verbesserung ihres Selbst durch Technologie ist, werden auch Cyborgs genannt
- **Transhumanismus & Posthumanismus:** das Übertreffen menschlicher Fähigkeiten, u. a. da der Mensch als „Mängelwesen“¹³ wahrgenommen wird. Ziel ist die Gestaltung des eigenen Körpers nach Wunsch und somit u. a. das Erlangen neuer nicht menschlicher Eigenschaften und Fähigkeiten unter Zuhilfenahme von Technologien.¹⁴ Hierdurch ergeben sich posthumane Wesen, die sich derart verändert haben, dass sie nicht mehr als biologische Menschen gezählt werden können.¹⁵

Die Biologisierung von Technologie zielt häufig auf Lösungen gesamtgesellschaftlicher Herausforderungen ab

Neben dem urmenschlichen Bestreben, sich selbst zu optimieren, sind es vor allem gewaltige gesamtgesellschaftliche Herausforderungen – wie z. B. der Klimawandel, steigende Ressourcenknappheit und alternde Gesellschaften, die zu neuen technologischen Lösungen drängen. Biologische Systeme rücken dabei wegen ihrer spezifischen Eigenschaften wie Regeneration, Selbstheilung, Wachstum, Selbstkonfiguration, Selbstorganisation, Adaptivität gegenüber sich verändernden Umweltbedingungen, Energieautarkie, Stoffwechsel, Wiederverwertbarkeit und vor allem Autonomie, die mit herkömmlichen Materialien und Technologien kaum erreicht werden können zunehmend in den Fokus. Entsprechend werden immer häufiger Versuche unternommen, diese Eigenschaften für technologische Innovationen freizusetzen.¹⁶ Ziel ist einerseits die **Optimierung von Technologie mit Biologie**, d. h. die Ausnutzung biologischer Eigenschaften für Technik und die Integration biologischer Funktionalitäten wie z. B. Selbstorganisation oder Selbstheilung, aber auch das Erlangen der Biokompatibilität von Werkstoffen.¹⁷ Andererseits strebt die Forschung die **Belebung von nicht lebendigen Technologien** durch die Reproduktion biologischer Fähigkeiten in Technologien – z. B. Autonomie, Selbstorganisation und Adaption (Lernen, Wachstum, Evolution) – an.¹⁸ Als „Living Technologies“ nähern sich technische Artefakte in ihrer Funktionalität den biologischen Systemen bis zur Ununterscheidbarkeit an.

Die Biologisierung von Technologie zielt häufig auf Lösungen gesamtgesellschaftlicher Herausforderungen ab

Die zunehmende Auflösung der Grenzen zwischen biologischen und technologischen Systemen wirft weitgreifende Fragen auf, wie z. B.: Wie verändern sich Merkmale des Menschseins (Handlungsautonomie, Fähigkeit zur Selbstorganisation)?, Was genau charakterisiert in Zukunft technologische Systeme und biologische Systeme, und werden wir diese überhaupt noch unterscheiden können? Diese Fragen werden ohne abschließende

¹⁰ Vgl. Siep, L. (2013), S. 56.

¹¹ Stake, M.; Bartmann, M. (2019).

¹² Vgl. Eckhardt, A. et al. (2011), S. 5.

¹³ Kehl, C.; Coenen, C. (2016), S. 33.

¹⁴ Vgl. Weinberger, N.; Reisch, S.; Sahrai, E. et al. (2012), S. 45.

¹⁵ Vgl. Dermühl, K. (2015), S. 51 und Kehl, C.; Coenen, C. (2016), S. 143.

¹⁶ Bedau, M. A et al. (2009), S. 7.

¹⁷ Vgl. Le Feuvre, R. A.; Scrutton, N. S. (2018), S. 106 und Fratzl, P. et al. (2019), S. 9.

¹⁸ Siehe Aguilar, W. et al. (2014), S. 8.

Klärung seit Jahrhunderten diskutiert. Gleichwohl ist es nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung, finale Antworten auf diese grundsätzlichen Fragen zu finden, die sehr schnell zu einer Debatte über Ethik und Moral führen können. In dieser Studie werden die relevanten Merkmale der „Entgrenzung“ definiert und verschiedene Entwicklungslinien betrachtet, die für die Gestaltung und das Handeln in der Zukunft von Bedeutung sind.

2.1 Merkmale von Entgrenzung

Ein elementares Merkmal der Grenzauflösung zwischen biologischen und technologischen Systemen ist die **direkte Verbindung beider Systeme** miteinander in unterschiedlicher **Form, (Wirkungs-)Stärke und Eingriffstiefe**.¹⁹ Dies ist, wie oben beschrieben, kein neues Phänomen und beschreibt einen Entwicklungsverlauf, der durch Kontinuität und sprunghafte Veränderung gekennzeichnet ist. Aus diesem Grund unterliegt auch der Diskurs zur Entgrenzung einem beständigen Wandel. Das, was wir als Entgrenzung wahrnehmen, verändert sich dynamisch und graduell. Der Versuch einer Definition bzw. Einordnung einzelner Technologien hinsichtlich ihres Entgrenzungspotenzials kann folglich immer nur einen tagesaktuellen Sachstand liefern, der beständig gegenüber neuen Handlungsmöglichkeiten sowie wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Debatten aktualisiert werden müsste. Das heißt, die gesellschaftliche Wahrnehmung einer Verbindung von biologischen und technologischen Systemen als Entgrenzung wandelt sich im Zeitverlauf. Der Entgrenzungsbegriff ist folglich in Bezug zum aktuell etablierten Standard der Technologie und dem gesellschaftlichen Diskurs zu interpretieren. Maßgeblich für die Entgrenzung ist somit die Frage: Was ist der Status quo, und wie gestaltet sich die nächste Entwicklungsstufe?²⁰ Eingriffe und Entwicklungen, die in der Vergangenheit im gesellschaftlichen Diskurs einer Entgrenzung entsprachen, werden heute überwiegend nicht mehr als Grenzüberschreitung oder -verschiebung wahrgenommen (**Grad der Etablierung einer Technologie, die im Folgenden u. a. durch den Technologie-Reifegrad²¹ abgebildet wird**).²² Dies ist beispielsweise häufig der Fall, wenn aufgrund einer

Expertinnen- und Experteninterview 14

„Früher war jede Technologie, die unter die Haut gepflanzt wurde, bereits etwas Entgrenzendes. In den 1990ern war das dann normal, aber man hätte nie gedacht, dass man Technologie ins Gehirn von Menschen oder Tieren pflanzen würde. Heute irritieren Nachrichten, wie jene von Elon Musk, der einem Schwein einen Chip ins Gehirn gepflanzt hat, niemanden mehr.“

medizinischen Indikation ein künstliches Artefakt eingesetzt wird, um die physische oder psychische Gesundheit der Patientin bzw. des Patienten wiederherzustellen oder zu bewahren. Dabei kann es sich um einen in der Medizin etablierten Routinevorgang handeln (z. B. das Einsetzen eines Herzschrittmachers) oder um ein Vorgehen, bei dem der Einsatz der Technologie inzwischen in bestimmten Bereichen üblich ist (z. B. passive Exoskelette in der Physiotherapie). Werden solche Eingriffe hingegen an gesunden Personen durchgeführt oder ermöglicht die Technologie nicht nur die Wiederherstellung bestimmter Fähigkeiten, sondern darüber hinaus auch

das Entstehen neuer Eigenschaften, die nicht im Spektrum des menschlich Möglichen liegen, so wird ein und dieselbe Technologie im öffentlichen Diskurs überwiegend als entgrenzend wahrgenommen.

¹⁹ Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten.

²⁰ Damit einher geht eine starke Subjektivität des Status quo, deren Auflösung jedoch im Rahmen dieser Studie nicht möglich ist.

²¹ Der Technologie-Reifegrad hat die folgenden neun Stufen: TRL 1: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips (8–15 Jahre); TRL 2: Beschreibung der Anwendung einer Technologie; TRL 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie (5–13 Jahre); TRL 4: Versuchsaufbau im Labor; TRL 5: Versuchsaufbau in der Einsatzumgebung; TRL 6: Prototyp in der Einsatzumgebung; TRL 7: Prototyp im Einsatz (1–5 Jahre); TRL 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich; TRL 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes.

²² Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten.

Auffällig ist zudem, dass die Verschiebung menschlicher Fähigkeiten in der Öffentlichkeit schneller und stärker als Entgrenzung wahrgenommen wird als umgekehrt die Verschiebung technologischer Grenzen. Eine Verschiebung der Grenzen vonseiten der Technologie durch die stärkere Integration biologischer Systeme wird vor allem dann gesehen, wenn damit ein Verlust des selbstverantwortlichen menschlichen Subjekts einhergeht bzw. einhergehen könnte.²³

So sehen Expertinnen und Experten eine Entgrenzung von Technologie insbesondere dann als gegeben, wenn der Mensch nicht mehr die Kontrolle bzw. Steuerung über Technologien hat. Beschleunigt werden solche Entwicklungen u. a. durch die Digitalisierung. Die selbstständige Analyse und Steuerung von (Entscheidungs-)Prozessen verschafft der Technologie einen gewissen Grad der **Autonomie**. Die Bandbreite der Autonomie reicht dabei von verschiedenen Formen der Automatisierung, d. h. von der selbstbeweglichen Technologie bis hin zur tatsächlichen Autonomie, d. h. dem Agieren aus sich heraus.²⁴ Mit dem zunehmenden Grad der Autonomie verringern sich die Kontrollmöglichkeiten durch den Menschen. Darüber hinaus konstatieren Expertinnen und Experten vor allem auch dann eine Entgrenzung technologischer Systeme, wenn diese sehr stark in **Aussehen, Form oder Verhalten** biologischen Systemen ähneln.²⁵

i Workshop mit Bürgerinnen und Bürgern

Im November 2020 fand ein Workshop mit Bürgerinnen und Bürgern statt, um potenzielle zukünftige Formen der Entgrenzung zu diskutieren. Der Austausch erfolgte über fünf Technologien: smarte Kon-



taktlinsen, Gehirnschnittstellen, Allround-Androiden, Nano- und Microbots und Exoskeletten. Im Fokus standen zwei Fragen:

- Welche Formen der Entgrenzung können Sie sich persönlich in Ihrem Lebensalltag in Zukunft vorstellen?
- Welche Herausforderungen könnten sich daraus ergeben?

Die Ergebnisse der Diskussion sind in die Erstellung der Anwendungsszenarien eingeflossen. Zu Beginn des Workshops wurden von den Teilnehmenden zudem Statements dazu gesammelt, was für jede Einzelne und jeden Einzelnen Entgrenzung bedeutet.

Zusammenfassend kann Entgrenzung verschiedene Ausprägungen, die auch unterschiedlich kombiniert werden können, annehmen:²⁶

- Grad der **Verbindung**:
 - lose Verbindung
 - (systemische) Verknüpfung
 - integrale Verschmelzung

²³ Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten.

²⁴ Siehe DIN (2020), S. 18.

²⁵ Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten.

²⁶ Kehl, C.; Coenen, C. (2016), S. 7; Roco, M. C.; Bainbridge, W. S. (2003), S. 7; Renn, O. (2017), S. 30 und Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten.

- Grad der **Autonomie** der Technologie:
 - automatisiert (die Technologie kann nur wenige und klar definierte Aufgaben durchführen)
 - hoch automatisiert (Überwachung durch den Menschen nur in bestimmten Situationen nötig und nicht dauerhaft)
 - voll automatisiert (die Aufgaben können vollumfänglich vom System bewältigt werden, ohne Unterstützung einer Person)
 - autonom (Technologie kann aus sich heraus eigenständig agieren)
- Grad der **Etablierung (z. B. TRL)** in der Gesellschaft, auf dem Markt oder in spezifischen Bereichen:
 - flächendeckend und seit längerer Zeit (TRL 7 bis TRL 9)
 - wenig etabliert oder nur in bestimmten Bereichen; ansteigende Dynamik (TRL 6 bis TRL 9)
 - neuartig, noch nicht am Markt (TRL 1 bis TRL 5)
- **Eingriffstiefe** (nur für den Menschen):
 - invasiv oder nicht invasiv
- Grad der **Wirkungsstärke (bzw. Folgen)** der Verknüpfung (nur für den Menschen):
 - kurzfristig oder langfristig,
 - reversibel oder irreversibel
- Grad der **Ähnlichkeit** mit biologischen Systemen in Form, Aussehen und Verhalten (nur für die Technologie):
 - keine bis geringe Ähnlichkeit mit biologischem System
 - wesentliche Ähnlichkeiten in Form und Funktionalität
 - Ununterscheidbarkeit von biologischem System

2.2 Stufen der Entgrenzung

Je nach Grad und Zusammensetzung der genannten Ausprägungen weisen Technologien ein unterschiedliches Entgrenzungspotenzial auf. Für eine bessere Übersicht wird das Entgrenzungspotenzial in dieser Studie für beide Dimensionen systematisiert und in jeweils drei Stufen unterteilt.

Diese Systematisierung diente im Projektverlauf zur Bearbeitung und Eingrenzung des Themas, um beispielsweise Technologien mit einem besonders hohen zukünftigen Entgrenzungspotenzial zu identifizieren. Dies war insbesondere für die Ausgestaltung verschiedener Methoden wie etwa der Delphi-Befragung oder den Futures-Wheel-Workshop wichtig.

2.2.1 Technisierung biologischer Systeme: Entgrenzung des Menschen

Eine Entgrenzung vom Menschen gegenüber der Technologie kann stattfinden, wenn der Mensch am oder im Körper durch ein künstliches Artefakt **technisiert** wird und damit seine Leistungsfähigkeit erweitert oder sogar eine biologische Grenze überschritten wird. Dabei findet eine graduell zunehmende Verbindung zwischen dem Menschen und künstlichen Artefakten statt bis hin zu einer integralen Verschmelzung. Prinzipiell

zählt bereits jede Art der Produkt- bzw. Techniknutzung, welche die menschlichen Fähigkeiten modifizieren soll, zur Entgrenzung.²⁷ Im öffentlichen Diskurs werden jedoch Technologien, die stark etabliert sind oder insbesondere im medizinischen Kontext Anwendung finden, häufig nicht mehr als entgrenzend wahrgenommen. Dies wird nachfolgend für die Einordnung von Technologien hinsichtlich ihres Potenzials einer zukünftigen Entgrenzung berücksichtigt und stellt ein wichtiges Merkmal für das Entgrenzungspotenzial dar. Für die Unterscheidung, welche Arten und Hilfsmittel zur Modifikation der menschlichen Fähigkeiten schließlich zu einer Entgrenzung führen, werden nachfolgend drei Kategorien gebildet.

Kein zukünftiges Entgrenzungspotenzial (im Sinne dieser Studie)

Der Fokus liegt auf der Reproduktion menschlicher Fähigkeiten, d. h. auf der therapeutischen Behandlung von Krankheiten, Verletzungen oder Einschränkungen. Es besteht eine überwiegend lose oder sogar keine direkte Verbindung mit dem menschlichen Körper. Die Technologien sind zudem in der Regel bereits seit langer Zeit auf dem Markt und werden in der Breite angewandt.

Beispiele²⁸: Medikamente, Doping, Drogen etc. oder einfache technologische Geräte wie Brille, Hörgerät, Prothese, Herzschrittmacher, Smartphone, Navigationsgeräte oder Insulinpumpen.

<i>Etablierung</i>	<i>Eingriffsstärke</i>	<i>Wirkungsstärke</i>	<i>Autonomie</i>
<i>flächendeckend und seit längerer Zeit</i>	<i>überwiegend nicht invasiv</i>	<i>eher kurzfristig und in der Regel reversibel</i>	<i>„nur“ automatisiert</i>

Schwaches zukünftiges Entgrenzungspotenzial (im Sinne dieser Studie)

Der Fokus liegt auf der Erweiterung/Steigerung der Fähigkeiten. Dies kann auch die Behandlung einer Krankheit oder Verletzung einschließen, die über die Reproduktion standardmäßiger menschlicher Fähigkeiten hinausgeht (beabsichtigt oder unbeabsichtigt) bzw. die Nutzung von therapeutischen Methoden zur Erweiterung/Steigerung von Fähigkeiten ohne Krankheit oder Verletzung. Eine lose Verbindung ist möglich, aber überwiegend sind es direkte Verknüpfungen mit gegenseitiger Interaktion oder Beeinflussung.

Beispiele²⁹: smarte Wearables wie Smart Glasses oder smarte Kontaktlinsen und Stimulationsverfahren wie transkranielle Magnetstimulation/Gleichstromstimulation.

<i>Etablierung</i>	<i>Eingriffsstärke</i>	<i>Wirkungsstärke</i>	<i>Autonomie</i>
<i>wenig etabliert oder nur in bestimmten Bereichen mit ansteigender Dynamik</i>	<i>teilweise invasiv</i>	<i>kurz- bis mittelfristig und in der Regel reversibel</i>	<i>hoch bis voll automatisiert</i>

Starkes zukünftiges Entgrenzungspotenzial (im Sinne dieser Studie)

Der Fokus liegt auf dem Übertreffen der menschlichen Fähigkeiten. Die Technologie ist ein integraler Bestandteil für das Funktionieren eines Systems; Verschmelzen von Mensch und Maschine.

Beispiele³⁰: sensorische Neuroprothesen wie Cochlea-Implantate und Retina-Implantate, Gehirnschnittstellen wie das Brain-Machine-Interface oder Brain-Brain-Interface oder Brain-/Mind-Uploading.

²⁷ Vgl. Kehl, C. (2016). S. 5 und Gebhardt, T. (2020).

²⁸ Die Beispiele stellen keine abschließende Liste dar.

²⁹ Die Beispiele stellen keine abschließende Liste dar.

³⁰ Die Beispiele stellen keine abschließende Liste dar.

<i>Etablierung</i>	<i>Eingriffsstärke</i>	<i>Wirkungsstärke</i>	<i>Autonomie</i>
<i>neuartig, noch nicht am Markt</i>	<i>überwiegend invasiv</i>	<i>langfristig und in der Regel eher geringe Reversibilität (hoher Aufwand oder hohes Risiko)</i>	<i>voll automatisiert bis (teil-) autonom</i>

2.2.2 Biologisierung technischer Systeme: Entgrenzung von Technologie

Die Entgrenzung von Technologie zur Biologie vollzieht sich, wenn unbelebte technologische Artefakte „**lebendiger**“ werden, d. h. immer mehr Merkmale typisch biologischer Systeme (beispielsweise Autonomie, Intelligenz oder Selbstorganisation) in Verhalten, Funktion und Struktur annehmen.

Kein zukünftiges Entgrenzungspotenzial (im Sinne dieser Studie)

Der Fokus liegt auf der Imitation biologischer Konstruktions- und Wirkprinzipien. Die entstehenden Technologien zeigen selbst keine idiosynkratischen Merkmale „lebendiger“ Systeme, sondern verwenden diese nur als passiven Werkstoff oder Inspirationsquelle. Bioinspirierte Designs von Maschinen oder technologischen Prozessen stellen zwar technische Innovationen dar, bleiben aber unbelebte Arbeits- und Hilfsmittel.

Beispiele³¹: Optimierung von Triebwerkdesign durch naturinspirierten Leichtbau oder nanostrukturierte Haftfolie nach dem Vorbild von Gecko-Füßen.

<i>Etablierung</i>	<i>Ähnlichkeit (biol. Systeme)</i>	<i>Autonomie</i>
<i>flächendeckend und seit längerer Zeit</i>	<i>keine bis geringe Ähnlichkeit mit einem biologischen System</i>	<i>„nur“ automatisiert</i>

Schwaches zukünftiges Entgrenzungspotenzial (im Sinne dieser Studie)

Der Fokus liegt auf Entwicklungen, die zu einer Verlebendigung des technischen Gesamtprozesses führen. Zu diesem Zweck werden aktive biologische Organismen integriert oder einige grundlegende biologische Funktionen in der Technologie reproduziert. Eine Wechselwirkung zwischen biologischen und technologischen Komponenten bzw. emergentes und autonomes Verhalten der Maschinen findet sich jedoch nicht.

Beispiele³²: biohybride Materialien oder Humanoiden und tierähnliche Roboter.

<i>Etablierung</i>	<i>Ähnlichkeit (biol. Systeme)</i>	<i>Autonomie</i>
<i>wenig etabliert oder nur in bestimmten Bereichen; ansteigende Dynamik</i>	<i>wesentliche Ähnlichkeiten in Form und Funktionalität</i>	<i>hoch bis voll automatisiert</i>

³¹ Die Beispiele stellen keine abschließende Liste dar.

³² Die Beispiele stellen keine abschließende Liste dar.

Starkes zukünftiges Entgrenzungspotenzial (im Sinne dieser Studie)

Bei einer starken Technologieentgrenzung lässt sich keine klare Unterscheidung von technologischem Artefakt und lebendigem Organismus mehr treffen. „Lebendige“ Maschinen können sich (zumindest ihrem Grundprinzip nach) über eine Form des Stoffwechsels selbstständig mit Energie versorgen, vermehren, an Umwelten anpassen und in weitgehender Autonomie Entscheidungen über ihre Aktivität treffen.

Beispiele:³³ Bioroboter, synthetische Zellen, Androiden.

<i>Etablierung</i>	<i>Ähnlichkeit (biol. Systeme)</i>	<i>Autonomie</i>
<i>neuartig, noch nicht am Markt</i>	<i>Ununterscheidbarkeit von biologischem System</i>	<i>autonom</i>

³³ Die Beispiele stellen keine abschließende Liste dar.

3. 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 hier von maßgeblich betroffen sein? Diese und andere Fragen werden in diesem Kapitel beantwortet. Mithilfe von Anwendungsszenarien werden sechs unterschiedliche mögliche Zukunftsbilder der Entgrenzung in Deutschland in den 2030ern skizziert.
- Die Erarbeitung der Szenarien (siehe Kapitel 3.3) 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“³⁴.

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

3.1 Technology-Push: Zukunftsprägende Anwendungstechnologien

Eine zunehmende Rolle in der Optimierung von Mensch und Technologie nehmen heutzutage moderne Wissenschaften bzw. die voranschreitende Auflösung der klassischen Trennung zwischen der physikalischen und biologischen Forschung ein. Während sich physische Wissenschaften, wie z. B. die Chemie und Physik, traditionell mit der Untersuchung nicht lebender Systeme befassten, konzentrierte sich die Biowissenschaft auf die Untersuchung lebender Organismen. Jüngst findet jedoch immer mehr Forschung an der Schnittstelle zwischen lebendem und nicht lebendem Material, zwischen Geist und Maschine, zwischen natürlichen und technologischen Artefakten statt.³⁵

Die Konvergenz physischer und biologischer Wissenschaften wird nicht zuletzt begünstigt durch das zunehmende interdisziplinäre Zusammenspiel der folgenden **vier Schlüsselbereiche**: Nanotechnologie, Biologie oder auch Biotechnologie, Kommunikations- und Informationstechnologie (IKT) und Kognitionswissenschaften bzw. -technologie, auch bezeichnet als NBIC-Konvergenz. Sie gilt als wesentlicher Treiber neuartiger und vielversprechender Entwicklungen, die auch als „neue Technologiewelle“³⁶ bezeichnet werden. Wichtige Entwicklungen sind dabei vor allem die zunehmende Miniaturisierung, Digitalisierung und autonome Steuerung von Technologien. Eine bedeutende Rolle spielt außerdem die Verknüpfung der genannten Bereiche mit **künstlicher Intelligenz**, von welcher ein noch höheres Verbesserungs- und Effizienzpotenzial ausge-

³⁴ Prognos AG; Z_punkt GmbH The Foresight Company (2020).

³⁵ Vgl. van Est, R. et al. (2011), S. 11 ff.

³⁶ Nordmann, A. (2004) und Roco, M. C.; Bainbridge, W. S. (2003). Obwohl „NBIC-Konvergenz“ und/oder „Converging Technologies“ sich als Begriffe nicht in der Breite durchgesetzt haben, haben sich damit verbundene Konzepte in der Praxis durchgesetzt (z. B.. das der synthetischen Biologie) und sind immer noch hochaktuell.

hen könnte, bis hin zu einer „neuartigen – technologischen – Evolution nichtorganismischen Lebens“³⁷ im Sinne der Belegung von Technologie.

Aus der Konvergenz dieser Wissenschaften entstehen zunehmend anwendungsoffene Innovationsprozesse, an deren Ende die Vision biodigitaler Innovationen steht. Um den Möglichkeitsraum einer zukünftigen Gesellschaft darstellen zu können, wurden deshalb grundlegende Anwendungstechnologien für die Entgrenzung biologischer und technologischer Systeme identifiziert. Diese wurden im Rahmen der beiden Entgrenzungsdimensionen systematisiert und in übergreifenden Kategorien zusammengefasst. Eine genaue Beschreibung der einzelnen Kategorien findet sich in Kapitel 4.

Tabelle 1: Zentrale Technologien

Technisierung des Menschen

Technologiefeld	Relevante Anwendungstechnologien
<i>(Smarte) Wearables</i>	• Smart Glasses und smarte Kontaktlinsen • RFID-Chips und digitale Tattoos
<i>Exoskelette und (Neuro-)Prothesen</i>	• Exoskelette (mit Gehirnschnittstellen) • Motorische und sensorische Prothesen
<i>Neuroelektrische Schnittstellen</i>	• nicht invasive, einseitig ableitende oder stimulierende Verfahren (Elektroenzephalografie, transkranielle Magnet- und Gleichstromstimulation, tiefe Hirnstimulation, Elektrozeutika) • invasive bidirektionale Verfahren (Brain-to-Machine-, Brain-to-Brain- und Brain-to-Cloud-Schnittstellen) • Whole-Brain-Emulation/Mind-Uploading
<i>(Flüssige) Organe auf Basis synthetischer Biologie</i>	• künstliches Blut und künstliche Organe
<i>Smarte medizinische Technologien</i>	• Intelligente Medikamente und Nano- und Microbots

Biologisierung von Technik

<i>Menschen- und tierähnliche Roboter</i>	• Laufroboter und weiche Roboter • humanoide Roboter, digitale Androiden und Androiden
<i>Micro- und Nanobots aus lebendigem Material</i>	• biohybride und biologische Roboter • synthetische Zellen
<i>Technologien zur Datenverarbeitung</i>	• biologische (DNA- und RNA-)Computer, hybride Prozessoren, DNA-Datenspeicherung • Biosensoren • Organs-on-a-Chip
<i>Biologisierte Technologie als Produktionsmittel</i>	• Biomanufacturing und biohybride Materialien • Semiartifizielle Photosynthese

Quelle: © eigene Darstellung Prognos AG und Z_punkt 2021.

Die Technologien in beiden Bereichen weisen eine dynamische Entwicklung sowie hohe Potenziale für eine zukünftige Entgrenzung zwischen technologischen und biologischen Systemen auf. Gleichwohl zeigen die Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten und der Delphi-Befragung, dass im öffentlichen Diskurs eine Entgrenzung eher bei der Technologisierung des Menschen gesehen wird als andersherum. Die Ergebnisse des Desk-Research verdeutlicht zudem, dass beide Dimensionen teilweise eng miteinander verknüpft sind und vor allem Entwicklungen in der Biologisierung der Technologie wiederum eingesetzt werden, um den Menschen zu optimieren – z. B. der Übergang von Micro- und Nanobots aus nicht lebendigen Materialien hin

³⁷ Benedikter, R. (2019), S. 6.

zu lebendigen Materialien oder die Biofabrikation bzw. biohybride Materialien im Zuge der Herstellung von künstlichen Organen.

Die Ergebnisse der Publikations- und Patentanalyse untermauern die Dynamik in den letzten Jahren. Während die Publikationsdynamik in beiden Dimensionen lange nahezu auf dem gleichen Niveau war, stieg sie bei der Technisierung des Menschen im Jahr 2017 stark an. Bei den Patenten verzeichnet die Biologisierung der Technik wiederum ein wesentlich höheres Niveau als die Technisierung des Menschen, bis in dieser Dimension ebenfalls im Jahr 2017 die Patentaktivitäten stark anstiegen und sich mittlerweile dem Niveau der Biologisierung der Technik langsam annähern.

Treiber der Dynamik unter den Publikationsveröffentlichungen zur Technisierung des Menschen stellen insbesondere die intelligenten Medikamente dar, deren Anzahl seit 2017 ruckartig um 180 Prozent auf knapp 6.900 Publikationen gestiegen ist. Damit macht diese biodigitale Technologie einen Großteil der gesamten Publikationen im Bereich der Technisierung des Menschen aus. Auch unter den Patenten ist im gleichen Zeitraum ein starker Anstieg der Anmeldungen von intelligenten Medikamenten zu verzeichnen. Eine wesentlich höhere Dynamik bei Patentanmeldungen für die Dimension der Technisierung des Menschen weisen jedoch die Exoskelette auf, die sich zwischen 2017 und 2019 von 452 auf 788 Patente nahezu verdoppelt haben und sich zudem auch auf einem höheren Niveau befinden. Auch invasive und nicht invasive Schnittstellen konnten seit 2010 ein Wachstum der Patentanmeldungen von knapp 80 Prozent verzeichnen. Ähnliche Entwicklungen zeigen sich in beiden Technologien auch für die Publikationen: Die Zahl der jährlichen Veröffentlichungen zu neuroelektronischen Schnittstellen (etwa 1.400) und zu Exoskeletten (aktuell etwa 1.000) ist in den letzten zehn Jahren um 180 respektive 400 Prozent kräftig gewachsen.

Das insgesamt höhere Niveau der Patentanmeldungen im Bereich der Biologisierung der Technologie ist vor allem durch Anmeldungen im Bereich der humanoiden und soften Robotik und der Biosensoren bedingt. Dabei liegen die Biosensoren jedoch seit 2010 auf einem nahezu gleichbleibenden Niveau von ca. 900 Anmeldungen im Jahr. Patentanmeldungen bei den humanoiden Robotern hingegen sind insbesondere seit 2015 stark angestiegen und haben sich mit 610 Anmeldungen im Jahr 2019 im Vergleich zu 2015 mehr als verdoppelt. Im Rahmen der Publikationsveröffentlichungen sind ebenfalls die Publikationen zu den Biosensoren die Treiber der Biologisierung der Technik, die mit etwa 4.300 jährlichen Veröffentlichungen im Jahr 2019 (Wachstum von 42 Prozent in zehn Jahren) einen Großteil der zählbaren Forschungsaktivitäten ausmachen. Dynamischer als die Forschung zu Biosensoren entwickeln sich die Biofabrikation (290 Prozent Wachstum in zehn Jahren) und die DNA-basierte Datenspeicherung (450 Prozent in zehn Jahren), allerdings auf einem insgesamt niedrigeren Niveau.³⁸

Getrieben werden die Publikationen vor allem von den ingenieurs-, material- und computerwissenschaftlichen Disziplinen sowie von der Biochemie, Medizin und Chemie. Deutschland ist bei den Anwendungstechnologien breit aufgestellt und zeigt eine rege Publikationstätigkeit. Die größte Dynamik entfaltet sich bisher jedoch vor allem in den USA und China, sowie seit jüngerer Zeit auch in Südkorea. Die Patentanmeldungen finden mit großem Abstand vor allem in den Bereichen Medizin, Computerwesen und auch Biochemie statt. Die meisten Patentveröffentlichungen erfolgen in den USA, vor Südkorea auf dem zweiten und Deutschland auf dem dritten Platz.

³⁸ Detailliertere Angaben zu den Patenten und Publikationen einzelner Anwendungstechnologien finden sich auch in den Kapiteln 4.1 und 4.2.

3.2 Demand-Pull: Zukunftsprägende gesellschaftliche Entwicklungen

Identifiziert wurden insgesamt zwölf Gesellschaftstrends, die die Akzeptanz entgrenzender Technologien zukünftig befördern könnten. Diese lassen sich zudem in vier Oberkategorien einteilen.

Tabelle 2: Übersicht zu Gesellschaftstrends

<i>Trendbereich</i>	<i>Konkreter Gesellschaftstrend</i>
<i>Gesamtgesellschaftliche Entwicklung</i>	• <i>demografischer Wandel</i>
<i>Gesundheits- und Körpertrends</i>	• <i>E-Health und Quantified-Self-Bewegung</i> • <i>steigende gesellschaftliche Akzeptanz von „Körperdesign“</i> • <i>von der Gesundheit zum Enhancement</i>
<i>Veränderung der Werteorientierung</i>	• <i>wachsendes Nachhaltigkeitsbewusstsein</i> • <i>zunehmende Individualisierung</i> • <i>Bedeutungsverlust von Religion</i> • <i>Professionalisierung von Freizeitaktivitäten</i>
<i>Allumfassende Verbreitung digitaler Technologien im Alltag</i>	• <i>Smart Living und virtuelle Assistenten</i> • <i>Mensch-Maschine-Kollaboration in der Arbeitswelt</i> • <i>Verbreitung von Robotik in Erziehung und Pflege</i> • <i>Ausbreitung von Mixed Realitys</i>

Quelle: © eigene Darstellung Prognos AG und Z_punkt 2021.

3.2.1 Gesamtgesellschaftliche Entwicklung

Demografischer Wandel

Der demografische Wandel führt in Deutschland dazu, dass die sinkende Zahl der Menschen im jüngeren Alter und die gleichzeitig steigende Zahl älterer Menschen den demografischen Rahmen in ungekannter Art und Weise verschieben. Im Jahr 2018 waren laut Statistischem Bundesamt 51,8 Millionen Menschen im erwerbsfähigen Alter zwischen 20 und 66 Jahren. Bis zum Jahr 2035 wird die erwerbsfähige Bevölkerung nach Berechnungen der Statistikerinnen und Statistiker um rund vier bis sechs Millionen auf 45,8 bis 47,4 Millionen schrumpfen.³⁹ Auch die ungewöhnlich starke Zuwanderung vor allem junger Menschen in den letzten Jahren und die seit 2012 wieder ansteigenden Geburtenzahlen werden diesen Rückgang laut Statistischem Bundesamt nicht ausgleichen. Zugleich werden die Menschen in Deutschland immer älter.⁴⁰

Ältere Menschen werden also in Zukunft nicht nur das Bild in der Öffentlichkeit stärker prägen, sondern auch aufgrund der höheren Lebenserwartung auf mehr gesellschaftliche und wirtschaftliche Teilhabe drängen. Dies zeichnet sich bereits heute ab, etwa mit Blick auf die gestiegene Erwerbstätigkeit bei Menschen, die älter als 65 Jahre sind. Rund 18 Prozent der Personen zwischen 65 und 69 Jahren in Deutschland gingen im Jahr 2019 einer Erwerbstätigkeit nach. Im Jahr 2009 war der Anteil mit rund acht Prozent noch nicht einmal halb so hoch.⁴¹ Zugleich dürfte die höhere Zahl von älteren Menschen auch die Zunahme alterstypischer Krankheiten wie Demenz oder Diabetes zur Folge haben.⁴² Dies könnte dazu führen, Entgrenzungstendenzen zu befördern,

³⁹ Statistisches Bundesamt (2019).

⁴⁰ Tagesschau (2020).

⁴¹ Statistisches Bundesamt (o. D.).

⁴² Robert Koch-Institut (2012).

da eine lange gesellschaftliche Teilhabe auch mithilfe von Medizin und präventiven Maßnahmen sowie technischen Hilfsmitteln und Technik ermöglicht wird – etwa durch Exoskelette, Biosensoren oder sensorische Neuroprothesen. Eine steigende Nachfrage sowohl nach (intelligenten) Medikamenten und präventiven Gesundheitsmaßnahmen als auch technischen Hilfsmitteln könnte zugleich eine höhere gesellschaftliche Akzeptanz nach sich ziehen.

3.2.2 Gesundheits- und Körpertrends

E-Health und Quantified-Self-Bewegung

Die Bereitschaft von Menschen, freiwillig durch Apps oder Wearables die eigenen Gesundheitsdaten zu sammeln und auswerten zu lassen, nimmt stetig zu. So stieg die Zahl von smarten Wearables und Fitnesstrackern in Deutschland von 2016 bis 2019 von 3,25 Millionen auf 5,26 Millionen, bis 2022 soll die Zahl sogar auf 6,41 Millionen anwachsen.⁴³ Datengestützte Gesundheitsvorsorge gewinnt also in vielen Bevölkerungsteilen an Bedeutung. Die Quantified-Self-Bewegung, welche diese Form der „Selbstvermessung“ propagiert, hält bereits seit 2011 eigene Konferenzen in Europa ab. Zugleich schreitet die Digitalisierung der Gesundheitssysteme unter dem Begriff E-Health voran. Darunter wird die Vorbeugung, Diagnose, Behandlung, Überwachung und Verwaltung im Gesundheitswesen mithilfe von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) verstanden – wodurch auch hier die Datenbasierung der medizinischen Behandlung und Vorsorge wichtiger wird.⁴⁴

Die Bereitschaft, Gesundheitsvorsorge und Selbstoptimierung mittels Datenerfassung zu betreiben, dürfte also in Zukunft noch steigen. Datennutzung und digitale Bewertungslogiken dürften immer tiefer in die Gesellschaft vordringen.⁴⁵ Die zugrunde liegenden Motive tragen nicht unmittelbar zu einer Entgrenzung bei, könnten jedoch den Boden bereiten, um eine solche herbeizuführen. Dies könnte etwa durch die Bereitschaft geschehen, Daten nicht nur durch externe technologische Geräte, sondern auch durch implantierte Geräte oder Chips sowie Biosensoren oder Nano- und Microbots zu erheben. Dahinter könnte nicht nur der Wunsch nach einer „bequemen“ Art der Datenerfassung, sondern auch nach einer weitergehenden Selbstoptimierung stehen.

Von der Gesundheit zum Enhancement

Im Gesundheitssystem hat sich in den letzten Jahren ein Paradigmenwechsel vollzogen: von der Nachsorge hin zur Vorsorge. Primäres Ziel dieses präventiven Gesundheitssystems ist nicht mehr die Behandlung von bereits existenten Krankheiten, sondern die Gesunderhaltung, also die – sofern möglich – Vermeidung von Krankheiten durch einen proaktiven Lebensstil.⁴⁶ Diese verschiebt die Fürsorgepflicht immer weiter weg vom Kollektiv hin zum Individuum: Die oder der Einzelne sind dafür mitverantwortlich, durch einen gesundheitsförderlichen Lebensstil zur Gesunderhaltung beizutragen. Systemisch unterstützt wird dies durch Anreize („Nudging“) bei der Tarifbildung, indem gesunde Lebensstile durch Boni honoriert werden.⁴⁷ Die Gesunderhaltung wird so sukzessive zu einer Handlungsmaxime. Diese Maxime könnte auch als Türöffner für verschiedene Formen der Entgrenzung durch Human Enhancement dienen – sprich der Erweiterung der menschlichen Möglichkeiten und der Steigerung menschlicher Leistungsfähigkeit. Im Sinne einer Gesunderhaltung bedeutet dies, dass es zukünftig immer öfter zum Einsatz von Entgrenzungstechnologien kommen könnte, wenn diese die Gesunderhaltung zu unterstützen scheinen.

Dabei muss unterschieden werden zwischen körperlicher und geistiger Erweiterung – wenngleich die Grenzen nicht immer trennscharf zu ziehen sind. Insbesondere die Verwendung von Exoskeletten aus präventiven gesundheitlichen Gründen, sprich zur körperlichen Entlastung, könnte zur Normalität werden: Die Marktfor-

⁴³ Statista (2020a).

⁴⁴ WHO (o. D. a).

⁴⁵ Mau, S. (2017).

⁴⁶ Schumacher, T. (2019).

⁴⁷ Deutsches Ärzteblatt (2016).

schungs- und Beratungsgesellschaft ABI Research rechnet mit einer jährlichen Zuwachsrate im weltweiten Markt für Exoskelette von etwa 40 Prozent.⁴⁸ In Bezug auf die geistige Erweiterung sind Computertechnologien zu nennen, die ständig mitgeführt werden – oder das Potenzial besitzen, zum ständigen Begleitgerät zu werden. Hierunter fallen neben Smartphones, Smartwatches und Wearables auch smarte Datenbrillen und Kontaktlinsen, die in Echtzeit Gesunderhaltungsmaßnahmen dokumentieren oder Ratschläge zur Gesunderhaltung geben können.⁴⁹ Als Nischenphänomen könnte es durch Do-it-yourself-Biologie (DIY) – also biologische, chemische oder technische Eingriffe in Organismen mit dem Ziel der Veränderung und Verbesserung des Körpers – zu Entgrenzungen infolge eines Human Enhancement kommen. DIY-Biologie ermöglicht es auch geübten Amateurrinnen und Amateuren, den Körper zu optimieren.⁵⁰

Steigende gesellschaftliche Akzeptanz von „Körperdesign“

Stark sichtbare Eingriffe in den Körper ohne medizinische Notwendigkeit sowie das bewusste Designen des gesamten Körpers oder einzelner Körperpartien galten lange Zeit in breiten Schichten der Bevölkerung als verpönt. Inzwischen haben plastische Chirurgie, Tattoos, Piercings oder Bodybuilding stark an Akzeptanz gewonnen und sind längst in der Mitte der Gesellschaft angekommen. Prominente und Vorbilder wie Fußballprofis tragen Tattoos offen zur Schau – jeder fünfte Mensch in Deutschland ist heute tätowiert.⁵¹ So gibt es starke Tendenzen, dass sich Menschen mehr über den Körper als über die Kleidung darstellen – aus „Kleider machen Leute“ wird „Körper machen Leute“.⁵² Im Bodybuilding sind auch auf Amateurlevel Hilfsmittel und die Einnahme von leistungssteigernden Substanzen verbreitet.⁵³

In Zukunft könnte sich dieser Trend zum umfassenden „Körperdesign“ noch weiter verstärken – und entsprechend zur Entgrenzung beitragen, indem Grenzen sukzessive verschoben werden. Grundsätzlich denkbar sind dabei der (illegale) Einsatz von intelligenten Medikamenten auch im Breitensport oder auch Weiterentwicklungen von bestehendem Körperschmuck, wie etwa smarte, vernetzte Piercings. Dies könnte ein Türöffner für weitergehende Eingriffe sein, etwa in Form von subkutanen Chips, die dann in der Mitte der Gesellschaft Akzeptanz fänden.⁵⁴

3.2.3 Veränderung der Werteorientierung

Wachsendes Nachhaltigkeitsbewusstsein

Das Umwelt- und Nachhaltigkeitsbewusstsein in Deutschland ist seit den frühen Umweltbewegungen Mitte der 1970er-Jahre sukzessive gestiegen – und längst in der Mitte der Gesellschaft angekommen.⁵⁵ Im Jahr 2019 stuften laut einer Befragung des Umweltbundesamts 68 Prozent der Menschen in Deutschland Umwelt- und Klimaschutz als eine sehr wichtige Herausforderung ein und gaben ihm eine ähnlich hohe Bedeutung wie den beiden anderen Topthemen Bildung (65 Prozent) und soziale Gerechtigkeit (63 Prozent). Im Vergleich zum Jahr 2018 hat Umwelt- und Klimaschutz der Umfrage zufolge 2019 weiter an Bedeutung gewonnen.⁵⁶ Und doch geht diese Verankerung in der Mitte der Gesellschaft einigen Bürgerinnen und Bürgern nicht weit genug: Der sich intensivierende Klimawandel hat neue zivilgesellschaftliche Initiativen wie „Fridays for Future“ auf den Plan gerufen. Auch Initiativen gegen Waldrodungen erzeugten viel Schlagzeilen.⁵⁷ Und zuletzt führte die CO-

⁴⁸ Asche, S. (2018).

⁴⁹ Ingenieur.de (2019).

⁵⁰ Zoidl, F. (2019).

⁵¹ Münchner Merkur (2019).

⁵² Reil, J. (2017).

⁵³ Fischer, L. (2019).

⁵⁴ Chadwick, L. (2020).

⁵⁵ Hofmann, R. (2018).

⁵⁶ Umweltbundesamt (2020).

⁵⁷ Zeit Online (2020).

VID-19-Pandemie vor Augen, wie die Zerstörung der Rückzugsgebiete von Tieren und der Verlust von Biodiversität Zoonosen befördern kann.⁵⁸

Das steigende Nachhaltigkeitsbewusstsein dürfte also in Zukunft angesichts der Klimaproblematik noch zunehmen – und könnte so auch Entgrenzungen begünstigen. So könnte etwa in Zukunft das eigene ökologische Verhalten mittels Smart Glasses oder smarterer Kontaktlinsen dokumentiert werden, um den individuellen ökologischen Fußabdruck zu berechnen. Auch der verstärkte Einsatz von Biosensoren ist denkbar, um bessere Datengrundlagen für Klima- und Umweltprognosen zu haben. Zudem könnte auch aus Nachhaltigkeitsaspekten in vielen Bereichen die Biofabrikation bzw. das Biomanufacturing, wo biologische Zellen als Produktionssysteme genutzt werden, zunehmen. In Zukunft könnte es also möglich sein, dass etwa Kleidung, Möbel oder auch Verpackungen anstelle eines komplizierten Fertigungsprozesses direkt von Zellen produziert werden.⁵⁹

Zunehmende Individualisierung

Individualisierungstendenzen sind in Europa bereits seit der Renaissance zu beobachten, der Individualisierungsschub der letzten Jahrzehnte ist auf mehrere Entwicklungen zurückzuführen.⁶⁰ So gab es bis in die 1980er-Jahre hinein Wohlstandssteigerungen in beinahe allen Bevölkerungsgruppen. Diese haben zwar die sozialen Ungleichheiten nicht nivelliert, wohl aber zu einer allgemeinen Steigerung der Kaufkraft geführt, was auch individuellen Konsum erlaubte. Die Verkürzung der Arbeitszeiten führte zu mehr Freizeit, was eine stärkere Beschäftigung mit den eigenen Interessensgebieten erlaubte. Und das gestiegene Bildungsniveau ermöglichte nicht nur neue Chancen des sozialen Aufstiegs, sondern vermittelte auch Kompetenzen, um profunder über sich selbst und das eigene Leben nachzudenken und auf dieser Grundlage selbstbestimmtere Lebensentscheidungen zu treffen. Diese Entwicklungen wurden durch einen grundlegenden Wertewandel bis in die 1970er-Jahre hinein verstärkt.⁶¹

Auch die zunehmende Auflösung von sozialen Milieus und der damit verbundenen sozialen Kontrollfunktion beförderte die Individualisierung.⁶² Das Web 2.0 mit dem Potenzial, die Einzelne bzw. den Einzelnen zum Massenmedium werden zu lassen, hat Individualisierungstendenzen weiter verstärkt und eine „Gesellschaft der Singularitäten“ entstehen lassen, in der das Einzigartige prämiert wird und Menschen mit originellen Interessen und kuratierten Biografien gefragt sind.⁶³

Die fortschreitende Digitalisierung dürfte die Individualisierung in Zukunft nochmals auf eine neue Stufe heben, ebenso wie der allgemeine Trend zur Miniaturisierung. So verspricht etwa die Industrie 4.0, gekoppelt mit Fortschritten in der Nanotechnologie, individualisierbare Produktionsprozesse und hyperpersonalisierte Produkte bis hinunter zur Losgröße 1. Und auch die datengestützte personalisierte Medizin will Behandlungsmethoden ermöglichen, die sich an den Besonderheiten des Individuums orientieren. Dies könnte eine neue Evolutionsstufe der „Gesellschaft der Singularitäten“ bilden, die das Potenzial hat, Entgrenzungstendenzen in Zukunft zu verstärken. Technik und Daten dürften Individualisierung fördern, wenn jeder Mensch in allen Lebensbereichen als einzigartige Berechnungsgrundlage angesehen und damit „selten“ wird.⁶⁴ Dies könnte den Boden dafür bereiten, dass Technik auch dazu verwendet wird, durch Entgrenzungen „besonders“ sein zu wollen, was jede Faser des Alltags durchdringt. Wohnumgebungen könnten durch biohybride Materialien personalisiert werden, synthetische Zellen und intelligente Medikamente könnten körperindividuelle Wirkstoffpräparate zielgerichtet freigeben oder Brain-Computer-Interfaces und künstliche Organe die Einzigartigkeit von Körper und Geist befördern. Bereits heute gibt es mit Neil Harbisson den ersten von einer Regierung – in diesem Fall der britischen – anerkannten Cyborg.⁶⁵ Der eigentlich farbenblinde Künstler Harbisson hat

⁵⁸ MDR Wissen (2020).

⁵⁹ Cumbers, J. (2020). Vgl. Produkte von BASF, Bayer, AGC Biologics oder EnginZyme in Kooperation mit Sofinnova Partners.

⁶⁰ Schimank, U. (2012).

⁶¹ Inglehart, R. (1977).

⁶² Beck, U. (1986).

⁶³ Reckwitz, A. (2017).

⁶⁴ Schüler, H.-P. (2015).

⁶⁵ Donahue, M. Z. (2017).

eine Antenne implantiert, die Farben erkennt und diese als Töne an sein Gehirn weiterleitet. Weitere „entgrenzte Singularitäten“ könnten seinem Beispiel in Zukunft folgen, um ihre Einzigartigkeit herauszustellen.

Bedeutungsverlust von Religion

In Deutschland nimmt die Zahl der Menschen, die nicht an Gott glauben, seit Jahren zu. So bezeichneten sich 2018 rund 26,8 Prozent der Menschen als Atheistinnen oder Atheisten bzw. Agnostikerinnen oder Agnostiker.⁶⁶ Zugleich ist die Zahl der Kirchaustritte auf einem historischen Höchststand.⁶⁷ Und unter denjenigen, die sich selbst als gläubig betrachten, steigt die Zahl derer, bei denen sich Glaube und rituelle Praxis in der Gemeinschaft entkoppeln. So sank etwa die Zahl der regelmäßigen katholischen Gottesdienstbesuchenden im Zeitraum von 1990 bis 2019 von 6,19 auf 2,07 Millionen.⁶⁸ Der Glaube wird immer mehr zur individuellen Frage, zugleich sinkt die Bedeutung der kirchlichen und religiösen Institutionen – auch im öffentlichen Diskurs. Dadurch lösen sich auch religiös geprägte Milieus sukzessive auf, wodurch entsprechende Wertvorstellungen nur noch in kleineren Gruppen Resonanzräume finden.

Im Jahr 2019 gehörten insgesamt 52,1 Prozent der in Deutschland lebenden Menschen einer christlichen Konfession an. Bis 2060 könnte sich der Anteil der Kirchenmitglieder laut einer Prognose der Universität Freiburg nochmals halbieren.⁶⁹ Religiös geprägte Bedenken hinsichtlich einer Entgrenzung im Sinne eines tiefgehenden Eingriffs in die Schöpfung wären dann Positionen, die einen schwindenden Rückhalt in der Bevölkerung haben könnten. Offen ist dabei, inwieweit eine säkulare Ethik hier ähnliche Grundpositionen wie eine religiöse Moral vertreten könnte, wenn der Mensch zum eigenen Schöpfer, zum „Homo Deus“, würde.⁷⁰ Die abnehmende Bedeutung von Religion und kirchlichen Massenorganisationen könnte dazu beitragen, dass Entgrenzungen in Zukunft auf deutlich weniger zivilgesellschaftliche Widerstände stoßen. An ihre Stelle könnten dagegen neue religiös codierte Bewegungen wie der Transhumanismus treten, die Entgrenzungen eher befürworten als ablehnen.⁷¹

Professionalisierung von Freizeitaktivitäten

Die schrittweise Verkürzung der Arbeitszeiten seit Ende der 1950er-Jahre⁷² führte zur Herausbildung eines Freizeitsektors mit vielfältigen Angeboten. Freizeit nahm in der Folge in der individualisierten Lebensplanung und -gestaltung einen immer höheren Stellenwert ein. Freizeitaktivitäten wurden Teil von Selbstverwirklichungsprozessen und damit Teil der Selbstverortung von Individuen in der Gesellschaft.⁷³ Viele Freizeitaktivitäten, einst als Ausgleich zur Berufstätigkeit gedacht, erfuhren in den vergangenen Jahrzehnten eine Professionalisierung. Selbst Konsum wurde dort, wo er bewusst getätigt wurde, professionell betrieben.⁷⁴ Verstärkt wurde diese Entwicklung durch die Potenziale der sozialen Medien, die eine breitenwirksame Darstellung der eigenen Tätigkeiten erlauben. Plattformen wie YouTube ermöglichten Karrieren im Musikgeschäft, bei denen die traditionelle Gatekeeper-Funktion der Plattenfirmen – zumindest im ersten Schritt – ausgehebelt wurde.⁷⁵

In Zukunft dürfte sich der Trend zur Professionalisierung von Freizeitaktivitäten fortsetzen. Bereits heute agieren Influencerinnen und Influencer auf Plattformen wie Instagram in einem ständigen Graubereich zwischen Freizeit und Arbeit.⁷⁶ Auch könnte es gut sein, dass die durchschnittliche Arbeitszeit in Zukunft für viele Beschäftigte weiter sinkt, sollte die Vier-Tage-Woche in weiten Teilen Realität werden.⁷⁷ Hobbys könnten sich daher noch stärker von einfachen und unterhaltsamen Freizeitbeschäftigungen hin zu Aktivitäten wandeln,

⁶⁶ Bundeszentrale für politische Bildung (2020).

⁶⁷ Tagesschau (2020b).

⁶⁸ Statista (2020b).

⁶⁹ Zeit Online (2019).

⁷⁰ Harari, Y. (2017).

⁷¹ Becker, M. (2019).

⁷² IG Metall (2018).

⁷³ Slaghuys, B. (2017).

⁷⁴ Ullrich, W. (2019).

⁷⁵ CNN (2019).

⁷⁶ Hubschmid, M.; Voss, O. (2017).

⁷⁷ Schieritz, M.; Rohwetter, M. (2020).

bei denen sich die oder der Einzelne auf höherem Niveau engagiert. Dies könnte dahingehend zur Entgrenzung beitragen, dass immer mehr Menschen bereit sind, freiwillig auf Technik und technische Hilfsmittel – auch zur Leistungssteigerung – zu setzen. Auf diese Weise könnten Grenzen der Nutzung von Technik verschoben werden.

3.2.4 Allumfassende Verbreitung digitaler Technologien im Alltag

Smart Living und virtuelle Assistenten

In Deutschland nimmt die Anzahl der Menschen, die sich im Alltag von intelligenten Technologien unterstützen lassen, kontinuierlich zu. Von deren Einsatz erhoffen sie sich ein Mehr an Komfort sowie Effektivität und Entlastung bei lästigen Routinetätigkeiten. Im Mittelpunkt der Smartisierung des Alltags steht das sogenannte Smart Living, das auch für die deutsche Wirtschaft ein wichtiger Zukunftsmarkt ist. Vorrangige Anwendungsfelder umschließen die Bereiche Smart Home, Smart Healthcare oder Smart Mobility, die „über das vernetzte Zuhause als einen Ausgangspunkt von Aktivitäten in der Gesamtheit einer zunehmend digitalisierten Lebensumgebung eines Nutzers hinausgehen“.⁷⁸ Die intelligente Vernetzung intelligenter Geräte bildet das Rückgrat von Smart-Living-Systemen. Gerade der Smart-Home-Markt entwickelt sich in Deutschland dynamisch, aber auch die digitale Durchdringung von Anwendungen in den Bereichen Gesundheit (z. B. Self-Management chronischer Erkrankungen) und Mobilität (z. B. Connected Car) nimmt spürbar zu.

Ebenso nehmen digitale Assistentinnen und Assistenten einen immer größeren Stellenwert im Leben der Menschen ein. Digitale Assistenzen sind intelligente Software-Agentinnen und -Agenten, die gesprochene Sprache verstehen und kontextabhängig Informationen bereitstellen, Empfehlungen geben oder Befehle ausführen. Integriert in dedizierten Geräten wie smarten Speakern oder eingebettet in Apps für Smartphones oder Fernseher, halten sie zusehends Einzug in Wohnzimmer und Großraumbüros. Bereits heute besitzen 28 Prozent der über 16-Jährigen in Deutschland einen Smart Speaker.⁷⁹ Solche Formen der Durchdringung des Lebensalltags und die damit assoziierte Entlastung könnten in Zukunft dazu beitragen, dass innerhalb der Bevölkerung die Bereitschaft gegenüber stärkeren Formen der Entgrenzung wächst, die sich nahtlos und teilweise unsichtbar in den Lebensalltag integrieren und diesen erleichtern. Dies können lebende Baumaterialien oder Biosensoren sein, welche die Energieeffizienz oder Hygiene von Wohngebäuden in Ergänzung zu Smart-Home-Systemen weiter erhöhen, oder Brain-Computer-Interfaces, welche als zentrale Steuerungsschnittstellen für Smart-Living-Systeme fungieren könnten.

Mensch-Maschine-Kollaboration in der Arbeitswelt

Der Charakter der Arbeit ist dabei, sich grundlegend zu verändern. Technik hält in immer mehr Bereichen des Arbeitslebens Einzug. In Deutschland kamen 2018 im Durchschnitt 338 Roboter auf 10.000 Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer – im globalen Vergleich waren es nur in Singapur und Südkorea mehr.⁸⁰ Mensch und Maschine bilden immer häufiger Teams. Virtuelle Assistenzsysteme, künstliche Intelligenzen und Roboter werden zu Kolleginnen und Kollegen von Erwerbstätigen. Die Zahl der sogenannten Cobots, also kollaborationsfähiger Robotersysteme, ist in den letzten Jahren weltweit kontinuierlich gestiegen, wenngleich noch auf niedrigem Niveau.⁸¹ Dieser Wandel der Arbeitswelt erfordert sowohl neue Fähigkeiten und neue Formen der Ausbildung als auch völlig neue Ansätze im Personalmanagement. Die Corona-Pandemie bringt einen weiteren Digitalisierungsschub, der den Umgang mit Technik im Arbeitsalltag weiter normalisiert.

⁷⁸ BMWi (2020).

⁷⁹ Bitkom e. V. (Hrsg.) (2019).

⁸⁰ International Federation of Robotics (2018).

⁸¹ Automationspraxis (2019).

In Zukunft dürfte die Bedeutung von Technik und Mensch-Maschine-Kollaboration in Form von KI, Assistenzsystemen und Cobots am Arbeitsplatz noch weiter zunehmen.⁸² Damit dürfte auch der komplexe Umgang mit Technologie weitestgehend Standard an vielen Arbeitsplätzen werden. Dies könnte Entgrenzungstendenzen dahingehend befördern, dass einerseits ein Abbau von Ängsten gegenüber Technologie stattfindet, andererseits sich eine schleichende Neudefinition des grundsätzlichen Verhältnisses von Mensch und Technologie durch die Erfahrungen am Arbeitsplatz vollzieht.

Verbreitung von Robotik in Erziehung und Pflege

Robotik ist in der Pflege und Erziehung in Deutschland noch nicht sehr weit verbreitet. Dies könnte sich jedoch bald ändern. So sieht der Deutsche Ethikrat großes Potenzial für den Einsatz von Robotik in der Pflege.⁸³ Auch das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert bereits Pilotprojekte in der Pflegerobotik.⁸⁴ Jedoch möchte eine Mehrheit der Deutschen nicht von einem Roboter gepflegt werden. Robotik soll vielmehr assistierend wirken und nicht die menschlichen Pflegekräfte ersetzen – zwischenmenschliche Begegnungen bleiben einer Erhebung des Digitalverbands Bitkom zufolge nach wie vor wichtig.⁸⁵

Der demografische Wandel und der steigende Pflegebedarf könnten in Zukunft zu einer höheren Akzeptanz und Diffusion von Robotik in der Pflege führen. Schätzungen zufolge könnten soziale Roboter bis 2025 flächendeckend in der Betreuung von Seniorinnen und Senioren eingesetzt werden – allerdings nur unter der Bedingung, dass entsprechende Investitionen aus der Wirtschaft kommen.⁸⁶ Sollten sich die Roboter in der alltäglichen Arbeit bewähren, könnten in diesem Kontext auch Entgrenzungen befördert werden, da soziale Robotik und dadurch auch Technologie in sensiblen Lebensbereichen allgemein auf höhere Akzeptanz trifft. Gesellschaftskonforme Mensch-Technik-Interaktion würde dann auf eine Stufe gehoben werden. Dies könnte auch als Türöffner für weitere Anwendungsfelder der sozialen Robotik dienen – etwa in der Erziehung, was dann wiederum weitere Entgrenzungen befördern könnte.⁸⁷

Ausbreitung von Mixed Realities

Physische und virtuelle Welt vermischen sich zusehends miteinander. Technologien wie Augmented Reality (AR), Augmented Virtuality (AV) oder Virtual Reality (VR) lassen die ehemals klaren Grenzen zwischen realer und digitaler Welt verschwinden. Hologramme und 3-D-Displays lassen digitalen Content plastisch erscheinen, haptische Technologien oder Geschmacks- und Geruchssimulationen erzeugen die Illusion, ihn auch real zu erfahren, zu schmecken oder zu riechen.⁸⁸ Über spezielle AR-Apps lässt sich bereits heute so gut wie jedes normale Smartphone oder Tablet in ein Augmented-Reality-Device verwandeln. Immersive Erfahrungen in virtuellen Umgebungen verlassen die Nische und erreichen den Massenmarkt und finden beispielsweise Einzug in die Bereiche Design und Architektur, die industrielle Produktion oder auch das Gaming. Mehr als die Hälfte der Deutschen kann sich grundsätzlich vorstellen, VR-Anwendungen zu nutzen.⁸⁹

Anstatt Erfahrungen aus der realen Welt einfach zu kopieren, entstehen so Mixed Realities, also gemischte Realitäten, die Aspekte realer und virtueller Umgebungen zu einzigartigen, neuen Erlebnissen und Formen der Interaktion machen. Diese Entwicklung läutet auch eine neue Ära ein, wie Menschen digitale Technologien wahrnehmen: weg von singulären, klar von der analogen Welt abgekoppelten Entitäten, hin zu integralen, natürlichen Bestandteilen der realen Welt. Diese Entwicklungen in der Mixed Reality könnten auch dazu beitragen, dass Entgrenzung auch in anderen Bereichen als ein selbstverständlicher Prozess wahrgenommen und als etwas Normales akzeptiert wird – sei es in Form von Androiden mit Allround-Funktionalität oder biohybriden Materialien und Robotern.

⁸² MÜNCHNER KREIS e. V. & Bertelsmann Stiftung (Hrsg.) (2020).

⁸³ Krüger-Brand, H. (2020).

⁸⁴ BMBF (2020).

⁸⁵ Waschinski, G. (2018).

⁸⁶ Rößler, N. (2019).

⁸⁷ Badische Zeitung (2018).

⁸⁸ Immersive Learning News (2020).

⁸⁹ Deloitte (2020).

3.3 Anwendungsszenarien: Entgrenzung in den 2030ern

Als Grundlage für die Anwendungsszenarien dienen die sechs Werteszenarien aus der Studie „Zukunft von Wertvorstellungen der Menschen in unserem Land“⁹⁰. Die sechs Werteszenarien wurden mithilfe eines explorativ-systematischen, schlüsselfaktorenbasierten Szenarioprozesses entwickelt und beschreiben sechs mögliche Zukunftsbilder der deutschen Gesellschaft im Jahr 2030:

- Szenario 1: Der europäische Weg
- Szenario 2: Wettbewerbsmodus
- Szenario 3: Rückkehr der Blöcke
- Szenario 4: Tempounterschiede
- Szenario 5: Das Bonus-System
- Szenario 6: Regionale Ökologisierung

Jedes dieser sechs Werteszenarien zeigt u. a. auf, wie sich verschiedene Umfelder in Deutschland innerhalb der nächsten zehn bis 15 Jahre entwickeln könnten: das globale Umfeld und Deutschlands Rolle in der Welt, das gesellschaftliche Klima, das politische Umfeld, die Wirtschaftswelt, Bildung und Arbeit, der Lebensalltag sowie die Bedeutung von Technologie. Die unterschiedlichen Umfeldbedingungen 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:

- 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 Erarbeitung der Anwendungsszenarien erfolgte entlang eines mehrstufigen Analyse- und Diskussionsprozesses. In einem ersten Schritt wurde exploriert, welche Formen der Entgrenzung innerhalb der drei oben skizzierten Fragestellungen im Kontext der unterschiedlichen Umfeldbedingungen der Werteszenarien aus heutiger Sicht plausibel erscheinen. Ergänzt wurden die Gedanken mit relevanten Ergebnissen aus der Delphi-Befragung zu den Anwendungstechnologien, den Interviews mit Expertinnen und Experten sowie dem Futures-Wheel-Workshop. Die erarbeiteten Anwendungsszenarien wurden anschließend mit Expertinnen und Experten in einem gemeinsamen Workshop validiert und qualitativ angereichert. Abschließend erfolgte im Rahmen eines interaktiven Workshops mit Bürgerinnen und Bürgern eine Diskussion darüber, welche Formen der Entgrenzung im persönlichen Lebensalltag gut vorstellbar sind und welche Herausforderungen damit verbunden sein könnten. Die Resultate der Diskussion flossen daraufhin in die Anwendungsszenarien ein, um diese mit weiteren wichtigen Aspekten aus der Sicht von Bürgerinnen und Bürgern qualitativ zu unterfüttern.

⁹⁰ Prognos AG; Z_punkt GMBH The Foresight Company (2020).

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

	Anwendungs-szenario 1	Anwendungs-szenario 2	Anwendungs-szenario 3	Anwendungs-szenario 4	Anwendungs-szenario 5	Anwendungs-szenario 6
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						
Biohybride Roboter						
Synthetische Zellen						
Biosensoren						
Biohybride, lebende Materialien						
Biofabrikation und Bio-Manufacturing						
Hybride Prozessoren						
DNA-basierte Datenspeicherung						
Humanoiden 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.

3.3.1 Anwendungsszenario 1: Der europäische Weg

i Szenariorahmen

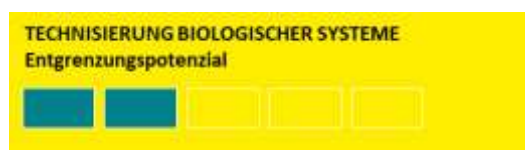


Wer von Deutschland in den 2030er-Jahren spricht, spricht auch über Europa. Die EU und ihre Mitgliedstaaten verfolgen in einem harten globalen Wettbewerb eine selbstbewusste und eigenständige Industriepolitik.

© BMBF2020.

Wichtige Pfeiler der EU-Politik seit den 2020er-Jahren sind neu geschaffene, leistungsfähige europäische Innovationszentren in strategischen Sektoren (wie künstliche Intelligenz [KI], Raumfahrt etc.). Diese werden in unmittelbarer Nähe zu europäischen Forschungszentren und führenden Universitäten angesiedelt. Gleichzeitig werden europäische Lösungen für Produktion und Fertigung gesucht, nachdem weltweite Krisen gezeigt haben, wie instabil globale Lieferketten sein können. In der deutschen Bevölkerung ist die Zustimmung zur EU konstant hoch. Themen wie der Umweltschutz sind aufgrund des fortschreitenden Klimawandels wichtig und bestimmen die politische und wissenschaftliche Agenda. Aber auch soziale Fragen prägen den europäischen Weg: Die Entstehung hoch qualifizierter Jobs macht Einkommensunterschiede noch deutlicher, die Nachfrage nach qualifizierten Fachkräften steigt weiter.

Daher schafft die EU einen Weiterbildungsfonds, der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmern berufliche Fortbildungen ermöglicht. Sie sollen dem automatisierungsbedingten Wegfall von Arbeitsplätzen vorbeugen. Die Wertelandschaft im Szenario des europäischen Wegs ist geprägt von einer Europäisierung sowohl individueller Lebenswelten als auch der Gesellschaft insgesamt. Gemeinschaftsbezogene Werte gewinnen an Bedeutung, da die identitätsstiftende Komponente Europa hinzukommt und der Wunsch, einer starken Gemeinschaft anzugehören, immer größer wird. Neben diesem „Europa-Patriotismus“ werden jedoch auch leistungsbezogene Werte wichtiger. Europa soll im globalen Wettbewerb mithalten. Damit verbunden ist auch die Entwicklung nachhaltiger Technologien als wichtiger zukunftsweisender Wirtschaftszweig, der durch das wachsende Umweltbewusstsein in der EU in den Fokus rückt.



VERWENDETE BIODIGITALE TECHNOLOGIEN

- Nicht invasive Gehirnschnittstelle
- Smart Glasses und smarte Kontaktlinsen
- Künstliches Blut
- Exoskelette

VERWENDETE BIODIGITALE TECHNOLOGIEN

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



Positive Einstellungen der Menschen gegenüber Technologien im Allgemeinen und Entgrenzung

Die im Lebensalltag der Menschen in Deutschland genutzten Technologien sind weit davon entfernt, als stark entgrenzt wahrgenommen zu werden, ebenso wie die damit einhergehenden Funktionen und Prozesse. Und dennoch reiben sich nicht wenige Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Forschung noch immer die Augen über den immensen Sprung, den die Nutzung und Verbreitung neuer Technologien in Deutschland innerhalb der vergangenen Jahre gemacht hat. Schwache Formen der Entgrenzung, die Anfang der 2020er-Jahre in Deutschland nur wenig Akzeptanz gefunden hätten, sind mittlerweile salonfähig geworden. Dies hat auch mit dem gleichermaßen kritischen wie transparenten Umgang von Politik und Wirtschaft mit neuen Technologien zu tun. Die Menschen assoziieren Entgrenzung immer auch mit einem gewissen Kontrollverlust oder einer Fremdsteuerung. Verschiedene Maßnahmen des Gesetzgebers und innovationsorientierter Technologieunternehmen stellen jedoch sicher, dass Menschen im Jahr 2030 stets die Kontrolle über Technologien behalten. Dieser Umstand führt dazu, dass aus Sicht der Anwenderinnen und Anwender im Rückblick gar keine Entgrenzungen vorlagen. Technologien haben klar umrissene Anwendungsbereiche. Sie erlauben stets eine menschliche Intervention – etwaige Entscheidungen oder Funktionen lassen sich transparent nachvollziehen.



Hohe regulatorische Technologiestandards in Europa

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Deutschland positioniert sich mit der „Strategie Künstliche Intelligenz“ für eine zukunftsfähige und gleichzeitig verantwortungsvolle Entwicklung von „AI made in Germany“. Dabei geht es um das Ermitteln und Testen konkreter Anwendungsfälle, beispielsweise für eine unfallfreie Mobilität, für eine KI-gestützte Diagnostik in der Medizin oder für eine präzise Anpassung der Landwirtschaft an sich verändernde Umweltbedingungen durch intelligente Biotechnologie.

Quelle: Die Bundesregierung (o. D.).

Auf EU-Ebene gelten hohe regulatorische Standards und politische Rahmenbedingungen in Bezug auf Technologieentwicklung und -nutzung. Diese wurden parallel zur Schaffung leistungsfähiger Innovationszentren implementiert. Dadurch möchte sich die EU im globalen Technologiewettbewerb emanzipieren und ein europäisches Alleinstellungsmerkmal im Umgang mit Zukunftstechnologien schaffen. Die hohen Standards stellen sicher, dass innerhalb der EU nur solche Technologien zugelassen werden, die einer umfassenden Chancen-Risiko-Analyse standhalten. Deren Nutzung muss also negative Nebenfolgen weitestgehend ausschließen. Das sind z. B. absichtlicher Missbrauch durch Dritte, Diskriminierung, geringe Sozialverträglichkeit oder nicht kontrollierbare Effekte auf die natürliche Umwelt. Strenge ethische Bewertungen fokussieren auf physische und kognitive

Folgeeffekte von Technologien. Hierfür hat die EU eigens eine Gemeinschaftsagentur für Technikfolgenabschätzung ins Leben gerufen. Diese vereinheitlicht die Technikfolgenabschätzung der einzelnen Länder. Die Bewertung von Zukunftstechnologien vollzieht sich auf der Grundlage eines europaweit legitimierten und nachvollziehbaren Kriteriensets.



Technologien „Made in Europe“ wird vertraut

Diese extrem hohen technologiebezogenen Standards sind jedoch nur ein Grund für die große Offenheit der Menschen gegenüber neuen Technologien. Durch sie werden Entgrenzungen von Biologie und Technik im Lebensalltag eher akzeptiert – und als solche zum Teil gar nicht wahrgenommen. Ebenfalls ausschlaggebend ist die breite Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger neuer Technologien mit dem Label „Made in Europe“. Diese

zeichnen sich dadurch aus, dass bereits in den frühen Phasen ihrer Konzipierung ein enges Bewertungskorsett angesetzt wird. Strenge Kriterien evaluieren, welche potenziellen negativen Effekte bei einer künftigen Nutzung der Technologie auftreten könnten. Dies ähnelt dem aus der IT-Sicherheit bekannten Konzept des „Security-by-Design“, mit dem künftige Cybersicherheitsrisiken präventiv ausgeschlossen werden sollen. Die Einführung neuer Technologien wird zudem von zwei vertrauensbildenden Komponenten flankiert. Einerseits von intensiven, inhaltlichen Debatten im EU-Parlament mit Aufhebung des Fraktionszwangs auf hohem Niveau, andererseits von einem breiten öffentlichen Diskurs über die Frage: Was ist gesamtgesellschaftlich hinnehmbar und was nicht? Technologien, welche die hohen Zulassungshürden nehmen, erhalten das eigens dafür geschaffene Siegel „EU Trustworthy Technology“. Maßgeblich hierfür ist die europaweite Konvention über den verantwortungsbewussten Umgang mit neuen Technologien, der sich alle europäischen Technologieunternehmen verpflichtet haben. Das Vertrauen der Menschen in die Technologien „Made in Europe“ mit diesem Siegel ist groß. Die Technologieunternehmen kommunizieren zudem transparent, welche verbleibenden – wenn auch marginalen – Risiken im Umgang mit Technologien auftreten könnten und wie mit diesen umzugehen wäre. Zusätzlich wurde der Vertrieb stark risikobehafteter Technologien aus dem nicht europäischen Ausland verboten – sofern diese geringere Standards hinsichtlich Technologieentwicklung und -nutzung aufweisen.



Das Risikoprofil von Technologien bestimmt deren Einsatz

Starke Entgrenzungstechnologien mit hohem ethischen Konfliktpotenzial und einem potenziellen Überhang an Risiken finden somit keinen Einzug in den Lebensalltag der Menschen in Deutschland. Dies gilt etwa bei invasiven Gehirnschnittstellen (z. B. Brain-Computer-Interfaces [BCI]), die in anderen Weltregionen mittlerweile für bestimmte Nischenanwendungen genutzt werden. Als zu groß erachten europäische Politik und Zivilgesellschaft das gesamtgesellschaftliche Risiko, wenigen Menschen hierdurch die Aussicht auf bisher nie da gewesene kognitive Kapazitäten zu verleihen. Das Gleiche gilt für gesundheitliche Folgen für die Einzelne bzw. den Einzelnen durch invasive Schnittstellen, etwa in Form von Hirnblutungen, Infektionen des Gehirns oder langfristigen Effekten auf kognitive Prozesse. Niemand möchte diese einfach so billigend in Kauf nehmen, um damit – wenn auch effektiv – neurologische Krankheiten zu therapieren oder querschnittsgelähmten Menschen wieder ein selbstbestimmtes Leben zu ermöglichen. Das bedeutet jedoch nicht, dass ähnliche Entgrenzungstechnologien nicht auch in Europa zum Einsatz kommen – nur eben „The European Way“. Wenn die Chancen also überwiegen und die Risiken überschaubar und weitestgehend kontrollierbar sind, wird die Technologie zugelassen. Hierzu zählen z. B. nicht invasive Gehirnschnittstellen. Da deren Risikoprofil begrenzt ist, finden diese flächendeckend in medizinischen Therapien Anwendung – etwa zur Behandlung neurologischer Krankheiten.



Entgrenzung in der „Light-Version“

Dies gilt auch in anderen Technologiebereichen, die einen Dual-Use-Charakter haben. So haben in anderen Teilen der Welt digitale Androiden bzw. virtuelle Menschen, also netzwerkbasierte, emotionale Imitationen echter Menschen, die nicht mehr von echten Menschen unterschieden werden können, ganz selbstverständlich einen festen Platz im Lebensalltag der Bevölkerung. In Deutschland und Europa nutzt man stattdessen digitale Androiden „light“. Diese Light-Varianten digitaler Androiden sind durch digitale Markierungen jederzeit als künstlich geschaffene Subjekte erkennbar. Potenziellen Täuschungen und Fakes, etwa im politischen Kontext, wird so regulatorisch entgegengewirkt. Gleiches gilt für Fehleinschätzungen des Verhaltens digitaler Androiden seitens der Nutzerinnen und Nutzer durch ganz natürlich ablaufende anthropomorphisierende Zuschreibungen. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei der Nutzung von smarten Kontaktlinsen. In anderen Weltregionen „verschmelzen“ diese teilweise – für Dritte nicht mehr erkennbar – mit der Nutzerin oder dem

Nutzer und beinhalten eine große Bandbreite an Funktionalitäten. Die europäischen Pendants sind dagegen bewusst abgespeckte Versionen. In Deutschland ist für Außenstehende über spezifische Farbgebung oder blinkende LEDs in der künstlichen Retina jederzeit sichtbar, ob Menschen im direkten Umfeld smarte Kontaktlinsen tragen. Kamerafunktionen in Hightech-Linsen müssen zudem strengen datenschutzbezogenen Anforderungen standhalten, etwa durch die automatische Verschleierung von Gesichtern auf Aufnahmen. Die Verwendung der erhobenen Daten ist streng reguliert. Die strikte Regulierung trifft jedoch nicht nur auf Zustimmung. Im Darknet hat sich ein florierender Schwarzmarkt für Entgrenzungstechnologien aus dem Ausland entwickelt. Hier decken sich Technologieenthusiastinnen und -enthusiasten genauso wie Menschen mit kriminellen Absichten mit Technologien ein, die in Europa nicht zugelassen sind. In einer groß angelegten Razzia Anfang des Jahres 2030 konnten die Sicherheitsbehörden smarte Kontaktlinsen aus dem nicht europäischen Ausland im Gesamtwert von einer Million Euro konfiszieren. Immer wieder kommt es mit solchen Technologien zu medienwirksamen Fällen von Industriespionage oder Internetbetrug.



Enhancement und Entlastung durch Technologien sind stark gefragt

Zukunftssignal aus der Gegenwart

In der Taskforce TRUST arbeiten u. a. Akademikerinnen und Akademiker sowie Forschungsexpertinnen und -experten an der Entwicklung zentraler, u. a. auf die Problematik des Ethics Dumpings zugeschnittener Verhaltenskodizes. Einer davon wurde von der Europäischen Kommission bereits übernommen. Forschungsgelder für Forschungsprojekte in der EU werden nur dann bewilligt, wenn die Forschung strengen ethischen Praktiken genügt.

Quelle: Perryer, S. (2019).

Im medizinischen Kontext sind entgrenzende Technologien gelebte Praxis, vor allem aus dem Bereich der Technologisierung von Biologie: So dienen passive Exoskelette zur Unterstützung der Wiederherstellung der Lauffähigkeit von Patientinnen und Patienten im Rahmen physiotherapeutischer Behandlungen. Auch der temporäre Einsatz von künstlichem Blut bei dringend benötigten Bluttransfusionen nach einem Unfall ist Standard. Darüber hinaus nutzen die Menschen in Deutschland aber im Zuge der größeren Gewichtung leistungsbezogener Werte mittlerweile freiwillig auch ganz selbstverständlich schwache

Entgrenzungstechnologien für das sogenannte nicht therapeutische Enhancement – also für die Erweiterung bzw. Steigerung „natürlicher“ menschlich möglicher Fähigkeiten. Typische Anwendungen beinhalten z. B. Smart Glasses, die mittels einer Augmented-Reality-Schnittstelle relevante Informationen in das Sichtfeld der Anwenderin oder des Anwenders einblenden. Damit sollen gefühlte Informationsvorteile gegenüber anderen erlangt oder Arbeitsaufgaben schneller durchgeführt werden. Im Zuge des demografischen Wandels hat auch der Markt für passive Exoskelette Hochkonjunktur. Ältere Menschen genießen die neu gewonnene Mobilität und Unabhängigkeit. In vielen Haushalten finden sich zudem humanoide Roboter, welche die Menschen vor allem bei repetitiven Tätigkeiten unterstützen – und somit ein gewisses Maß an zusätzlicher Entlastung im stark verdichteten Alltag bieten.



Umweltschutz als kontrovers diskutiertes Einsatzfeld

Gerade im Nachhaltigkeitsbereich schreitet die Implementierung von Technologien mit Entgrenzungspotenzial stark voran, auch um die ehrgeizigen Dekarbonisierungsziele des European Green Deal zu erreichen. Digita-

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Forscherinnen und Forscher am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickeln den Grundstock für eine ökologische Batterie, die auf einer Kombination von lebenden und unbelebten Materialien besteht. Diese „mikrobiellen Cyborgs“ erzeugen mithilfe eines Bakteriums, welches in ein Nanokompositgerüst eingebunden wird, Elektronen und fungieren somit als Stromlieferanten.

Quelle: KIT (2020).

le Assistentinnen bzw. Assistenten beraten Menschen, wie sie sich umweltverträglicher verhalten können. In industriellen Wertschöpfungsprozessen messen Biosensoren Emissionen. Von der Natur inspirierte Funktionsprinzipien aus dem Bereich der Biomimetik haben zu Entwicklungssprüngen bei Energiespeichern geführt. Dabei gibt es regelmäßig kontroverse Debatten zwischen Vertreterinnen und Vertretern aus Politik, Wissenschaft und Wirtschaft darüber, welche Risikobereitschaft eingegangen werden sollte, um den anthropogenen Einfluss auf die natürliche Umwelt einzudämmen. Dies offenbart sich insbesondere mit Blick auf den Einsatz von Technologien, die vermehrt biologische Eigenschaften integrieren. Deren künftige Kontrollierbarkeit ist – etwa bezogen auf ihre symbiotische Koexistenz mit syn-

thetischen oder natürlichen Systemen – schwerer abzuschätzen als jene aus der digitalen Welt. Potenzielle Kaskadeneffekte können aus dem Status quo heraus und infolge kaum vorhandener Erfahrungswerte nicht adäquat prognostiziert werden. Stark davon beeinflusst sind die Forschungsbereiche rund um die Biofabrikation und biohybride, lebendige Materialien. Ihr Nutzen für die Umwelt ist unbestritten, etwa in Form adaptiver Baumaterialien, die CO₂ absorbieren und sich selbst heilen können. Doch selbst beim kleinsten Verdacht auf potenzielle Risiken kommen vermeintlich sichere Technologien auf den Prüfstand. Können Restunsicherheiten nicht ausgeräumt werden, bleibt die Vergabe von Fördergeldern aus. Forschung und Entwicklung wird so direkt durch die Implementierung von Verboten oder kaum zu erfüllenden Restriktionen eine Absage erteilt.



Forschungswelt im Wandel

Risikoaffine Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sind mit dieser, aus ihrer Sicht nicht hinnehmbaren Situation mangelnder Forschungsperspektiven unzufrieden. Viele packen ihre Koffer und kehren Deutschland und der EU den Rücken. Es zieht sie in Länder wie China oder die USA, wo sie ihre wissenschaftlichen Studien in einem risikofreudigeren Umfeld mit niedrigeren forschungsethischen Grundsätzen durchführen können. Dies übt zusätzlichen Druck beim Kampf um die besten Köpfe im Forschungssektor aus. Das in der Vergangenheit noch verbreitete „Ethics Dumping“ ist nur noch eine Randerscheinung. Die Möglichkeit für Unternehmen, Spinoffs in anderen Ländern zu gründen, um dort unethische Forschungsaktivitäten zu praktizieren, ist durch die Implementierung strenger Verhaltenskodizes und die Vergabestandards für Forschungsgelder stark eingeschränkt. Auf der anderen Seite hat der hohe Stellenwert des ethischen Kompasses in Deutschland und der EU auch dazu geführt, dass ehemals umstrittene Forschungspraktiken wiederaufgenommen wurden. Dies gilt etwa für Praktiken, die originär auf verbotenen Tierversuchen basieren und nun mithilfe der Biologisierung von Technologie wieder möglich sind. Hierzu zählen mitunter Organs-on-a-Chip, mit denen sich Effekte der Technologisierung von Biologie in einem künstlich geschlossenen System unter Laborbedingungen

evaluieren lassen. Die Prüfung potenzieller Risiken künftiger Formen der Entgrenzung in der einen Dimension⁹¹ erfolgt also zusehends mithilfe von Technologien der Entgrenzung in der anderen Dimension.



Exemplarische Kernanwendungsfelder der Entgrenzung



Arbeit

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Im Jahr 2020 wurde die „Nationale Bioökonomiestrategie“ erlassen, die das Ziel der Bundesregierung unterstreicht, den Wandel hin zu einer nachhaltigen biobasierten Wirtschaftsweise zu unterstützen. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf biohybriden Technologien.

Quelle: BMBF (2020).

Im Berufsleben werden Beschäftigte über sämtliche Sektoren hinweg in ihrer Arbeit umfassend durch Smart Glasses oder smarte Kontaktlinsen unterstützt. Die digitalen Geräte nehmen eine klar definierte Rolle als „Digital Companions“ ein: Sie liefern kontextrelevante Informationen, überwachen Tätigkeiten und helfen bei der Entscheidungsfindung. Gleichermaßen verhält es sich mit digitalen Androiden. Diese fungieren als virtuelle Assistenzsysteme, um den Arbeitsalltag zu erleichtern und Prozesse zu optimieren. Sie haben dabei aber keine Entscheidungsautonomie. Der Mensch behält die Entscheidungshoheit und kann von den digitalen Assistentinnen bzw. Assistenten ausgelöste Aktionen jederzeit wieder rückgängig machen. In seltenen Fällen verschlechtern sich die

Arbeitsbedingungen allerdings auch durch die allgegenwärtige Taktvorgabe von Maschinen.

In Arbeitsumgebungen mit hohem Gefährdungspotenzial, z. B. in der chemischen Industrie, finden sich immer häufiger risikoarme, biohybride Materialien. Diese verbessern den Arbeitsschutz, indem sie etwa zielgerichtet ihre Farbgebung wechseln, wenn sich toxische Stoffe in der Raumluft befinden. Sie sind so ein zusätzlicher Indikator für Gefahrensituationen. In physisch anstrengenden Jobs, wie etwa im Bausektor oder in der industriellen Fertigung, sind zudem Exoskelette zum Standard-Equipment geworden. Arbeiterinnen und Arbeiter sollen körperlich entlastet werden. Das Ziel ist ein insgesamt gesundheitlich zuträglicheres Zusammenspiel von Mensch und Arbeitsmitteln. Gerade ältere Menschen haben somit die Möglichkeit, länger am Arbeitsmarkt zu partizipieren.



Gesundheit und Pflege

Der Gesundheits- und Pflegebereich hat sich die Vorteile unterschiedlicher Entgrenzungstechnologien „Made in Europe“ zunutze gemacht. Die Kompatibilität der Technologien mit hohen ethisch-moralischen Standards ist hierbei handlungsleitend. In physiotherapeutischen Behandlungen kommen Exoskelette bei der Wiederherstellung des Bewegungsapparats und dem Wiederaufbau von Muskulatur zum Einsatz.

⁹¹ Gemeint sind die beiden Dimensionen der Entgrenzung: a) Technologisierung des Menschen und b) Biologisierung von Technologie.

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Der deutsche Ethikrat diskutiert ethische Herausforderungen der Verwendung von Robotern im Pflegebereich. Demnach müsse der Mensch weiterhin im Mittelpunkt stehen „als Pflegender und auch zu Pflegender“. Roboter werden bewusst als Assistenzroboter bezeichnet.

Quelle: Deutsches Ärzteblatt (2019).

Künstliches Blut ist eine häufig genutzte Option, um kurzfristige Engpässe bei dringend benötigten Bluttransfusionen zu überbrücken. In der Altenpflege werden Pflegerinnen und Pfleger durch einfache humanoide Roboter als eine Art Hilfswerkzeug unterstützt, etwa bei Hebe- oder Transporttätigkeiten. Die Roboter sind in ihrer Autonomie stark beschränkt, auch um poten-

ziellen Datenschutzrisiken oder psychologischen Effekten entgegenzuwirken. Diese können bei der Applikation voll autonomer, emphatischer und mit einer Vielzahl von Sensorik und Kameras ausgestatteten Androiden auftreten. Der emotionale, soziale Dialog mit Patientinnen und Patienten obliegt nach wie vor exklusiv dem menschlichen Pflegepersonal.

Forschung und Entwicklung

Während einer starken Entgrenzung im privaten Kontext regulationsseitig häufig ein Riegel vorgeschoben wird, offenbart sich im Forschungs- und Entwicklungsbereich eine andere Situation. Hier wird unter strenger Kontrolle innerhalb von Forschungseinrichtungen ein breites Spektrum von Entgrenzungstechnologien als Alternative zu Tierversuchen erprobt. Dies geschieht einerseits aus ethischen Gründen und andererseits, um im globalen Forschungs- und Innovationswettbewerb im Hinblick auf die Erforschung von Krankheiten und der Entwicklung von Pharmazeutika einen Geschwindigkeitsvorteil zu erlangen. Hierfür kommen u. a. Bioroboter, Organs-on-a-Chip oder auch synthetische Zellen zum Einsatz. An diesen wird jedoch nicht nur die Wirksamkeit von Medikamenten untersucht. Sie spielen auch eine wichtige Rolle bei der Entwicklung künstlicher Simulationen für komplexe natürliche Systeme, um Risikobewertungen von Produkten und Prozessen mit potenziell umweltschädlichen Eigenschaften durchzuführen.

Eine weitere Technologie, die einen gesonderten Forschungs- und Förderungsschwerpunkt in Deutschland und Europa darstellt, sind biohybride Prozessoren bzw. sogenannte biologische Computer. Diese vereinen konventionelle Chiptechnologien mit neuronalen Zellen oder auch molekularen Grundbausteinen von Zellen (DNA, RNA, Peptide, Proteine). Mit ihrer Hilfe soll ein wettbewerbsfähiges, europäisches Ökosystem für Hochleistungsrechner entstehen.

Umwelt und Energie

Gerade im Umwelt- und im Energiebereich halten Entgrenzungstechnologien Einzug – sofern etwaige Risiken folgen deutlich überschaubar und klar umrissen sind. Mit innovativen Herangehensweisen, die sich die Vorteile der Entgrenzung zunutze machen, konnten einige Unternehmen im Bereich von Dekarbonisierung und Nachhaltigkeit auch im nicht europäischen Ausland neue Märkte erschließen. Hierzu zählen z. B. neuartige Formen von biohybriden Materialien und Biofabrikation, die der grünen Wasserstofftechnologie in Kombination mit effizienten Brennstoffzellen letztendlich zum (internationalen) Durchbruch verholfen haben. Ein Stützpfeiler der Umsetzung der Wasserstoffstrategie sind etwa dezentrale Wasserstoffkraftwerke, die Wasserstoff unter Zuhilfenahme von synthetisch veränderten Algen und Bakterien-Hybridmaterialien erzeugen. Ebenso weit verbreitet sind neue Energiespeichertechnologien, deren Elektroden biobasierte Kompositmaterialien beinhalten.

3.3.2 Anwendungsszenario 2: Wettbewerbsmodus

i Szenariorahmen



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

© BMBF2020.

Die leitenden Prinzipien der ökonomischen Liberalisierung sind fairer Wettbewerb, gleiche Ausgangsbedingungen für alle, Eigeninitiative, freie Entfaltung und Eigenverantwortung: Werte, die durch das persönliche Haftungsprinzip bestärkt werden. Während das Wirtschaftswachstum besonders in den Bereichen Bildung und Forschung stabil ist, verschärft sich die Situation an anderen Fronten: Der Klimawandel und Umweltprobleme nehmen drastisch zu, Extremwetterperioden werden häufiger. Das bedeutet auch, dass Ressourcen knapper werden und Lösungen, die sich an den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft orientieren, sind gefragter als je zuvor. Auch der Fachkräftemangel in Deutschland bleibt weiterhin bestehen, wodurch Arbeitsprozesse zunehmend automatisiert werden. Aber nicht nur wirtschaftlich werden Prozesse und Strukturen effizienter: Auch privat orientieren sich die Menschen immer stärker an Leistungsprinzipien, was u. a. durch eine gesunde Lebensweise und eine bewusste Ernährung zum Ausdruck kommt.

Diesem schnellen Wandel sind jedoch nicht alle gewachsen: Stresserkrankungen und Depressionen steigen kontinuierlich, viele Menschen können beim hohen Tempo der Arbeitswelt nicht mehr mithalten. Die persönliche Gesundheit, Eigenverantwortung und Selbstverwirklichung stehen in einer vom Individualismus geprägten Gesellschaft an oberster Stelle. Gleichzeitig werden auch kreative Prozesse wichtiger, die immer mehr auch von künstlicher Intelligenz unterstützt werden. Bewusstseinsorientierte Werte werden individualisiert, ökonomisiert und dadurch neu aufgeladen: Klima- und Umweltschutz werden vorrangig in Geschäftsmodellen gedacht – z. B. durch den Handel mit Klimazertifikaten.



VERWENDETE BIODIGITALE TECHNOLOGIEN

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



VERWENDETE BIODIGITALE TECHNOLOGIEN

- | | |
|---------------------------------------|---------------------|
| Digitale Androiden | Humanoide Roboter |
| Biosensoren | Biofabrikation |
| Biohybride Materialien | Synthetische Zellen |
| Androiden mit Allround-Funktionalität | |



Selbst ist der Mensch

„Fail quick, learn fast“ ist das häufig zu vernehmende Credo dieser Zeit. Erfindergeist und Eigeninitiative eröffnen ganz neue Dimensionen des technologischen Fortschritts. Der Staat arbeitet darauf hin, gleiche Bedingungen für eine leistungsfähige Gesellschaft zu schaffen, negative Effekte des Wachstums auszugleichen und die Produktivität in der Wertschöpfung zu steigern. Auch der Einsatz von Entgrenzungstechnologien richtet sich an diesen Zielen aus. Die meisten Unternehmen und Bürgerinnen und Bürger halten es pragmatisch: Solange sich ein echter sozialer oder ökonomischer Mehrwert ergibt und der Einfluss auf Organismen und Ökosysteme einschätzbar bleibt, ist die Verschmelzung von Biologie und Technologie legitim. Die Einschätzung der Legitimität hängt dabei von der persönlichen Einstellung ab und wird öffentlich und im privaten Kreis lebhaft diskutiert. Protestbewegungen wirken als Korrektiv und weisen regelmäßig darauf hin, dass die gleichen Ausgangsbedingungen eingehalten werden sollen. Doch wie in allen Lebensbereichen gilt der Wettbewerb der besten Argumente.



Alltäglicher Wettbewerb

Um den herausfordernden Alltag zu meistern, greifen die Menschen begeistert alles auf, was Erleichterung verspricht. Convenience ist der Treiber hinter einer weitreichenden Akzeptanz digitaler Assistentinnen bzw. Assistenten, die für eine reibungslose Organisation des Familienlebens und der beruflichen Karriere sorgen. Wer es sich leisten kann, setzt auf erste Allround-Androiden, die physische Tätigkeiten im Haushalt einem Butler gleich übernehmen.

Privat- und Arbeitsleben sind kaum noch trennbar. Die knappe Freizeit wird häufig mit Freundinnen und Freunden für „Brainstorming-Sessions“ für die nächste durchschlagende Geschäftsidee oder sportliche „Challenges“ genutzt. Insbesondere beim Sport wird „höher, besser, weiter“ auf die Spitze getrieben. Mittlerweile gibt es Extremkletter- oder Survival-Wettbewerbe mit Exoskeletten, ähnlich dem E-Bike-Boom. Neben den vielzähligen digitalen Personal Trainerinnen und Trainern, die einen immer und überall an das nächste Workout erinnern, etablieren sich aber auch zunehmend Einrichtungen, die Achtsamkeit, Ruhe und soziale Interaktion fördern sollen. Immer häufiger kommen auch „softe Roboter“ zum Einsatz, die bei der Bewältigung von Stress- und Drucksituationen im Alltag helfen. Denn immer mehr jungen Menschen fehlt diese emotionale Unterstützung in ihrem sozialen Umfeld.



Vom Talent zum Skill

Der stark kompetenzbasierte und auf kurzfristige Tätigkeiten ausgerichtete Arbeitsmarkt erfordert zunehmend die vorübergehende Optimierung spezifischer Fähigkeiten. Für manche Menschen bedeutet das: heute Kreativjob, morgen Programmieren für komplexe Datenanalysen. Viele Menschen nutzen technische Hilfsmittel, um sich selbst zu optimieren und ihre Kreativität und explorativen Kompetenzen zu fördern. Geräte zur Magnetstimulation der entsprechenden Hirnregionen sind überall erhältlich, potenzielle langfristige Effekte auf den kognitiven Zustand der Gesellschaft hierdurch werden ausgeblendet. Auch biohybride Systeme, die die Konzentrationsfähigkeit steigern und das Schlafbedürfnis abschwächen, sind in aller Munde. Dies geht von Biosensoren über die Transfusion mit künstlichem Blut bis hin zu Nanobots, die Mikrodosen an biologischen Wirkstoffen extern gesteuert an Rezeptoren andocken.

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Gaming ist heute ein Leistungssport und damit auch betroffen von Doping. Dabei geht es vor allem um die Aufrechterhaltung der Konzentrationsfähigkeit über einen langen Zeitraum. Diese Anforderung gibt es auch in anderen Lebensbereichen, insbesondere im Beruf. Neben „echten“ Drogen wären künftig auch Methoden zur Hirnstimulation denkbar, um die persönliche Leistungsfähigkeit zu steigern.

Quelle: Wolf, C. (2019).

Diese Innovationen können jedoch nicht über den unaufhaltsamen Anstieg von Stress und Depressionen im Alltag hinwegtäuschen. Im Gegenteil: Sie verstärken zusätzlich die Wahrnehmung vieler Bürgerinnen und Bürger, dass die eigenen Fähigkeiten nicht ausreichen, um im harten sozialen Wettbewerb zu bestehen. Ebenso schafft der Einsatz der Technologien selbst neue Drucksituationen. In der Öffentlichkeit rufen die teils als extreme Entgrenzung wahrgenommenen Eingriffe zunehmend Kritik hervor. Ein Zusammenschluss aus der neu gegründeten Gewerkschaft für „Digital Entrepreneurs“ und dem Ethikrat legt ein Gutachten vor, welches

die Risiken von „biotechnischen Substanzen im beruflichen Kontext“ analysiert und als Grundlage für eine entsprechende Regulierung von „Doping im Job“ bilden soll.



Liberalisierung persönlicher Daten

Mit der dritten Revision der DSGVO gelingt der EU-Kommission der lang erwartete Coup im politischen Kampf um die Hoheit über persönliche Daten. Während viele Unternehmen die andauernde Liberalisierung begrüßen, sehen insbesondere europäische

Konzerne die neue Regulierung als große Chance für passgenau individualisierte Angebote und als wesentlichen Meilenstein für die Vermeidung von digitalen Monopolen rund um die großen globalen Player aus dem Bereich „Big Tech“. Ein von Brüssel aus verwalteter sogenannter Data-Trust mit regionalen Rechenzentren übernimmt die Koordination der Sammlung von Nutzungsdaten und des Zugangs dazu. Private Unternehmen müssen Daten ihrer Kundinnen und Kunden mit deren Autorisierung dort hinterlegen und von dort abfragen. Die Skaleneffekte aus der Sammlung von Daten kommen allen Unternehmen gleichermaßen zugute. Der Staat ist gleich-

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Die Macht außereuropäischer Digitalkonzerne basiert auf dem Sammeln von unzähligen Nutzerinnen- und Nutzerdaten innerhalb globaler Plattformen. Die EU möchte mit einem neuen Gesetz, dem „Digital Services Act“, deren Marktdominanz auch nach der Entstehung einschränken können. Zudem soll die einheitliche europäische Dateninfrastruktur „GAIA-X“ die sichere Speicherung von und den gleichberechtigten Zugang zu persönlichen Daten bieten, unabhängig von den Anbieterinnen und Anbietern digitaler Services.

Quelle: Fanta, A.; Rudl, T. (2020).

zeitig zu einem wichtigen Player im Cloud-Geschäft geworden und investiert hohe Summen in die Entwicklung immer leistungsfähigerer Prozessoren. In einigen Rechenzentren werden hybride Prozessoren eingesetzt, um den Tageszeiten entsprechend optimale Abfrageraten bei maximaler Energieeffizienz zu gewährleisten.

Die neue Regulierung verschafft insbesondere Start-ups im Wellness- und Gesundheitssektor einen neuen Schub. Immer mehr Menschen erkennen die Vorteile von Wearables oder Biosensoren, mit denen sich Vitaldaten kontinuierlich nachverfolgen lassen. Andere lassen sich individuell zusammengestellte Nahrungsergänzungsmittel liefern, die auf einer DNA-Analyse basieren. Individuelle Gesundheitsdaten bilden außerdem die Grundlage für die Entwicklung und Implantation künstlicher Organe. Diese sind notwendig, um die Anpassung der maschinell erstellten Implantate an die persönlichen Körperbedingungen sicherzustellen.



Pragmatische Entgrenzung in der Wirtschaft

Noch Mitte der 2020er-Jahre waren die Zweifel, ob sich Körperfunktionen eines Tages nahezu uneingeschränkt synthetisch replizieren lassen, groß. Ebenso ausgeprägt waren die Befürchtungen vieler Menschen, dass die weitreichende Einführung von Robotik in der Industrie den massenhaften Verlust von Arbeitsplätzen zur Folge haben könnte. Dies hat sich nicht bewahrheitet. Das immense Wachstum der vergangenen Jahre hat den stetigen Ausbau der Robotik erfordert und ermöglicht. Insbesondere manuelle Tätigkeiten, die bis vor Kurzem noch in Niedriglohnländern angesiedelt waren, können heute wieder auf dem europäischen Kontinent erfolgen. Um die Automatisierung in der Produktion weiter auszurollen, bedarf es jedoch neuer, intuitiver Schnittstellen, die das flexible Programmieren von Robotik auch durch wenig geschultes Personal ermöglichen. Ein deutscher Hersteller für wasserstoffbetriebene, autonome Fahrzeuge testet nicht invasive Gehirnschnittstellen, um vor allem Berufseinsteigerinnen und -einsteiger aus dem Ausland schneller in der extrem komplexen Produktionssteuerung einsetzen zu können. Zusätzlich werden für Schulungen und Sicherheitsanweisungen smarte Kontaktlinsen verwendet, um Sprachbarrieren zu überwinden und gleichzeitig einen Sprachlernerfolg zu erzeugen.

Zukunftssignal aus der Gegenwart

„Alle hypothetischen Fälle abfangen, unabhängig davon, mit welcher Wahrscheinlichkeit diese eintreten“ – dieser Vorwurf der Überregulierung wird in der Diskussion um ein Regelwerk für den Einsatz künstlicher Intelligenz immer lauter. Er basiert auf dem Umstand, dass viele digitale Anwendungen bereits heute zuerst im Ausland entstehen und getestet werden, um die entweder unpräzise oder starre Regulierung in Deutschland oder Europa zu umgehen.

Quelle: Siebenhaar, H.-P. (2020).

Auf der Consumer Electronics Show (CES) in Las Vegas wurde im Januar 2020 erstmals auch ein invasives BCI vorgestellt, mithilfe dessen sich Gedanken direkt aufzeichnen lassen, ohne eine aktive Kommunikation der Benutzerin bzw. des Benutzers zu erfordern. Auch ein deutsches Team ist an dem Projekt beteiligt. Zwar steht die Technologie noch am Anfang, sie löste aber bereits eine intensive öffentliche Debatte aus, die es bis in den Bundestag geschafft hat. Die Forderung nach einer Konkretisierung des bestehenden Rechtsrahmens zur Sicherstellung einer kontrollierbaren Entgrenzung wird lauter.

Ganz anders sind die Reaktionen auf den Einsatz von Biofabrikation für ökologischere Verpackungen und Kleidung. Einerseits sind die Auswirkungen des Klimawandels immer deutlicher spürbar. Auf der anderen Seite sehen sich immer mehr Menschen einer erheblichen Zeitverdichtung im Alltag gegenüber. Die Nachfrage nach echten nachhaltigen Produkten, die gleichzeitig keine Einschränkungen im Alltag erfordern oder diesen gar erleichtern, steigt daher enorm.



Exemplarische Kernanwendungsfelder der Entgrenzung



Finanzen

„Fail quick, learn fast“ als neues Credo der deutschen Unternehmenszene wirkt sich bis in die Mitte der Gesellschaft aus. Das Verständnis für Investitionen verändert sich grundlegend; Scheitern wird als valide Option mit eingepreist. Als Konsequenz aus dem gesetzlich festgeschriebenen Haftungsprinzip entstehen auch neue Versicherungsangebote für Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger, die sowohl individuelle als auch organisatorische Entscheidungen absichern. Über KI-Analysen werden wirtschaftliche und gesellschaftliche Risiken abgewogen. Eine zu starke Entgrenzung bei biotechnischen Innovationen stellt für diese Angebote jedoch häufig eine unüberwindbare Hürde dar. Beispielsweise gelten die durch digitale Androiden entste-

henden alternativen Realitäten oder die Nutzung von invasiven Brain-Computer-Interfaces als nicht versicherbar. Zwar gibt es hierzu weitgehende Forschung, dennoch scheuen sowohl Investorinnen und Investoren als auch Gründerinnen und Gründer bisher weitestgehend die Nutzung der Technologie.

Bauen und Stadtplanung

Der Bausektor ist einer der größten Profiteure der Liberalisierung. Noch vor zehn Jahren stellten die strengen baulichen Vorschriften große Hürden für den Einsatz neuer Materialien und Bautechniken dar. Durch die umfangreiche Vernetzung von städtischen Infrastrukturen und eine datenbasierte Bauplanung lassen sich Gebäude schon vor der Errichtung nahezu vollständig simulieren. Künstliche Intelligenz wird dabei nicht nur für den optimalen Materialeinsatz bei der Konstruktion eingesetzt. Selbstlernende Computersimulationen ermitteln auch den Einfluss von immer stärker schwankenden Umwelteffekten auf neue integrierte Wohn- und Gewerbekomplexe. Damit lassen sich beispielsweise hitze- oder wasserabweisende Materialien an stark beanspruchten Stellen platzieren.

Auch die gesamten städtebaulichen Strukturen bedürfen einer Anpassung an die extreme Urbanisierung, die zunehmenden Umweltschäden und eine umfassende Vernetzung. Eine Vielzahl an Technologie-Start-ups hat sich bereits auf die Entwicklung von selbstheilenden, CO₂-absorbierenden und energiegenerierenden, biohybriden „lebendigen“ Materialien fokussiert. Ein europäischer Fonds fördert deren Bemühungen und verleiht jährlich den „Material Innovation Award“. Im vergangenen Jahr gewann diesen ein deutsches Team, welches biohybride Straßenmodule mit Membraneigenschaften produziert. Diese sind in der Lage, bei Starkregen Wasser schwammartig zu absorbieren und über Kapillarstrukturen langsam an umliegende Grünflächen abzugeben.

Kommunikation

Auch im Jahr 2030 stellt echte soziale Interaktion im virtuellen Raum eine Herausforderung dar. Zwar sind virtuelle Meetings per digitalem Avatar zum Standard geworden. Die Vermittlung von komplexen Emotionen und körperlicher Nähe bewältigen diese aber kaum. Einzelne Versuche mit 3-D-gedruckten Anzügen aus synthetischen Zellen, die Berührungen als haptisches Feedback wiedergeben, sind bisher nicht im Massenmarkt angekommen. Social Media hat sich dagegen grundlegend verändert: Die Kanäle werden kaum noch durch tatsächliche Personen bespielt, stattdessen tummeln sich digitale Influencerinnen und Influencer mit virtuellen Lifestyle-, Unterhaltungs- oder Verkaufsangeboten. Die Kommunikation verändert sich nicht nur mit Individuen, sondern auch mit Organisationen: Die Chatbots der 2020er-Jahre haben sich zu vollwertigen digitalen Kundenberaterinnen und -beratern entwickelt. In einigen öffentlichen Verwaltungen erhalten Bürgerinnen und Bürger ihre persönlichen digitalen Androiden für die Abwicklung behördlicher Angelegenheiten.

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Influencing in sozialen Netzwerken ist mittlerweile ein fest etablierter Berufszweig, um gezielt bestimmte Kundinnen- und Kundengruppen zu erreichen. Virtuelle Influencerinnen und Influencer wie „Lil Miqaela“ müssen weder erst selbst von einem Produkt überzeugt noch bezahlt werden – und sind gleichzeitig vollständig individualisierbar.

Quelle: Solokov, M. (2019).

Vor allem standardisierte Prozesse und Anfragen wie Ummeldung, Ausweisbeantragung oder Steuererklärungen können so zu jeder Zeit und individuell bearbeitet werden. Einige Menschen lassen die Kommunikation zudem schon ausschließlich von ihren persönlichen digitalen Assistentinnen und Assistenten erledigen – nur den abschließenden Gesichtsscan zur Bestätigung müssen sie über sich ergehen lassen.

3.3.3 Anwendungsszenario 3: Rückkehr der Blöcke



Szenariorahmen



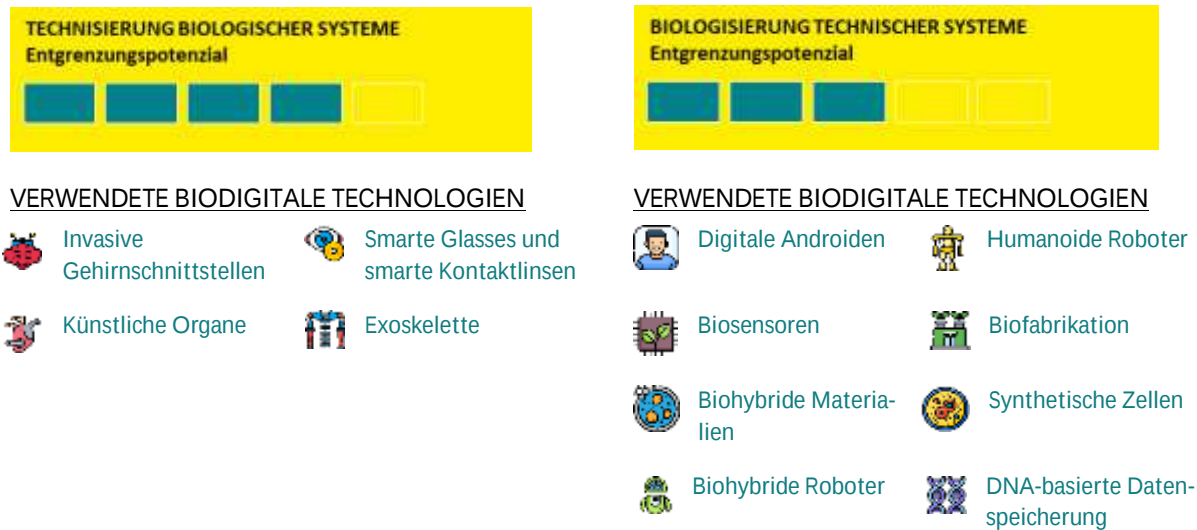
Abschottung statt Exportnation: In den 2030er-Jahren ist Deutschland geprägt von sozialen Herausforderungen und einem schwierigen geopolitischen Umfeld.

© BMBF2020.

Die Welt ist geprägt von neuen Mauern. Globale Wertschöpfungsketten kollabieren, auch die Weltwirtschaft stagniert. Durch die zunehmende Unsicherheit rückt Deutschland mit verlässlichen europäischen Partnerstaaten verstärkt im Bereich der Sicherheitskooperation zusammen. Soziale Strukturen geraten durch die immer stärkeren Einkommensunterschiede ins Wanken, der Mittelstand erodiert – es bildet sich eine sogenannte Sanduhr-Gesellschaft. Die Folgen sind u. a. fehlende Chancengleichheit, gesellschaftliche Zersplitterung und ein für Störungen leicht anfälliges politisches System. Themen wie Migration, Diversität und familiäre Strukturen werden relevanter, andere – wie z. B. der Klimawandel – als Konfliktfaktor abgeschwächt, weil die Auswirkungen in Deutschland weniger spürbar sind als in anderen Teilen der Welt.

Konstant bleibt der Fachkräftemangel in Zukunftsbranchen, der die Wirtschaft nachhaltig schwächt. Eine zunehmende Technologisierung zeigt auf dem Arbeitsmarkt erste Wirkung: Der Staat investiert zunehmend in Robotik und künstliche Intelligenz – und auch in die digitale Verteidigung und Biotechnologie im militärischen Kontext. Damit einher geht die Angst vor einem „Cybergeddon“ – also einer gewaltsamen Umwälzung, die durch Sabotage von Computernetzwerken ausgelöst wird. Es folgt ein digitales Aufrüsten für den Cyberkrieg, was u. a. dazu führt, dass sowohl gefühlte als auch reale Sicherheit und Stabilität sinken. Abweichend von der staatlichen Nutzung wird Technik im Alltag der Menschen eher zurückhaltend eingesetzt.

Durch den Rückzug ins Private rücken Familien und Nachbarschaften näher zusammen. Gleichzeitig wird der Ruf nach mehr gesellschaftlichem Zusammenhalt und Fortschritt lauter – auch im Hinblick auf die stagnierende Lebenssituation der deutschen Bevölkerung. Durch die soziale Spaltung entsteht eine „Demokratie der Wohlhabenden“. Bestimmte Themen und Lebenseinstellungen sind demnach nur für diese gesellschaftliche Gruppe relevant und möglich, beispielsweise ein ausgeprägtes Umwelt- und Gesundheitsbewusstsein oder das Ausleben selbstbestimmungsorientierter Werte.



➤ **Entgrenzung zur Abgrenzung**

In dieser von internationaler Abschottung geprägten Lebenswelt dienen Entgrenzungstechnologien vorrangig der nationalen Sicherheit, der Profilierung nach außen und der Gewährleistung der nationalen Versorgung. Für den Großteil der Bevölkerung gibt es zwei Realitäten: Im Berufsleben sind der Umgang mit Technologien und auch eine relativ starke Entgrenzung die Regel, während die Menschen im privaten Alltag auf technologische Unterstützung infolge der Sicherheitsproblematik teils gezwungenermaßen, teils aus Skepsis verzichten. Durch das „Splinternet“ ist die Vernetzung der Umgebung nur eingeschränkt möglich – der Staat versucht, möglichst alle Quellen für externe Cyberangriffe zu vermeiden. Inkompatible Plattformen und Systeme verschärfen die virtuelle Blockbildung weiter.

➤ **Zur Sicherheit digitale Assistenz**

Viele Dinge, die sich bereits Anfang der 2020er-Jahre abzeichneten, sind jedoch weiterhin möglich: Ob die Zutaten für das Abendessen, die Planung des nächsten Arzttermins oder Anfragen bei der öffentlichen Verwaltung – all das lässt sich ohne Aufwand digital oder teils automatisiert erledigen. Die Gefahr durch Cyberangriffe ist jedoch allgegenwärtig. Künstliche Intelligenz ist daher nach den staatlichen Vorschriften weitgehend nur für Sicherheitsanwendungen und versorgungskritische Systeme einsetzbar.

Viele Menschen nutzen „virtuelle Bodyguards“, um ihre Sicherheit im Netz zu verbessern. Diese digitalen Androiden sind echten Menschen in Aussehen und Verhalten sehr ähnlich. Dadurch können sie sowohl als Köder eingesetzt werden als auch durch fremde KI gesteuerte Angriffe identifizieren. Gleichzeitig setzt der Staat sie ein, um zu gewährleisten, dass sich alle im Netz an die strengen Sicherheitsvorgaben im digitalen Raum halten.

Nicht jede oder jeder gibt sich jedoch mit den starken Einschränkungen zufrieden. Immer wieder decken die Behörden kriminelle Aktivitäten digitaler Androiden auf, die das tatsächliche Verhalten von Menschen verschleiern und diesen so Schwarzmarktbesuche oder den Zugang zu Produkten aus dem Ausland über das Darknet ermöglichen. Zugang zu solchen Lösungen haben jedoch nur wenige Wohlhabende. Es gibt auch

virtuelle Gegenbewegungen jenseits der allumfassenden Überwachung. Diese sind teilweise international organisiert und versuchen mit gezielten Cyber-Störaktionen, das globale Blockgefüge zumindest kurzzeitig aufzubrechen.



„Business on the Edge“

Die meisten Organisationen hatten sich nach der Jahrtausendwende auf eine allumfassende Vernetzung eingestellt und viel Geld investiert, damit Kundinnen und Kunden ihre Leistungen über das Internet nutzen können. Im Jahr 2030 gelten nun räumlich und zeitlich beschränkte Netzwerke oft als einziger Weg, um den hohen

Zukunftssignal aus der Gegenwart

DNA ist nicht nur aus medizinischer Sicht interessant – die Proteinstränge werden auch für die Nutzung als organische Datenspeicher erforscht. Dabei werden digitale Daten in die physische Struktur synthetischer DNA „übersetzt“. Sowohl die Harvard University als auch die University of Washington in Zusammenarbeit mit Microsoft konnten bereits erfolgreich digitale Daten in die physische Struktur synthetischer DNA „übersetzen“. So ließen sich künftig mikroskopisch kleine und gleichzeitig extrem langlebige Datenspeicher formen, die sich bei Bedarf einfach bewegen lassen.

Quelle: Brunker, M. (2016).

nationalen Sicherheitsstandards entsprechen zu können. Universitäten und große Unternehmen schotten sich meist vollständig ab und setzen auf Edge-Computing-Systeme mit lokaler Datenverarbeitung, die sich auf das jeweilige Betriebsgelände beschränkt. Ein Datenaustausch findet häufig nur durch einen Transport von physischen Speichern zwischen Rechenzentren statt – ähnlich wie bei Geldtransporten. Einige findige Dienstleister setzen Androiden ein, um ihre Fahrerinnen und Fahrer zu begleiten. Dabei handelt es sich allerdings um reine Abschreckungsmaßnahmen – die Roboter sind nur in der Lage, über ein Kamerasystem „Schmiere zu stehen“. Um eine sichere Datenverwaltung zu gewährleisten, fällt der Blick vermehrt auf die Fähigkeiten der Natur:

Deutsche Forscherinnen und Forscher gelten als führend in der Entwicklung leistungsfähiger, analoger Computer, die mit ihren einfachen, elektronischen Verknüpfungen dem menschlichen Gehirn nachempfunden sind und spezialisierte Analysen ohne den Einsatz von Algorithmen bewältigen. Um die Übertragungsverluste dieser Verknüpfungen zu vermeiden, wird auch mit biohybriden Materialien experimentiert. Gleichzeitig erleben hackingsichere, biologische Datenspeicher einen wahren Boom: Neben den klassischen Mikrochips werden biologische Verbindungen wie Nukleinsäure (DNA) als portable Speicher bzw. als Tokens für das Freischalten von digital gesicherten Zugängen eingesetzt.



Technologien als Mittel der Geopolitik

Technologische Durchbrüche entstehen im Jahr 2030 hauptsächlich durch militärische Investitionen zur Abwehr von digitalen Angriffen verfeindeter Länder und zur Vorbereitung auf einen befürchteten „Cybergeddon“. Die Offenheit für experimentelle Forschung in diesem Bereich ist groß – die Entgrenzung ist bisweilen stark ausgeprägt, zumindest im Rahmen von Tests und Spezialanwendungen. Ethische Bedenken werden im Lichte der nationalen Sicherheit regelmäßig beiseite gewischt. Forscherinnen und Forscher testen auch die Möglichkeiten invasiver Brain-Computer-Interfaces, um die Fähigkeiten von Programmiererinnen und Programmierern steigern bzw. kopieren und weitergeben zu können. Ziel ist es, die erheblichen Lücken bei qualifiziertem Personal für die Cyberabwehr zu schließen. Solche Projekte finden unter strengster Geheimhaltung statt:

Einerseits genießen sie höchste geostrategische Bedeutsamkeit, andererseits besteht die Gefahr, die große Unsicherheit der Bevölkerung im Zusammenhang mit Technologien zusätzlich zu befeuern. Als Konsequenz aus der neuen geopolitischen Blockbildung konkurrieren private Unternehmen nahezu ausschließlich auf nationaler bzw. auf selektiv internationaler Ebene. Sie haben weder Zugang zu globalen Absatzmärkten, noch können sie entgegen der hohen staatlichen Zulassungshürden agieren. Viele von ihnen haben sich in staatlich

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Bernd Ulman von der Hochschule für Ökonomie und Management in Frankfurt forscht aktuell an einer hybriden Alternative zum heutigen Computer: ein analoger Rechner mit optional einsetzbarer digitaler Schnittstelle. Analoge Super-Computer ermöglichen spezialisierte und hackingsichere Analysen über physische, elektrische Verbindungen. Durch die kontextbezogene Spezialisierung auf jeweils einen Rechenvorgang sind sie auch erheblich leistungsfähiger und energieeffizienter als die digitalen Vertreter.

Quelle: Thimm, N. M. (2020).

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Eine große Herausforderung im Zusammenhang mit Automatisierung durch Robotik ist deren Programmierung. Forscherinnen und Forschern ist es gelungen, nicht invasive BCI zur Steuerung von Robotik über Gedankenströme einzusetzen. Damit könnten künftig nahezu ungelernte Personen beispielsweise Automatisierungslösungen in der Fertigung bedienen. Ein weiteres Beispiel ist das von Google entwickelte Tool „Puppeteer“, mit welchem sich das automatisierte Auslesen von Daten ohne Programmierkenntnisse intuitiv umsetzen lässt.

Quelle: <https://pptr.dev>

finanzierten und genehmigten Technologie-Hubs organisiert und arbeiten oft gemeinsam an öffentlichen Prestigeprojekten, auch auf Ebene der europäischen Länder. So haben Deutschland, Frankreich und die BeNeLux-Staaten eine Task-Force zur Optimierung der Lebensmittelversorgung mit „Präzisionslandwirtschaft“ gegründet. Diese ist als interdisziplinäre Forschung mit den Sektoren Gesundheit, Verteidigung und Versorgung angelegt und soll auch die Anwendungsmöglichkeiten von biotechnischen Innovationen ermitteln.



Biohybride Versorgungssicherheit

Von ähnlich hohem Stellenwert sind jene Maßnahmen, die den Ausfall weltweiter Lieferketten ausgleichen sollen. Rohstoffe wie Silizium oder Kupfer werden zwar weiterhin über einige wenige internationale Beschaffungsquellen bezogen, die einseitige Abhängigkeit ist jedoch ein zunehmendes Risiko. Fieberhaft widmen sich Forscherinnen und Forschern der Entwicklung neuer Materialien zur Kompensation dieser und anderer knapper Ressourcen. Dabei verschwimmen die Grenzen zwischen synthetischen und organischen Stoffen zunehmend: Mit biohybriden Materialien entstehen gänzlich neue Eigenschaften auf „analogen“ Trägern wie Kunststoffen. Diese verfügen dann über elektrische Leitfähigkeit oder eine komplexe Nanosensorik. Für die gesamte Volkswirtschaft weitaus bedeutsamer, aber

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Der Einsatz von Xenobots als Recycling-Helfer wird bereits heute getestet, z. B. beim Sammeln von Mikroplastik im Meer. Zukünftig könnten die Fähigkeiten von steuerbaren organischen Zellen erweitert werden, um sie für komplexere Aufgaben wie das Zersetzen von Verbundwerkstoffen oder anderen komplexen Materialien einzusetzen und somit die Ressourceneffizienz erheblich zu steigern.

Quelle: Yeung, J. (2020).

ebenfalls mit dem Ziel der Versorgungssicherheit hat sich, aufbauend auf dem dualen Abfallsystem, eine ausgeprägte Recyclingwirtschaft entwickelt. Leistungsfähige Robotik bewältigt selbst die Zerlegung komplexer Gegenstände und Geräte in ihre Grundbestandteile. Bei der Entwicklung neuer Produkte achten Herstellerunternehmen konsequent auf Wiederverwendbarkeit. Vor allem Verbundstoffe stellen aber weiterhin eine Herausforderung dar. Als vielversprechend gelten erste Anwendungen mit biohybriden Robotern, welche ursprünglich für

die Beseitigung von Meeresplastik entwickelt wurden. Allerdings entbrennt um den Einsatz dieser programmierbaren biologischen Zellen ein intensiver gesellschaftlicher Konflikt. Industrienähe Befürworterinnen und Befürworter betonen die Unausweichlichkeit der Technologie für die zukünftige nationale und europäische ökonomische Leistungsfähigkeit. Auf der anderen Seite argumentieren weitgehend von der Öffentlichkeit unterstützte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, dass sie die Risiken möglicher Mutationen oder externer Eingriffe als nicht kontrollierbar einschätzen.



Wertschöpfung durch Automatisierung und Stimulation

Auch für die übrige deutsche Industrie besteht enormer Druck, die Produktivität durch Automatisierung zu steigern. Ähnlich wie im militärischen Bereich ist der Fachkräftemangel die zentrale Herausforderung: Durch die stark gealterte Bevölkerung in Kombination mit der ausbleibenden Zuwanderung gibt es neben generellen Engpässen bei der Personalbeschaffung wenig ausgebildete Facharbeiterinnen und Facharbeiter. Zudem basieren Produktion und Logistik vermehrt auf autonomer, algorithmischer Steuerung in dezentral abgeriegelten Edge-Systemen. Viele wichtige Bauteile können mittlerweile in voll automatisierten Maschinenparks mit universellen 3-D-Druck-Verfahren gefertigt werden. Die Produktentwicklung erfolgt anhand rein digitaler Modelle. Die hierzu nötigen spezialisierten Entwicklerinnen und Entwickler sind rar, das Bedürfnis nach einer schnellen und einfachen Vermittlung von komplexem Wissen ist groß. Um mehr Menschen zur Arbeit in der automatisierten Fertigung zu befähigen, werden Smart Glasses für die Anweisungen zur Steuerung von Produktionsrobotik eingesetzt. Einige Unternehmen testen auch nicht invasive Brain-Computer-Interfaces, um die Erstellung von 3-D-Modellen durch reine Vorstellungskraft zu ermöglichen.

Noch vor einigen Jahren wäre die konkrete Umsetzung solcher Technologien völlig undenkbar gewesen. Da sich viele Menschen in einer immer schwierigeren Lebenssituation befinden, trennen sie inzwischen pragmatisch zwischen dem Einsatz von entgrenzter Technologie im Job und im Privatleben. Soziale Beziehungen sind dadurch zunehmend von einer Rückbesinnung auf persönliche und lokale Kontakte geprägt.



Exemplarische Kernanwendungsfelder der Entgrenzung



Familie, Freunde und Gesellschaft

Ein Großteil der Gesellschaft vermeidet virtuelle Kommunikationsmittel im familiären und freundschaftlichen Umfeld und sieht diesen Verzicht als Vertrauensbeweis. Die Rückbesinnung auf menschliche Nähe und die Wertschätzung echter sozialer Beziehungen mit nahestehenden Personen bekommt einen neuen Stellenwert. Dies ergibt sich einerseits aus der hohen sicherheitspolitischen Unsicherheit und der Skepsis vor technischen Lösungen an sich. Andererseits ist dies schlicht eine Konsequenz aus der eingeschränkten räumlichen und finanziellen Mobilität. Außerhalb der stärker technologisierten, aber als relativ sicher wahrgenommenen beruflichen Umgebung wird der Einsatz von Technologien häufig mit einem Kontrollverlust gleichgesetzt. Dies gilt insbesondere für jene, welche als stark entgrenzt wahrgenommen werden.

Nur eine kleine Elite kennt wenig Berührungsängste mit der Verschmelzung von Technologie und Biologie. Sie sieht Entgrenzung als Ausdruck eines Lebensstils und als exklusive Teilnahme an einer disruptiven Avantgarde. Diese Menschen nutzen beispielsweise digitale Androiden zur virtuellen Kommunikation oder zum Gaming, lassen sich aber auch Biosensoren implantieren, um ihre vitalen Funktionen dauerhaft überwachen zu können. Dieses lockere Verhältnis zur Technologie entsteht neben der vorausgesetzten ökonomischen Unabhängigkeit vor allem durch den Zugang zu stark abgesicherten, digitalen Netzen und durch ein hohes Bedürfnis nach Abgrenzung gegenüber der Masse.



Militär

Im Kontext einer von digitalen Verteidigungsmaßnahmen und Geopolitik dominierten Umgebung erhält das Militär deutlichen Zuspruch – politisch, wirtschaftlich und gesellschaftlich. Die Bundeswehr als Arbeitgeberin wird zum neuen Hotspot für technologieaffine Bürgerinnen und Bürger, aufstrebende Akademikerinnen und Akademiker und eine stetig wachsende Zahl an Menschen mit einem Bedürfnis nach sozioökonomischer Sicherheit. Analog zur supranationalen Förderung von Prestigeprojekten in Technologie-Hubs entstehen auch gemeinsame Verteidigungspools mit europäischen Partnerinnen und Partnern für finanzielle und personelle Ressourcen, die sich einem weit gefächerten Spektrum an Innovationen widmen. Neben der Arbeit an immer leistungsfähigerer KI und der dafür benötigten Super-Computer werden in den geförderten Forschungszentren auch künstliche Organe und synthetische Zellen zur Heilung bzw. für die Leistungsoptimierung von (digitalen) Soldatinnen und Soldaten getestet.



Gesundheit

Wie auf dem Arbeitsmarkt macht sich auch bei der Gesundheitsversorgung die unzureichende Vorbereitung auf eine alternde Bevölkerung deutlich bemerkbar. Während viele Menschen zusätzlichen Tätigkeiten nachgehen, um ihre Familie zu versorgen, sind sie häufig auch für die Pflege der Alten zuständig. Zwar findet autonome Robotik in diesem Zusammenhang noch keinen Einzug in die Haushalte, allerdings haben sich Exoskelette weitgehend etabliert. Gleichzeitig entwickelt sich Einsamkeit zur neuen Volkskrankheit. Der Staat versucht dem mit der Förderung von sozialen Einrichtungen, aber auch von sogenannten soften Robotern, die auf spezifische emotionale Bedürfnisse eingehen können, entgegenzuwirken.

Smart Glasses helfen Medizinerinnen und Medizinern bei der Krankheitsdiagnose; Biosensoren und intelligente Medikamente werden zumindest temporär und mit Zustimmung der Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern eingesetzt. Auch existiert eine Formel für künstliches Blut. Eine massentaugliche Umsetzung ist jedoch noch weit entfernt, und viele Menschen lehnen solche Eingriffe ab. Man vertraut weiterhin auf traditionelle, groß angelegte Blutspendeaktionen.

Das alltägliche Sammeln von Fitness- und Gesundheitsdaten ist eine Seltenheit. Viele Arbeitgeberinnen und Arbeitgeber verbieten das Tragen von Wearables wie smarten Armbändern im Job – es wird aber auch von den wenigsten ernsthaft in Erwägung gezogen. Dies ist das Ergebnis mehrerer schwerwiegender Datenlecks Mitte der 2020er-Jahre. Einzig einige Gruppen, die aufgrund ihrer gesellschaftlichen Stellung offen für technische Innovationen sind, haben den Transhumanismus für sich entdeckt. Sie stellen sich bereitwillig als Testobjekte für künstliche Organe oder sensorische Neuroprothesen zur Verfügung.

3.3.4 Anwendungsszenario 4: Tempounterschiede

i Szenariorahmen



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

© BMBF2020.

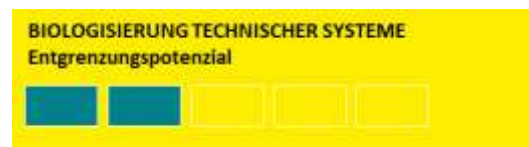
Deutschland ist in den 2030er-Jahren geprägt von Ungleichheiten. So sind einige Unternehmen in den Metropolregionen hochinnovativ und im globalen Wettbewerb gut aufgestellt. Die ländlichen Gegenden verlieren jedoch durch fehlende Infrastruktur und Investitionen an Wettbewerbsfähigkeit. Strukturschwächen verfestigen sich, die Kluft zwischen Stadt und Land wird größer. Dafür ist auch die zunehmende Automatisierung verantwortlich. Steigende Arbeitslosenzahlen sorgen für einen andauernden Krisenbewältigungsmechanismus der Bevölkerung. Lediglich die neue obere Mittelschicht profitiert vom Produktivitätszuwachs, der durch automatisierte Arbeitsabläufe erreicht wird. Gleichzeitig spaltet sich die europäische Meinung bei zentralen Themen wie Migration, Klimaschutz und Außenpolitik. Es gibt jedoch auch positive Aspekte der zunehmenden Technologisierung, die die Menschen mehr und mehr als entlastend wahrnehmen. Technik wird immer häufiger auch in den Alltag integriert, z. B. durch digitale Assistentinnen und Assistenten.

Was aus den Tempounterschieden folgt, ist eine starke Ausdifferenzierung der Wertelandschaften. Die gesamtgesellschaftliche Perspektive verliert an Bedeutung, dafür werden kleinere Gemeinschaften immer wichtiger und die Abgrenzung zu anderen Kleingruppen markanter. Auch beim Thema Umweltschutz setzen sich gemischte Haltungen durch. Während dieser einerseits als wichtig angesehen wird, sind andererseits Flugreisen für die persönliche und berufliche Weiterentwicklung das Mittel der Wahl. Diese Einstellung spiegelt sich auch in den leistungsbezogenen Werten wider. Materieller Wohlstand wird nur noch vererbt und kann nicht selbst erarbeitet werden. Immaterielle Werte gewinnen dadurch im Vergleich zu materiellen wieder an Bedeutung, da hier die wahrgenommene Leistung eher aus eigener Kraft erfolgt.



VERWENDETE BIODIGITALE TECHNOLOGIEN

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



VERWENDETE BIODIGITALE TECHNOLOGIEN

- Digitale Androiden
- Biohybride Roboter
- Biohybride Materialien
- Androiden mit Allround-Funktionalität



Disparitäten in der Entgrenzung

Zukunftssignal aus der Gegenwart

In einigen Regionen in Deutschland wurde der „Telenotarzt“ bereits erfolgreich getestet – Sanitärerinnen und Sanitäter erhalten virtuelle Unterstützung durch eine Notärztin oder einen Notarzt in der Leitzentrale. Was eigentlich die ungleiche Versorgung von Stadt- und Landbevölkerung beheben soll, wird durch den mangelnden Ausbau der Netzinfrastukturauf dem Land gefährdet.

Quelle: Tagesschau (2019).

„Zeig mir deine Entgrenzungstechnologien, und ich sag dir, wer du bist.“ Die soziale Polarisierung in Deutschland in den 2030er-Jahren spiegelt sich auch in der Nutzung und Verbreitung von Entgrenzungstechnologien wider. Auf der einen Seite des „Technologiegrabens“ steht die urbane Wissenselite, die fortschrittliche Entgrenzungstechnologien in allen Lebenslagen progressiv einsetzt. Für sie ist der Besitz der neuesten Technologien nicht nur Ausdruck von sozialem Status und Distinktion, sondern auch ökonomische Notwendigkeit im harten Wettbewerb um die begehrten, gut bezahlten Arbeitsplätze bei den boomenden Unternehmen in den Städten.

Auf der anderen Seite finden sich die strukturell abgehängten Bevölkerungsteile, insbesondere in den ländlichen Regionen. Viele Entgrenzungstechnologien kennen die Menschen auf dem Land nur aus dem Internet. Ihnen mangelt es nicht nur an der finanziellen Kaufkraft. Auch die fehlende Technologiekompetenz wiegt schwer, ganz zu schweigen von der schlecht ausgebauten technologischen Infrastruktur. 5G ist für viele Menschen auf dem Land noch immer ein Fremdwort – die Karte des 5G-Monitoring der Bundesnetzagentur weist für viele ländliche Regionen klaffende Lücken auf. Selbst Basisfunktionen wie die mobile Bereitstellung von Informationen in Echtzeit durch digitale Androiden oder virtuelle Assistentinnen und Assistenten scheitern häufig an der mangelnden Bandbreite. Der Erwerb von smarten Wearables wie Smart Glasses oder smarten Kontaktlinsen lohnt sich auf dem Land zu meist nicht. Die hochauflösenden Kamera-Live-Feeds erfordern Datenübertragungsraten von mehr als einem Gigabit. Dieses Geld investiert die ländliche Bevölkerung lieber in andere Dinge.

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Technologie eröffnet neue Möglichkeiten, fördert aber auch Ungleichheit. Entscheidend ist der Zugang zu Technologien und deren Einsatzmöglichkeiten. Verschiedene Studien, u. a. durch die University of California und das MIT in Boston, legen offen, dass die Möglichkeiten von Technologie insbesondere jenen zugutekommen, die ohnehin bereits über einen hohen Bildungsgrad und hohe Produktivität verfügen. Da sich sowohl Technologie als auch Produktivität in den Städten konzentrieren, wird dadurch auch die Ungleichheit zwischen Stadt und Land gefördert. Hinzu kommt die Herausforderung eines flächendeckenden Infrastrukturausbaus. In den USA liegt der Anteil der Landbevölkerung mit einem Smartphone zwölf Prozent niedriger als bei den Menschen in der Stadt.

Quellen: Gaskell, A. (2019) und Perrin, A. (2019).



Entgrenzung der Wertschöpfungskette

Solche Sorgen sind den meisten Menschen in den Städten fremd, gerade den hoch qualifizierten Wissensarbeiterinnen und Wissensarbeitern, die sich glücklich schätzen, einen der begehrten Jobs bei den gut aufgestellten Unternehmen in den prosperierenden Innovationsclustern zu haben. Ein Leben ohne Entgrenzungstechnologien ist für sie nicht mehr vorstellbar. In vielen Unternehmen sind diese zu einem unverzichtbaren Teil der Unternehmenskultur geworden. Ganze Wertschöpfungsprozesse würden mittlerweile in sich zusammenbrechen, wenn einzelne Technologien von heute auf morgen nicht mehr verfügbar wären.

Dies fängt bei Technologien an, die bereits Anfang der 2020er-Jahre zum Standardrepertoire von Unternehmen mutierten. In Vertrieb und Marketing übernehmen vermehrt menschenähnliche digitale Androiden ganz selbstverständlich elementare Aufgaben: Oft sind hier schon gar keine Menschen mehr in Aushandlungsprozesse involviert. Digitale Androiden haben Prokuristenstatus erworben – und handeln eigenständig Verträge mit digitalen Androiden anderer Unternehmen aus. Gleiches gilt für den Bereich Public Relations, den digitale Androiden fast ausnahmslos in Eigenregie führen. Im Bereich des Mind-Uploadings experimentieren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler damit, die kreativ-kognitiven Fähigkeiten von hochbegabten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern durch virtuelle Neuronen und Synapsen auf KI-basierte Softwaremodelle zu übertragen. Geplant ist deren Einsatz etwa in der Erforschung neuer Arzneimittel, innovativer Materialien oder revolutionärer Designprinzipien.



Roboter prägen den Arbeitsalltag

In den weiten Gängen der Firmensitze international führender Unternehmen in den Städten hört man Ende der 2030er-Jahre ein beständiges Surren. Allround-Androiden sind zu vollwertigen Mitarbeitenden geworden. Eine Unterscheidung zwischen menschlicher Arbeitskraft und der von Robotern ist kaum noch möglich. Regelmäßig kommt es in den Gängen zu Verwechslungen – vom Menschen ausgehend, wohlgemerkt. Es ist normal, dass anstelle des menschlichen Mitarbeitenden auch gelegentlich ein Roboterklon bei der Arbeit erscheint, z. B. im Rahmen von Informationsveranstaltungen. Währenddessen widmen sich die Menschen, zu Hause oder im Café, anderen Dingen – etwa Weiterbildungsmaßnahmen im Bereich Coding oder zu Kreativitätstechniken, die viele Unternehmen verpflichtend eingeführt haben.

In vielen Unternehmen, vor allem in den deutschen Niederlassungen der großen Tech-Konzerne aus den USA und China, sind Brain-Computer-Interfaces zu unverzichtbaren Arbeitsmitteln geworden. Diese wurden in den schillernden Forschungslabs und auf den Campus in Übersee entwickelt und erprobt. Das Gleiche gilt für Roboterklone, die jeder Mitarbeitende hat und in die er sich über Brain-Computer-Interfaces einklinken kann. Dadurch können Roboterklone durch ihr synthetisches Ich Präsenztermine aus der Entfernung wahrnehmen. Hierfür besteht in vielen Fällen jedoch keine Notwendigkeit mehr. Die Roboterklone handeln und denken wie ihr menschliches Pendant. Selbst soziale Kompetenzen und Empathiefähigkeit unterscheiden sich nicht voneinander. Jeden Abend findet zudem eine Datensynchronisation des am Tag Erlebten statt. Mensch und Roboterklon befinden sich immer auf dem gleichen Wissensstand. Und ist einmal doch reale Präsenz notwendig, so streift sich das menschliche Ich vor dem Verlassen des Hauses den soften Exosuit über. Es schaltet die smarte Kontaktlinse für die schnellste Routenfindung ein und aktiviert über den implantierten Med-Chip im Unterarm die präzise dosierte Versorgung des Körpers mit den notwendigen Spurenelementen und Leistungsboostern für den Tag.



Gefangen in der Optimierungsspirale

Solche Formen dualer Lebensführung, in der immer mehr Tätigkeiten parallel auf verschiedene Technologien ausgelagert werden, suggerieren nur auf den ersten Blick Entlastung. Doch das Gegenteil ist der Fall. Die Zeit verdichtet sich und die Ansprüche von Unternehmen an die Geschwindigkeit und Qualität der individuellen Leistungserbringung wachsen rapide. Die zunehmende Entgrenzung schafft bisher nie da gewesene Zwänge, sich permanent zu optimieren. Bei vielen Menschen kommt es zu stressbedingten Reaktionen des Körpers. Der zunehmende Zeit- und Leistungsdruck zwingt sie, noch mehr Technologien zu nutzen, um den wachsenden Anforderungen gerecht zu werden. Mentaler Stress ist ein ständiger Begleiter. Der Anteil der Menschen mit Burnout-Symptomen und Depressionen an der Bevölkerung hat signifikant zugenommen. Der Markt für intelligente Medikamente verzeichnet ein hohes Umsatzwachstum. Diese erkennen Stresssymptome frühzei-

tig und setzen automatisch gezielt Wirkstoffe frei, um das Stresslevel wieder zu senken. Andere wiederum fliehen in virtuelle 3-D-Welten und nehmen mit ihrem virtuellen Avatar an den mittlerweile fest etablierten MPWE – Massive-Participant-Wellness-Events – teil. Hier erfahren sie gemeinsam mit anderen Menschen innere Ruhe und spirituellen Ausgleich vom harten Arbeitsalltag.



Im Sinne der Wirtschaft

Die Politik schaut diesen Entwicklungen in der Regel nur machtlos zu. Zu spät wurde auf EU-Ebene die Notwendigkeit erkannt, sich den neuen technologischen Realitäten und ihren Implikationen für Alltag und Arbeit zu stellen. Wichtige Reformvorhaben wurden allerdings auch bewusst von einzelnen Mitgliedstaaten blockiert, so etwa mit Blick auf Brain-Computer-Interfaces. Sie beugten sich dem Druck der internationalen Unternehmen, diese nicht als „Unethical Technology“ zu klassifizieren und ihrem Einsatz in den Unternehmen durch kaum überwindbare Regulationshürden einen Riegel vorzuschieben. Viele Unternehmen drohten mit einer Verlagerung ihrer Standorte in andere Länder, was der ohnehin schon schwierigen wirtschaftlichen Gesamtlage in vielen europäischen Ländern einen vernichtenden Schlag verpasst hätte.

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Mit Exosuits werden einfache körperliche Tätigkeiten wie Gehen oder Treppensteigen erleichtert. Daran forscht z. B. das Wyss Institute an der Harvard University. Solche Anwendungen könnten schon bald größeren Bevölkerungsgruppen zugänglich gemacht werden, beispielsweise für Liefertätigkeiten in Großstädten, die vor allem als Niedriglohnarbeit durch ungelernte Angestellte ausgeführt werden.

Quelle: Wyss Institute (o. D.).

Der Wettbewerb innerhalb der Gig-Economy hat sich noch einmal weiter verschärft – der Service-Niedriglohnsektor ist massiv gewachsen. Viele Menschen haben ihren Job an Roboter und digitale Assistentinnen bzw. Assistenten verloren. Menschen, die ehemals der Mittelklasse angehörten, sind nun als unabhängige Solo-Selbstständige aktiv. Sie buhlen darum, Kurzzeitleistungen zu erbringen – meist im Auftrag der Unternehmen der

Innovationscluster oder für deren Beschäftigte. Wer es sich leisten kann, setzt hierbei auf Technologie. In den Metropolregionen prägen Gig-Worker mit einfachen Formen modularer Low-Budget-Exoskelette das Straßenbild, um anstrengende Transporttätigkeiten schneller zu erledigen. In den virtuellen Marktplätzen der Gig-Economy tummeln sich die optimierten digitalen Avatare der Gig-Worker, um passende Aufträge an Land zu ziehen. Schwarzmärkte im Darknet bieten zu relativ günstigen Preisen die Programmierung der Avatare an. Andere wiederum besorgen sich auf dem Schwarzmarkt aus dem nicht europäischen Ausland Nanobot-Plagiate. Diese sollen, durch die Blutbahn zirkulierend, Ermüdungserscheinungen unterdrücken. Doch oft ist deren Biokompatibilität fragwürdig. Die Krankenhäuser verzeichnen einen Anstieg der Einlieferungen von Menschen mit inneren Verletzungen.



Exemplarische Kernanwendungsfelder der Entgrenzung



Sicherheit

Die Kluft zwischen Arm und Reich wird größer. Dies birgt erhebliches Konfliktpotenzial. Die Kriminalitätsraten steigen rapide an, insbesondere die Zahl der Einbruchsdelikte hat ein Rekordniveau erreicht. Die wohlhabenderen Bevölkerungsgruppen rüsten für ihre Sicherheit mit Entgrenzungstechnologien auf. Auf der jährlichen Messe „Next Security“ nehmen Stände mit biohybriden Sicherheitsrobotern den Großteil der Ausstellfläche ein – dicht gefolgt von intelligenten, biohybriden Materialien. Je nach Version lösen diese autonom Alarm aus, wenn sich Umgebungsparameter ändern, die auf kriminelle Aktivitäten hinweisen (ultraleidende Materialien). Andere biohybride Materialien können schlagartig ihre Struktur ändern, um potenzielle Eindringlinge an Ort und Stelle „einzufrieren“ oder „festzukleben“ (Formveränderungsmaterialien).



Umwelt

Die Frequenz und Intensität von Extremwetterereignissen haben über die vergangenen Jahre hinweg drastisch zugenommen. Unternehmen und Privatpersonen – zumindest jene, die zu den Gewinnerinnen bzw. Gewinnern gehören und es sich leisten können – nehmen viel Geld in die Hand und investieren in Technologien, um sich an die Folgen des Klimawandels anzupassen. Die Extremhitze in den Städten hat weiter zugenommen. Die Sterberaten infolge von Hitzschlägen steigen. Viele Angehörige der urbanen Wissenselite lassen daher Veränderungen im Rahmen eines nicht therapeutischen Enhancement an ihren Körpern vornehmen, um gegen die Hitze besser gewappnet zu sein. Unternehmen subventionieren etwa die Einnahme intelligenter Medikamente oder Therapien mit künstlichem Blut, die den Wärmehaushalt des Körpers optimieren.

Einige besonders progressive Anwenderinnen und Anwender fliegen extra ins Ausland und lassen sich dort prophylaktisch hitzeresistente künstliche Organe einpflanzen. Aber auch biohybride Exosuits mit aktiver Klimaregulation sind zum Verkaufsschlager geworden. Unternehmen implementieren sogenannte KAGH – also klimaadaptive Gebäudehüllen – in ihren Standorten und Infrastrukturen. Als Grundlage dafür dienen Materialien, welche Funktionsprinzipien aus der Natur imitieren (Stichwort „Biomimicry“) oder solche, die lebende Materialien integrieren. Dadurch können sie in symbiotischer Wechselwirkung mit der Umwelt etwa ihre Temperaturdurchlässigkeit, Oberflächenstruktur oder Farbe ändern.



Alltag und Freizeit

Neben der weiter oben skizzierten Anwendung in Arbeit und Forschung nehmen Entgrenzungstechnologien einen elementaren Stellenwert im Leben der Menschen ein – einige wenige sogar für ärmere Einkommens-

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Die US-Firma Neon entwickelt digitale Avatare, die als virtuelle Flughafenassistentinnen und -assistenten, Yogalehrerinnen und -lehrer oder als Moderatorinnen und Moderatoren des Wetterberichts auftreten können. Passend dazu entstehen immer mehr Modestudios für virtuelle Kleidung, wie beispielsweise bei The Fabricant in Amsterdam.

Quelle: Kuhlmann, U. (2020).

schichten in den ländlichen Regionen. Um aus ihrem tristen Alltag zu entfliehen, kreieren sie sich u. a. mithilfe digitaler Avatare neue Rückzugsräume in virtuellen Spielwelten. Hier können sie Status und Ruhm erlangen, der ihnen in der realen Welt verwehrt bleibt, etwa indem sie extrem seltene virtuelle Gegenstände sammeln oder infolge ihrer Gaming-Erfolge Stars der Szene werden. Auch die Wissenselite in den Städten nutzt solche digitalen Rückzugsräume für den Ausgleich vom anstrengenden Arbeitsalltag. Digitale Avatare übernehmen in ihrem Alltag jedoch noch weitere Aufgaben. Eingebettet in smarten Kontaktlin-

sen und Brain-Computer-Interfaces fungieren sie z. B. als soziale Firewall oder „bester Freund“ oder „beste Freundin“. Sie stehen in allen Lebenslagen beratend zur Seite. Je nach Kontext und Stimmung werden auch Umfeldinformationen, die als störend empfunden werden oder ablenken können, bewusst aus der Wahrnehmung herausgefiltert.

3.3.5 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. durch den ständigen Wettbewerb in sozialen Netzwerken.

© BMBF2020.

Zu Beginn noch hoch umstritten, stößt das Bonuspunktesystem in den 2030er-Jahren größtenteils auf Zustimmung. Es verankert neue Normen im Alltag, die vorher so nicht möglich waren. Auch die partizipative Erarbeitung der Spielregeln sorgt für eine größere Akzeptanz in der Bevölkerung. Die Zustimmung zum Bonus-System wächst besonders im Hinblick auf die steigende Dynamik des Klimawandels: Eine Punktebewertung – z. B. des ökologischen Fußabdrucks – hilft dabei, das Verursacherprinzip transparent zu machen. Auch für den Arbeitsmarkt, der anhaltend unter dem Fachkräftemangel leidet, ist das Bonus-System hilfreich. So werden Qualifizierungspotenziale erfasst und die räumliche Mobilität der Arbeitskräfte effizient organisiert. Die Schattenseiten: Niedrige Punktestände aufzuholen ist schwierig. Das Punktesystem wird dennoch nur von wenigen infrage gestellt, die sich in ihrer Position nicht repräsentiert sehen. Aus diesem Grund entbrennen immer wieder hitzige Debatten über die konkrete Ausgestaltung und Anpassung des Systems, über die direkt abgestimmt werden kann – und die zugleich auch vor den Gerichten ausgefochten werden.

Obwohl das Prinzip der Freiwilligkeit vor der Einführung des Punktesystems zentrales Diskussionsthema war, betonen Kritikerinnen und Kritiker auch nach dessen Einführung immer wieder, eine freiwillige Teilnahme sei nur „Augenwischerei“. Denn: Jene Bürgerinnen und Bürger, die freiwillig auf ihr Wahlrecht verzichten, müssen trotzdem mit den Mehrheitsentscheidungen leben. Die Kluft zwischen Befürwortenden des Punktesystems auf der einen sowie dessen Gegnerinnen und Gegnern auf der anderen Seite wird größer. Gleichzeitig gleichen sich die Wertesets der aktiv am System Teilnehmenden immer mehr an. Dadurch findet das Punktesystem in den 2030er-Jahren bei der großen Mehrheit Zustimmung: Nach dem Empfinden vieler nimmt es in einer komplexeren und ausdifferenzierteren Gesellschaft eine verbindende Orientierungsfunktion für verschiedene gesellschaftliche Gruppen ein. Durch die Anreize gewinnen leistungsbezogene Werte an Relevanz, und auch soziale Tätigkeiten werden aufgewertet, indem sie langfristig zu Boni führen. Der eigene Punktestand wird damit zum Ausdruck der eigenen Leistung, des Erfolgs und des Lebensstandards. Für viele wird er auch Ausdruck persönlicher Sicherheit – und steht damit im Kontrast zur Ansicht der Individuen, die nicht am Punktesystem teilnehmen: Sie betonen als Gegenposition die Selbstbestimmung jenseits der Abhängigkeiten eines Bonus-Systems.



➤ Übergeordnete politische Ziele

In diesem Bonus-System dienen Entgrenzungstechnologien als ermöglichende oder unterstützende Elemente der Verhaltens- und Datenerfassung. Trotzdem kann nicht von einer starken Entgrenzung die Rede sein. Die Etablierung eines datengestützten Bonus-Systems hat zu einem selbstverständlichen Umgang mit Technologie im Alltag geführt. Technologie und Datenerfassung sind allgegenwärtig – und werden von der Mehrheit der Menschen auch nicht als störend empfunden. Die Anwendung von Technologien orientiert sich pragmatisch an den übergeordneten politischen Zielen eines effizienten Klima- und Umweltschutzes, der proaktiven Gesunderhaltung der Bevölkerung sowie der Wettbewerbsfähigkeit der eigenen Volkswirtschaft.

Die Steuerungsfunktion des Bonus-Systems setzt dabei gezielte Anreize für bestimmte Verhaltensweisen mit einem gesellschaftlichen Mehrwert, die entsprechend mit einer Punktevergabe belohnt werden. Die Zivilgesellschaft nimmt eine entscheidende Rolle bei der Aushandlung der wünschenswerten Normen ein und drängt immer wieder auf den Minderheitenschutz, wenn Menschen bewusst nicht an dem Punktesystem teilnehmen wollen.

➤ Punkteoptimierende Assistenzsysteme

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Im Hinblick auf den Einsatz von künstlicher Intelligenz für staatliche soziale Punktesysteme äußert der EU-Kommissionsausschuss einen klaren Standpunkt: „Regierungen sollten sich verpflichten, sich nicht an der Massenüberwachung von Einzelpersonen zu beteiligen und nur vertrauenswürdige KI-Systeme einzusetzen.“ Dies gilt insbesondere in Bezug auf die Nutzung von kontinuierlich erhobenen Gesundheitsdaten, beispielsweise durch Biosensoren.

Quelle: Lomas, N. (2019).

Ein Leben ohne digitale Assistenzsysteme, personalisierte Avatare oder digitale Androiden ist für die allermeisten Menschen kaum noch vorstellbar. Zu den morgendlichen Ritualen vieler Menschen gehört es, sich noch vor dem Frühstück vom Assistenzsystem Vorschläge machen zu lassen, wie über den Tag hinweg die optimale Punktzahl erreicht werden kann. Weicht der Mensch vom vorgeschlagenen Weg ab, errechnen Algorithmen den ganzen Tag über neue Vorschläge zur Punkteoptimierung.

Nicht alle Bürgerinnen und Bürger sind bereit, sich dergestalt maschinell anleiten zu lassen. Doch auch unter der Minderheit der Gegnerinnen und Gegner des Bonus-Systems gibt es Potenziale zur Entgrenzung. So

wird in Foren der Gegnerinnen und Gegner offen darüber diskutiert, wie Technologie dazu genutzt werden kann, die Technologie hinter dem Bonus-System zu täuschen. In diesem Kontext immer wieder diskutiert werden die im Jahr 2030 noch nicht zur Marktreife gelangten humanoiden Androiden mit Allround-Fähigkeiten, die auf den ersten Blick nicht mehr klar vom Menschen unterscheidbar sind, und Technologien zur Verschleierung von Tätigkeiten, die vom Punktesystem nicht positiv honoriert werden. Während die Android-Ebenbilder fleißig Punkte sammeln, so der Plan der Gegnerinnen und Gegner des Bonus-Systems, soll der echte Mensch frei von Datenerfassung tun und lassen, was er möchte.



Gesundhaltung als Gesellschaftsmaxime

Insbesondere im Gesundheitswesen hat sich der Gedanke der Punkteoptimierung durchgesetzt, ein Paradigmenwechsel vom behandelnden zum präventiven Gesundheitssystem hat sich vollzogen, der sich bereits in den vergangenen Jahren angedeutet hatte. Dies bringt erhebliches Entgrenzungspotenzial mit sich. Fitness und ein guter Gesundheitszustand, der sich auch entsprechend auf dem persönlichen Punktekonto abbildet, sind zu Statussymbolen geworden. In der Folge sind auch viele Menschen bereit, ihre Gesundheitsdaten beinahe rund um die Uhr erfassen zu lassen – und auch präventive Gesundheitsmaßnahmen wie Sport, Ernährung oder Wellness für Körper und Geist zu dokumentieren. Dabei gibt es zwei Lager von Gesundheitsdatensammelnden: einerseits diejenigen, die ihre grundlegenden Vitalparameter über Basisequipment wie smarte Wearables erfassen und teilen, und andererseits diejenigen, die sich selbst als Avantgarde sehen und denen eine solche Basiserfassung nicht umfassend genug ist. Diese avantgardistische Minderheit setzt freiwillig auf von den Gesundheitsämtern zugelassene invasive Technologien wie Nanobots, die eine präzisere Datenerfassung erlauben und damit auch mehr Bonuspunkte ermöglichen, z. B. indem sie auch die Konzentration von Spurenelementen im Körper erfassen. Zusätzlich setzen viele auf die Dokumentation ihres gesunden Lebensstils durch smarte Kontaktlinsen oder Smart Glasses. Die Versicherungen belohnen eine derart weitreichende Datenerfassung durch günstigere Tarife. Nicht nur bei der Arbeit, sondern auch in der Freizeit wird die Nutzung von Exoskeletten zur Entlastung bei schweren körperlichen Tätigkeiten honoriert. Die Volksgesundheit entwickelt sich zu einem hohen Gut.



Zielorientierte Ethik

Künstliches Blut und künstliche Organe haben dagegen keinen flächendeckenden Eingang in die deutsche Medizin der 2030er-Jahre gefunden. Dies hat auch damit zu tun, dass die Spendenbereitschaft für Blut und Knochenmark extrem hoch ist, da sie mit Punkteanreizen verknüpft ist. Gleiches gilt für die proaktive Bereitschaft zu Organspenden, sodass eine große Mehrheit der Bevölkerung als Spenderin oder Spender eingetragen ist.

Hier zeigt sich, dass Justiz und Politik überall dort, wo die Zielerreichung hin zu einer nachhaltigen, gesunden und wettbewerbsfähigen Gesellschaft nicht gefährdet ist, ethische Grenzen entlang von neuen Technologien zu ziehen oder zu definieren bereit ist. So hat das Bundesverfassungsgericht die Nutzung von Daten aus Gehirnschnittstellen jeglicher Art strikt untersagt, auch eine Klage der Europäischen Transhumanistischen Partei (ETP) vor dem EuGH blieb erfolglos. Dabei wurde in den Urteilsbegründungen klar, dass für die juristische Grenzziehung die Eingriffstiefe, sprich die direkte „Körpersnähe“ ein zentrales Entgrenzungskriterium darstellt. Da der Mensch im Bonus-System eigenverantwortlich handeln soll, soll eine Entgrenzung mittels Technologien, welche den Menschen nicht mehr autonom agieren ließen, verhindert werden.

In der Politik dagegen gibt es immer auch noch eine Abwägung von Vor- und Nachteilen bei Technologiebewertungen hinsichtlich der Wettbewerbsfähigkeit. Vorausgesetzt, eine Technologie wird in anderen Teilen der

Welt bereits erfolgreich angewendet und stellt darüber hinaus ein kalkulierbares Risiko dar, werden für diese Forschungsanreize gesetzt. Dies ist etwa bei den Diskussionen um DNA-basierte Datenspeicherung oder sensorische Neuroprothesen im medizinischen Anwendungskontext der Fall, bei denen die Abwägungen mehr Vorteile ergeben haben. Sensorische Neuroprothesen stellen z. B. verloren gegangene Sinneswahrnehmungen wieder her, was Politikerinnen und Politiker sowie Medizinerinnen und Mediziner höher gewichten als potenzielle Nebenwirkungen, etwa wenn der Körper ein Implantat infolge mangelnder, individueller Biokompatibilität abstößt.

Wissenschaft und Forschung folgen also diesen Leitlinien in weiten Teilen, da die Forschungsförderung an das Punktesystem gekoppelt ist. Dies führt zu sich selbst verstärkenden Feedbackschleifen: Wer an Technologien forscht, deren Nutzung mit Punktevergaben belohnt wird, da sie nach Ansicht der Politik einen gesellschaftlichen Mehrwert stiften, erhält ebenfalls Punkte.



Erfasste Emissionen und „Greenfluencing“

Da der sich intensivierende Klimawandel der maßgebliche Faktor war, der ein punktebasiertes Anreizsystem in Deutschland überhaupt erst ermöglichte, ist hier die Datenerfassung weit vorangeschritten. Der großflächige Einsatz von Biosensoren führt zu einer weitläufigen Erfassung von Emissionen und Materialströmen, etwa über getaggte Mülltonnen, im Haushalt oder im Abwasser. Die Wegwerfquoten – auch von Lebensmitteln – haben sich stark reduziert ebenso wie der Plastikverbrauch.

Zudem wird auch im Kontext des Umwelt- und Klimaschutzes die Nutzung von Technologien, die das individuelle Umweltverhalten dokumentieren und so die Berechnung des eigenen ökologischen Fußabdrucks ermöglichen, über Punkteanreize belohnt. So erhalten Bürgerinnen und Bürger, die über Smart Glasses oder smarte Kontaktlinsen freiwillig das eigene Konsum- und Wegwerfverhalten dokumentieren, Bonuspunkte. Soziale Medien sind der bevorzugte Ort des „Greenfluencing“; Umweltbloggerinnen und -blogger, aber auch digitale Avatar-Stars mit großer Reichweite haben häufig eine soziale Vorbildfunktion inne.



Exemplarische Kernanwendungsfelder der Entgrenzung



Freizeit und Konsum

Das Bonus-System ist durch die Tatsache, dass die Bürgerinnen und Bürger rund um die Uhr in allen möglichen Lebenslagen Punkte sammeln können, omnipräsent. Dies wirkt sich auch auf das Freizeit- und Konsumverhalten aus, wo Entgrenzungen zunehmend zu beobachten sind. Diese sind immer mit der Hoffnung verbunden, zusätzliche Punkte zu sammeln. Dabei werden Kaufentscheidungen und Freizeitplanungen vermehrt digitalen Assistenzsystemen übertragen, das Vertrauen in die Empfehlungen des Algorithmus ist hoch. Dies wirkt für viele Menschen komplexitätsreduzierend und wird als große Erleichterung im Alltag wahrgenommen. Zugleich bietet das Punktesystem Orientierung für „richtiges“ Handeln. Die freiwillige Erfassung von Kauf- und Freizeitverhalten wird etwa durch smarte Wearables wie Smart Glasses oder smarte Kontaktlinsen unterstützt. Das eigene Verhalten wird dabei zunehmend in

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Bereits 15,5 Millionen der rund 66,5 Millionen Internetnutzenden in Deutschland haben im 1. Quartal 2020 Smart Watches, Fitnessarmbänder und Co. genutzt. Laut Statistischem Bundesamt entspricht das etwa 23 Prozent der Internetnutzerinnen und -nutzer im 1. Quartal 2020.

Quelle: Statistisches Bundesamt (2020).

das Spatial Web, das gerade im Entstehen begriffen ist, eingebunden. Virtual- und Augmented-Reality-Anwendungen sind weit verbreitet. Das Spatial Web, so das Versprechen der Entwicklerinnen und Entwickler, soll es Nutzerinnen und Nutzern ermöglichen, sowohl einen Zwilling der physischen Realität in einem virtuellen Raum zu haben als auch die digitale Welt in eine reale zu bringen. KI, intelligente Sensoren und miteinander verbundene Netzwerke verbinden die physische und die Online-Welt.

Gesundheit und Ernährung

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Einige Krankenkassen belohnen heute schon einen besonders gesundheitsorientierten Lebensstil mit Bonuspunkten und besonderen Tarifen. Solche Wahltarife werden auch von Versicherungen für Autofahrende, die ihr Fahrverhalten freiwillig „tracken“ lassen, angeboten.

Quelle: AOK (o. D.).

Der Gesundheitssektor ist – wie die gesamte Gesellschaft – geprägt von der Maxime der präventiven Gesunderhaltung, die auch schwache Entgrenzungen befördert. Entsprechend wird ein Lebensstil, der dieser Gesunderhaltung dient, mit Punkten belohnt. So ist etwa bei schweren körperlichen Tätigkeiten die Nutzung von Exoskeletten mit Punkteanreizen versehen. Der allgemeine Nutzungsgrad von smarten Wearables, aber auch Smart Glasses oder smarten Kontaktlinsen zur Dokumentation der eigenen Gesundheitsdaten

ist sehr hoch. Zudem werden häufig auch die eigenen Ernährungsstile freiwillig dokumentiert. Hierdurch können Bürgerinnen und Bürger nicht nur Ernährungskompetenz zeigen, sondern auch Umweltbewusstsein. Die Verbreitung in sozialen Medien und den virtuellen Lebenswelten des Spatial Web dient dabei als starke Motivation, da in diesen Resonanzräumen Echtzeit-Feedback zu erwarten ist.

Digitale Assistenzsysteme unterbreiten zudem den Nutzerinnen und Nutzern täglich Vorschläge, wie die eigene Gesundheit – und damit auch das persönliche Punktekonto – optimiert werden kann. Dies geschieht zwar auf freiwilliger Basis, jedoch erzeugen die Assistenzsysteme einen sozialen Druck, dem sich kaum jemand entziehen kann. Dies bringt einige Bürgerinnen und Bürger dazu, das eigene Leistungsvermögen zur Schau zu stellen und sich freiwillig und proaktiv Nanobots zur Erfassung der eigenen Gesundheitsdaten einzusetzen.

Die Krankenkassen, die sich inzwischen vermehrt Gesundheitskassen nennen, setzen über flexible Tarifbildung weitere Steuerungsanreize. So wird etwa im Krankheitsfall der Einsatz intelligenter Medikamente, die eine sensorische Kontrolle der Medikamenteneinnahme ermöglichen, von den Kassen honoriert. Auch die Verwendung von künstlichem Blut, dessen Wirkversprechen u. a. ein besserer allgemeiner Gesundheitszustand bei manchen Patientinnen und Patienten ist, ist vielerorts inzwischen selbstverständlich. Um Erkenntnisse über Krankheiten zu gewinnen, setzt die medizinische Forschung zudem Biosensoren ein.

Umwelt und Energie

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Heute gibt es bereits eine Vielzahl von Apps und Websites, mit deren Hilfe der persönliche ökologische Fußabdruck berechnet werden kann. Und in der Szene von Nachhaltigkeitsbloggerinnen und -bloggern findet derzeit eine deutlich erkennbare Professionalisierung statt.

Quelle: Elliesen, M. (2016).

Starke Steuerungsanreize setzt das Punktesystem nicht nur bei der Gesunderhaltung der Bevölkerung, sondern auch bei klima- und umweltfreundlichen Lebensstilen. Auch in diesem Bereich befördert das Punktesystem schwache Entgrenzungen, indem es die freiwillige Dokumentation des eigenen ökologischen Fußabdrucks mittels technologischer Hilfsmittel entsprechend honoriert (siehe obige Szenariobeschreibung).

3.3.6 Anwendungsszenario 6: Regionale Ökologisierung

i Szenariorahmen



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

© BMBF2020.

Gemäß den ökonomischen Parametern hat die Wirtschafts- und Kaufkraft in Deutschland stark nachgelassen. Jedoch haben sich Wahrnehmungen und Einstellungen vieler Menschen in den 2030er-Jahren stark verändert – materieller Wohlstand und Konsum rücken in den Hintergrund. Diese tiefgreifenden Veränderungen sind eine Reaktion auf die massiven Auswirkungen des Klimawandels, die vermehrt von Hitzewellen, Hochwassern, schweren Stürmen und lokaler Wasserknappheit geprägt sind. Die Bevölkerung sieht darin auch eine Handlungsschwäche der Politik – und bildet selbst lokale Basisbewegungen. Diese entstehen teilweise aus Netzwerken der Fridays-for-Future-Gründungsmitglieder. Unter anderem setzt sich nun die zentrale Plattform „Everydays for Future!“ für effektiveren Klimaschutz ein. Lokale Verwaltungen ziehen nach: Gemeindevorsteher fordern Bürgerinnen und Bürger dazu auf, sich aktiv an der Gestaltung von Klimaschutzideen zu beteiligen. Deutschland befindet sich im Aufbruch in Richtung einer Gesellschaft, in der soziales Engagement und ökonomische Gleichheit tragende Rollen spielen. Und auch Wohlstand wird neu definiert: als Gewinn an Lebensqualität, Nachhaltigkeit und „Zeitwohlstand“.

Die Wirtschaft reagiert gespalten auf diese neuen Trends. Während sich einige Unternehmen für eine Verlegung von Arbeit ins Ausland entscheiden, richten andere wiederum ihre Produktion nach neuen Nachhaltigkeitsmustern aus und leisten dafür höhere Klimaschutzabgaben. Die EU-Kommission sieht in der „German Transformation“ einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Ziele des European Green Deals, etwa der Klimaneutralität bis 2050.

Die Wertelandschaft der 2030er-Jahre steht im Zeichen von sozialer Teilhabe und ökonomischer Gleichheit. Einfache Dienstleistungen und soziale Tätigkeiten werden immer mehr wertgeschätzt, weil sie für ein gutes und gesundes Miteinander unverzichtbar sind. Auch die Arbeit an sich wird verstärkt gemeinschaftsorientiert und sinnstiftend: Automatisierung wird nicht mehr als „Jobkiller“ wahrgenommen, sondern gibt den Menschen vielmehr die Freiheit, ihre Regelarbeitszeit zu senken – und dadurch mehr Freiräume für Weiterbildung und Selbstverwirklichung zu schaffen.



Klimaschutz erzeugt Offenheit gegenüber Entgrenzung

Die Menschen sehen die fortschreitenden Entgrenzungen durch Technologisierung und Biologisierung positiv. Sie begrüßen sie sogar – sofern sie eine wichtige Prämisse erfüllen: einen positiven Beitrag zur Umsetzung eines nachhaltigeren Lebensstils. Auch wenn der Beitrag noch so klein ist, das Motto lautet: „Jedes Gramm CO₂ zählt.“ So ergreifen die Menschen aufgeschlossen jede technologische Möglichkeit, die den ökologischen Fußabdruck vermindert – und gleichzeitig ein Mehr an Lebensqualität liefert. Für einen wirklich nachhaltigen Lebensstil akzeptieren die Menschen in Deutschland auch weniger Privatsphäre. Viele Bürgerinnen und Bürger lassen ihr (umweltbezogenes) Verhalten rund um die Uhr von digitalen Avataren beobachten und folgen deren Handlungsvorschlägen. Die erhobenen Daten teilen sie mit anderen Menschen über Live-Feeds in virtuellen Communitys. Empfehlungen anderer Community-Mitglieder, wie nachhaltige Praktiken noch besser in den Alltag integriert werden können, haben eine hohe Relevanz. Gerne gönnen sich die Menschen als Ausgleich zur zunehmenden Digitalisierung parallel auch den Rückzug in analoge Räume, um „Digital Detox“, also eine mentale Entgiftung von der intensiven Nutzung digitaler Technologien, zu betreiben.

Smarte Wearables und digitale Androiden

Zur Optimierung ihrer Verhaltensweisen vertrauen die Menschen auf fortschrittliche smarte Wearables. Die Umsätze mit Smart Glasses und smarten Kontaktlinsen sind in den vergangenen Jahren durch die Decke gegangen. Ihren Durchbruch verdanken sie neuen „Killer-Features“ rund um das Thema Nachhaltigkeit. In App-Stores findet sich ein vielfältiges Angebot an Apps rund um Themen wie Energiesparen, CO₂-Vermeidung und Ressourcenschonung. Für nahezu jedes Nachhaltigkeitsthema gibt es die passende App, viele Anwendungen integrieren gleich mehrere Nachhaltigkeitsthemen. In den Download-Charts stehen beispielsweise Apps zur Reduzierung des Wasserverbrauchs regelmäßig auf den vorderen Plätzen. Während des Händewaschens oder des Duschens erfasst die Kamera in der smarten Kontaktlinse den Wasserstrahl. Nach einer bestimmten Zeit oder verbrauchten Wassermenge gibt sie einen Hinweis, dass jeder weitere Tropfen unnötige Verschwendung wäre.

Eine Besonderheit ist der spezifische lokale Zuschnitt der Apps und der digitalen Avatare. So variiert etwa der Wasserhärtegrad von Region zu Region – und damit auch zum Haarewaschen die benötigte Wassermenge. Möglich macht dies eine stark ausdifferenzierte Community von Entwicklerinnen und Entwicklern. Diese ist

teilweise regional über dezentrale digitale Infrastrukturen organisiert. Automatisierungen haben dazu geführt, dass die durchschnittliche Wochenarbeitszeit in Deutschland gesenkt wurde. Dies bedeutet, dass auch Softwareentwicklerinnen und -entwickler mehr Freizeit haben. Diesen neuen „Zeitwohlstand“ nutzen sie u. a. dazu, nebenberuflich gemeinsam crowdbasierte Lösungen zu generieren. Aufgrund ihres regionalen und sozialinnovativen Charakters bringen die Anwenderinnen und Anwender solchen Lösungen großes Vertrauen entgegen. Viele der Entwicklerinnen und Entwickler sind den Menschen persönlich bekannt, persönlicher Austausch und Vertrauensbildungsprozesse gehören zum Alltag in den regionalen Nachhaltigkeitsszenen. Apps und digitale Avatare werden zudem regelmäßig mit Updates versorgt. Diese beinhalten sowohl die neuesten Optimierungsvorschläge aus der Community als auch neue Insights von den KI-basierten Avataren.



Lebende Umgebung

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Die Energiewende in der Mobilität erfordert die nachhaltige Produktion alternativer Brennstoffe. Anstelle von Sauerstoff produzieren schon heute in einem mikroskopisch kleinen Raum gepresste lebende Algenzellen durch Photosynthese grünen Wasserstoff. Dies könnte ein Ansatz für die ortsunabhängige Produktion von emissionsfreien Treibstoffen sein.

Quelle: Robitzski, D. (2020).

Zur Optimierung des eigenen, umweltbezogenen Verhaltens greifen die Menschen in Deutschland in den 2030er-Jahren auch gerne auf Technologien aus dem Feld der Biologisierung von Technologie zurück. Eine dieser Technologien sind biohybride, „lebende“ Materialien. Die Verwendung solcher Materialien innerhalb der eigenen vier Wände gilt als eine Art neues Statussymbol. So lassen sich in der Bevölkerung auch erste Anzeichen

von „Materialscham“ beobachten. Der neueste Verkaufsschlager in den Baumärkten sind modulare, lebende Paneele für Außenwände. Diese können mittels Pflanzenzellen – abhängig von der Wärmeeinstrahlung der Sonne – ihre physische Anordnung ändern und so ein besseres Energiemanagement von Häusern ermöglichen. Aber auch zur Reduzierung des Schadstoffgehalts im Abwasser finden sich in vielen Haushalten mittlerweile intelligente Filtersysteme. Diese basieren auf biohybriden Materialien mit modifizierten, synthetischen Zellen. Solche Systeme sind – natürlich um einige Dimensionen größer – auch Standard in der industriellen Produktion geworden. Als End-of-Pipe-Technologien spalten sie beispielsweise CO₂ ab und wandeln es direkt in geschlossenen Kreislaufsystemen in Synfuels um. Diese fließen dann wiederum als energetischer Input in industrielle oder chemische Prozesse ein. Auch die Mineralisierung von CO₂ über Mikroorganismen ist gängige Praxis geworden. Die Kreislaufwirtschaft ist keine Worthölse mehr.



Innovation „von unten“

Viele der mittlerweile etablierten Technologien gehen auf die Experimentierfreude und das schöpferische Wirken von Bürgerinnen und Bürgern zurück. In vielen Regionen sind mittlerweile Do-it-yourself-Kreativ-Labs fest etabliert. Hier kommen Menschen in ihrer Freizeit zusammen und forschen in Open-Innovation-Manier gemeinsam an neuen Lösungen für den Umweltschutz. Ausgestattet sind die Labs mit professionellem Forschungsequipment. Regelmäßig finden auch Ideenwettbewerbe statt, entweder von den Gemeinden ausgerufen oder überregional organisiert.

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Der Übergang hin zu biologisch abbaubaren Ressourcen ist in vollem Gange. Eine Teilnehmerin von „Jugend forscht“ hat einen Filter für Mikroplastik im Waschwasser entwickelt – ein Jugendlicher aus Irland kam auf eine ähnliche Idee: Mithilfe von Ferrofluid, einer Flüssigkeit, die auf Magnetfelder reagiert, wird das Mikroplastik im Wasser gebunden.

Dennoch erfordern die kommenden Jahrzehnte noch biotechnische Lösungen, um die Auswirkungen fossiler Stoffe auf die Umwelt zu reduzieren.

Quellen: Mändlen, L. (2019) und Jugend forscht (2019).

So haben sich mehrere regionale DIY-Hubs im deutschlandweiten Entwicklungsverbund „WE GO GREEN“ zusammengeschlossen, den die Fridays-for-Future-Bewegung ins Leben gerufen hat. Der Verbund möchte sicherstellen, dass ein Know-how-Transfer zwischen den Regionen stattfindet, um so Synergieeffekte in der Entwicklung dringender Lösungen zu generieren. Zudem präsentieren Bürgerinnen und Bürger ihre besten Ideen für den Umweltschutz im Rahmen des von der Bundesregierung geförderten jährlichen „Nachhaltigkeitswettbewerbs der Regionen“.

Statt eines Preisgelds für das Siegerteam fließen finanzielle Mittel zur gemeinsamen Nutzung in einen übergeordneten Topf – ganz im Sinne des Gemeinwohls. Mithilfe dieser Gelder bauen die Regionen ihre Forschungs-Labs weiter aus.



Entgrenzung für mehr Inklusion und Selbstverwirklichung

Entgrenzungstechnologien leisten in den 2030er-Jahren allerdings nicht nur einen positiven Beitrag zu Umweltschutz und ökologischer Nachhaltigkeit. Sie schaffen auch neue Möglichkeiten zur Selbstverwirklichung und Teilhabe von Menschen. Entgrenzungstechnologien ermöglichen es gerade älteren und körperlich eingeschränkten Menschen, ein selbstbestimmteres, unabhängigeres Leben zu führen. Dank dieser Technologien können Menschen auch im hohen Alter in der gewohnten sozialen Umgebung bleiben. Technologien wie Exoskelette oder softe Roboter haben mit dazu beigetragen, dass Mehrgenerationenhäuser inzwischen eine weitverbreitete Wohnform sind. Diese Technologien unterstützen ältere Menschen und die Angehörigen bei Alltagsaufgaben im Haushalt und bei der Pflege. Auch das Personal in Pflegeeinrichtungen begrüßt die zusätzliche Entlastung durch Robotiklösungen. Darüber hinaus sind humanoide Roboter auch zum Standard in der industriellen Produktion oder in Servicebranchen geworden. Sie unterstützen menschliche Arbeitskräfte oder ersetzen sie sogar zum Teil.

Durch die Absenkung der Wochenarbeitszeit infolge von Automatisierung besitzen die Menschen mehr Freizeit. Viele nutzen dies für private Weiterbildungen. Hierbei kommen zunehmend digitale Androiden und virtuelle 3-D-Umgebungen im Web 3.0 zum Einsatz. Weiterbildungskurse rund um den Schwerpunkt Nachhaltigkeit boomen. In virtuellen Volkshochschulen eignen sich die Lernenden gemeinsam den Stoff an, verkörpert durch ihre eigenen digitalen Androiden und Avatare. Lerninhalte werden dabei immer häufiger von emphatischen, KI-basierten digitalen Androiden vermittelt. Die Lerninhalte sind hochgradig personalisiert auf die einzelnen Lernenden zugeschnitten. Die virtuelle 3-D-Umgebung mit digitalen Androiden ist so gestaltet, dass Menschen tatsächliche soziale und räumliche Präsenz empfinden. Auch bei der gemeinschaftlichen Erforschung von neuen Lösungen für den Umweltschutz in den DIY-Labs sind solche Tools eine oft genutzte Option. Sie ermöglichen die Simulation und Entwicklung von Prototypen, ohne dass hierfür Ressourcen und Materialien verschwendet werden. Zudem müssen die Tüftlerinnen und Tüftler nicht physisch vor Ort sein, was Zeit und Energie für die Anreise einspart. Virtualisierung wird mittlerweile ganz selbstverständlich als ein probates Mittel für den Umweltschutz betrachtet. Der Energieverbrauch von Virtualisierungstechnologien ist innerhalb der letzten Jahre signifikant zurückgegangen. Vorbei sind die Tage, in denen KI-Systeme oder Blockchain-Anwendungen so viel Energie verbrauchten wie ganze Städte oder Autos über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg. Hybride Prozessoren finden zunehmend Einsatz in Rechenzentren und Serverfarmen; Experimente

mit Prototypen von Biocomputern sehen vielversprechend aus. Ihr Verbrauch liegt bei einem Bruchteil der Energiekosten der Anfang der 2020er-Jahre noch gängigen konventionellen Großrechner und Supercomputer. „Grün in IT und grün durch IT“ schließen sich somit in den 2030er-Jahren nicht mehr gegenseitig aus.



Exemplarische Kernanwendungsfelder der Entgrenzung



Industrielle Prozesse

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Englische Forscherinnen und Forscher entwickeln Biosensoren zur präziseren Bestimmung der Haltbarkeit von Lebensmitteln. Diese „papierbasierten elektrischen Gassensoren“ lassen sich in die Verpackung von Lebensmitteln integrieren und können die Verderblichkeit, z. B. von Fleisch und Fisch, durch kleinste Veränderungen in der Gasstruktur detektieren. So lassen sich Lebensmittelabfälle erheblich reduzieren.

Quelle: EU-Recycling (2019).

Entgrenzungstechnologien sind ein integraler Bestandteil industrieller wie chemischer Wertschöpfungsprozesse, um negative Effekte auf die natürliche Umwelt abzumildern oder im Idealfall gänzlich aufzulösen. Biosensoren mit ihrer außerordentlich hohen Spezifität und Sensitivität kommen in Unternehmen zum Einsatz, um Schadstoffe und deren Eintritt in die Umwelt zu überwachen und zu analysieren. Gerade in der Landwirtschaft konnten sich Biosensoren als absoluter Standard etablieren. In landwirtschaftlichen Ertragsflächen messen sie

auf ökologisch verträgliche Art und Weise die Konzentration von Phosphor oder Pestiziden. Neben Monitoring kommen Entgrenzungstechnologien auch gezielt bei der Schadstoffbekämpfung zum Einsatz. Ein relevantes Anwendungsfeld sind kleine Bioroboter. Sie finden sich in industriellen Abwässern und Kläranlagen, um Schadstoffe zu zersetzen und das Wasser aktiv zu reinigen. Sie finden sich aber auch in Recyclinganlagen, etwa für schwer wiederverwertbare Kompositmaterialien, und unterstützen dort chemische Aufbereitungsprozesse.



Wohnen und Haushalt

Zukunftssignal aus der Gegenwart

Im Rahmen des Programms Horizon 2020 unterstützt die EU das „Flora Robotica“-Projekt. Roboter sollen für die gezielte Begrünung von Flächen, Fassaden und ganzen Gebäuden eingesetzt werden und so die Lebensqualität in Häusern und Vierteln verbessern.

Quelle: Haarmann, J. (2017).

In den meisten Haushalten gehören unterschiedliche Entgrenzungstechnologien mittlerweile zur Basisausstattung. Ziel ist es, die Auswirkungen des eigenen Wohnens auf die Natur so gering wie möglich zu halten. Digitale Androiden unterstützen bei einem nachhaltigen Energie- und Wärmemanagement. Damit ähneln sie den Anfang der 2020er-Jahre weit verbreiteten Smart-Home-Systemen. Sie regeln nicht nur automatisch Parameter wie Tempera-

tur oder Beleuchtung, sie geben auch an die Bewohnerinnen und Bewohner regelmäßig Auskunft über deren Verhalten und beraten diese darin, wie sie ihre Lebensweise noch weiter verbessern können. Auch die Verbauung von biohybriden Materialien ist keine Seltenheit mehr. Viele Neubauten sind mit piezoelektrischen Bodenplatten auf Algenbasis versehen. Deren Enzyme „ernten“ die Schwingungsenergie, die beim Auftreten auf den Boden anfällt. Diese zusätzliche Form der Energiebereitstellung wird etwa für die Außenbeleuchtung oder die Warmwasseraufbereitung genutzt. Zudem ist auch der Markt für humanoide Haushaltsroboter keine Nische mehr. Ihre Arbeit befreit Bewohnerinnen und Bewohner von lästigen Alltagstätigkeiten, was Raum für sinnstiftende Aktivitäten schafft. Dies ist auch einer der Gründe, warum Mehrgenerationenhäuser en vogue

geworden sind. Die früher gängige seelische und körperliche Belastung der Menschen durch die Pflege von Familienangehörigen in den eigenen vier Wänden ist deutlich zurückgegangen.

Mobilität

In vielen Regionen wächst infolge der schlechten Haushaltssituation der Kostendruck. Dies betrifft auch den ÖPNV. Wichtige Bus- und Bahnverbindungen werden aufrechterhalten, angesichts des Verschleißes suchen die Kommunen nach innovativen Mitteln und Wegen, Wartungs- und Reparaturkosten so gering wie möglich zu halten. Taktungen werden zurückgefahren. In vielen Dörfern und Städten finden sich neben einem ausgedehnten Netz an Radschnellwegen auch Verleihsysteme für Exoskelette. Analog zum Prinzip der offenen Bücherschränke finden sich an stark frequentierten Mobilitätsknotenpunkten Self-Service-Verleihstationen. Diese haben Exoskelette in unterschiedlichen Größen vorrätig. Einmal umgeschnallt, lassen sich Wege durch die Stadt oder die Nachbarschaft viel schneller absolvieren. Exoskelette sind somit zu einer attraktiven und stark nachgefragten Form der Körperkraftmobilität geworden.

Darüber hinaus substituieren Entgrenzungstechnologien auch die Notwendigkeit, überhaupt in der realen Welt mobil zu sein. Viele Treffen finden nun bewusst in der Cloud statt. Mittels digitaler Androiden und immersiver 3-D-Umgebungen lassen sich ehemals physische Treffen nahezu perfekt digital abbilden. Viele Menschen tragen bei virtuellen Treffen auch neueste Generationen von weichen, kleidungsähnlichen Exoskeletten, die mit einer „Force-Feedback-Funktion“ ausgestattet sind. Diese macht virtuelle Berührungen haptisch erlebbar. Gerade bei Paaren, die in Fernbeziehungen leben, erfreuen sich solche Technologien großer Beliebtheit.

Forschung und Entwicklung

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten fokussieren stark auf die Generierung von Lösungen für den Umweltschutz. Und auch die FuE-Aktivitäten selbst orientieren sich am Nachhaltigkeitparadigma. Wichtige Forschungsfelder in den 2030er-Jahren finden sich daher insbesondere im Bereich der Biologisierung von Technik. Intensiv geforscht wird an biohybriden Materialien. Sie gelten als wesentlicher Hebel, um die Umwelteinwirkungen verschiedener Industrien und Anwendungen über intelligente Materialeffekte zu drosseln. Auch DNA-Speicher und biologische Computer sind weit verbreitet. Diese speichern und verarbeiten Daten mit einem Bruchteil des Energieverbrauchs konventioneller Computing-Technologien. Einzelne Forschungsinstitute haben damit begonnen, ihre gesamten Wissensdatenbanken in DNA-Speicher zu übertragen. Im Lebensmittelsektor wird mit neuen Methoden der Biofabrikation experimentiert. Hierdurch konnten bei „künstlichem“ Fleisch, das in Aussehen, Geschmack und Textur echtem Fleisch in nichts nachsteht, enorme Kostensenkungen realisiert werden.

4. STECKBRIEFE DER BIODIGITALEN ANWENDUNGSTECHNOLOGIEN

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die jeweiligen Kategorien von Anwendungstechnologien, die heute teilweise bereits zu einer Entgrenzung beitragen oder dies zukünftig tun könnten. Beschrieben werden zudem die Anwendungsbereiche und zukünftige Entwicklungspotenziale der einzelnen Bereiche bzw. konkreter Technologien. Die Technologien sind nicht als isolierte Themenstränge zu betrachten, sondern müssen in dynamischen Wechselwirkungen zu den jeweils anderen Trends und weiteren Einflussgrößen gesehen werden. Die hier beschriebenen Trends verstärken und bedingen sich demnach teilweise wechselseitig.

4.1 Technisierung biologischer Systeme: Entgrenzung des Menschen

(Smarte) Wearables



(Smarte) Wearables

Beschreibung

(Smarte) Wearables beschreiben miniaturisierte Computersysteme, die nahe an oder auf der Hautoberfläche getragen werden. Häufig sollen sie zu einer Steigerung der Wahrnehmungsfähigkeiten der Umwelt und einer noch intensiveren Kommunikation mit dieser beitragen. Zusätzliche Informationen sollen die Nutzerin bzw. den Nutzer befähigen, ihre/seine Leistung insofern zu erweitern, als dass schnellere und besser begründete Entscheidungen getroffen werden. Aber auch die Gesundheit bzw. Vorsorgemöglichkeiten sollen mithilfe von Wearables optimiert werden.

Technologien

Smart Glasses und smarte Kontaktlinsen:

Sie blenden relevante Informationen live in das Sichtfeld der Nutzerin oder des Nutzers ein oder überlagern dieses teilweise (Augmented und Mixed Reality). Beide Technologien haben gemein, dass die Steuerung freihändig erfolgen kann, etwa durch Eye-Tracking.

Digitale Tattoos:

Diese bestehen aus winzigen, fast nicht erkennbaren Schaltkreisen und Sensoren, die auf der Haut appliziert werden. Informationen über die Trägerin bzw. den Träger werden aufgezeichnet und auf geeignete Geräte (wie etwa Computer oder Smartphones) übermittelt.⁹²

RFID-Chips:

Die Chips werden unter die Haut gespritzt und übertragen ähnlich wie digitale Tattoos mittels Radiowellen Daten.⁹³

⁹² Vgl. The Medical Futurist (2018) und Müller-Jung, J. (2017).

⁹³ Vgl. Spehr, M. (2018).

Stand der Forschung

Smart Wearables befinden sich in einzelnen Bereichen bereits in der Anwendung. Beispielsweise konnten sich **Smart Glasses** in der Industrie (insbesondere Lagerlogistik) durch die Beschleunigung von Prozessen bereits etablieren.⁹⁴ **RFID-Chips** und **digitale Tattoos** werden bereits heute zum Öffnen von Türen oder Übertragen von einfachen Informationen (wie Kontaktdaten) eingesetzt. In Schweden etwa beläuft sich die Zahl der Personen mit implantierten RFID-Chips auf über 4000.⁹⁵ Insbesondere die Nutzung von RFID-Chips ist in der Biohacking-Szene etabliert. **Smarte Kontaktlinsen** hingegen befinden sich derzeit noch in der Entwicklungsphase, ihre Marktreife wird von Expertinnen und Experten für das Jahr 2030 aber als überwiegend eher wahrscheinlich eingestuft – insbesondere, wenn zukünftig die Miniaturisierung, die Energieversorgung und ein hoher Tragekomfort der Technologie gelingen.⁹⁶

Die Patentanmeldungen in Bereich der smarten Wearables zeigen derzeit ein niedriges Niveau mit insgesamt nur 22 Patenten seit 2015. Nach einem anfänglichen Hoch im Jahr 2016 haben sie eher abgenommen. Die Veröffentlichungen konzentrieren sich überwiegend auf den Bereich Optik und stammen vor allem aus Südkorea und den USA.⁹⁷ Im Bereich der Forschungspublikationen zeigt sich jedoch ein kontinuierliches Wachstum, das insbesondere von Südkorea und den USA generiert wird.⁹⁸ Ein wichtiger Treiber für die Weiterentwicklung und einen potenziellen Durchbruch der smarten Kontaktlinse stellt grundsätzlich die Nanotechnologie vor allem in Verbindung mit den Materialwissenschaften dar.

Mögliche Entwicklungen in der Zukunft

Der Einsatz von **smarten Kontaktlinsen** scheitert derzeit u. a. an einer zu geringen Sauerstoffdurchlässigkeit. Dieses Problem könnte durch die Verwendung von Graphen mit nanoskaligen Poren gelöst werden, die den Sauerstofftransport durch den Kontakt zum Auge ermöglichen.⁹⁹ Unter anderem durch die Verschmelzung von Auge und Technik, die für Außenstehende nicht auf Anhieb erkennbar ist, sehen die Expertinnen und Experten in Zukunft ein mittleres bis großes Entgrenzungspotenzial für diese Technologie.¹⁰⁰ Ihr Einsatz in der Arbeitswelt, z. B. in der industriellen Fertigung, könnte (ähnlich wie bei **Smart Glasses**) zu erheblichen Produktivitätssteigerungen führen, etwa durch das Einblenden von Informationen für die Navigation von Maschinen oder die Warenkommissionierung sowie von Zusatzinformationen über die Umgebung. Auf diese Weise könnten vor allem Zeitersparnisse erzielt und Fehlerraten erheblich gesenkt werden. Zusätzlich könnte sich durch die Messung von Körperdaten auch ein grundsätzlich großes Potenzial im Gesundheitsbereich und in der medizinischen Anwendung ergeben: Die Ideen reichen hier von Kontaktlinsen, die mithilfe von Minisensoren und -sendern den Glukosegehalt in der Tränenflüssigkeit messen und die Betroffenen z. B. über LED-Licht in der Linse warnen – Diabetikerinnen und Diabetikern könnte so das schmerzhaftes Blutzuckermessen per Punktion erspart werden – bis hin zum Einsatz von smarten Kontaktlinsen bei Altersweitsichtigkeit oder grauem Star.¹⁰¹ Schließlich wäre es denkbar, dass die smarten Kontaktlinsen, Smart Glasses oder auch andere Wearables nicht nur die Körperdaten messen, sondern der Nutzerin bzw. dem Nutzer darüber hinaus auch Informationen zu einer Fachärztin bzw. einem Facharzt in der Nähe oder bei Begegnungen mit unbekannten Personen Informationen und Kontaktdaten einspielen.¹⁰²

Smarte Kontaktlinsen könnten zukünftig zudem die Welt der Fotografie- und Videoaufnahmen revolutionieren. So gibt es Visionen, in denen Hightech-Linsen mithilfe von Sensoren per bewusstem Blinzeln Fotos oder Videos aufnehmen, speichern oder auch wiedergeben. Kamerafunktionen wie Brennweite, Fokus oder Belichtungszeit sollen sich automatisch über die Linse einstellen. Die integrierten Kamerafunktionen in Verbindung

⁹⁴ Vgl. Fraunhofer IPT (o. D.).

⁹⁵ Siehe Savage, M. (2018). Vgl. Produkte des schwedischen Start-ups Biohax in Kooperation mit NXP Semiconductors.

⁹⁶ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

⁹⁷ Ergebnisse der Patentanalyse. Die Ergebnisse sind mit Vorsicht zu interpretieren, da nur 22 Patente identifiziert wurden.

⁹⁸ Ergebnisse der Publikationsanalyse.

⁹⁹ Vgl. Sustainable Nano (2018).

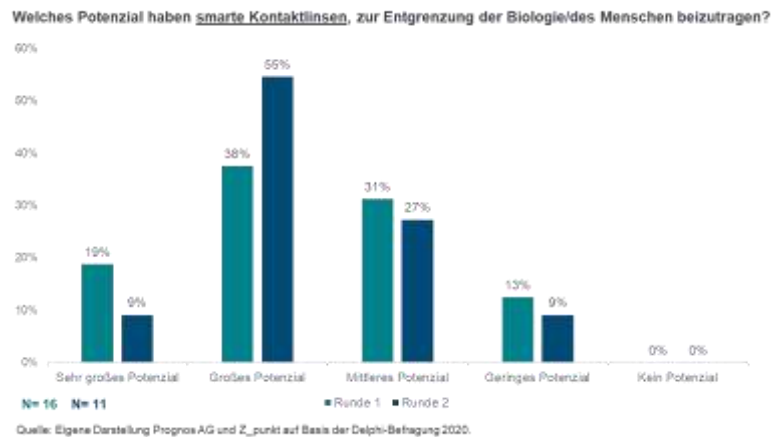
¹⁰⁰ Ergebnisse der Delphi-Befragung. Vgl. auch experimentelle Entwicklungen von Samsung, Google und Sony oder des medizinisch orientierten Unternehmens Mojo Vision.

¹⁰¹ Vgl. Zinner, F. (2019).

¹⁰² Vgl. Fraunhofer (2016), S. 3, und WDR 5 (2020).

mit der Nutzung von Gesichtserkennungssoftware böten zudem Anwendungspotenziale in Bereichen wie Militär, Polizei oder auch Spionage: So könnten z. B. Fotos oder Videos ohne das Wissen anderer aufgenommen werden und sensible Informationen über Personen in der Umgebung angezeigt oder als Zielhilfe in Schusswaffen eingesetzt werden.

Schließlich zeigen sich zukünftig Anwendungspotenziale im Bereich Sicherheit. Denkbar wäre z. B. das Freischalten von Geräten, Funktionen oder auch Apps oder Bankkonten über die Gesichtserkennung, ähnlich wie dies heute bereits häufig in Smartphones integriert ist.¹⁰³ In eine ähnliche Richtung gehen Ideen zu smarten Wearables im Rahmen des Fraunhofer-Projekts „Shaping Future“, im Rahmen dessen die Vorstellungen von Bürgerinnen und Bürgern abgefragt wurden. Diese können sich beispielsweise vorstellen, dass smarte Kontaktlinsen oder Smart Glasses im Jahr 2053 die emotionale Verfassung des Gegenübers anzeigen.¹⁰⁴ Vorstellbar ist auch ein zukünftiger Einsatz der Linsen als Computermonitor oder in Verbindung mit unterschiedlichen Augmented-Reality-Anwendungen (Gaming, Apps etc.), was dann immersive Erlebnisse ohne Brille und Headset möglich machen könnte.¹⁰⁵ Zukünftige Entwicklungspotenziale sowie Einsatzbereiche dieser Technologien hängen jedoch auch von datenschutzrechtlichen Bestimmungen ab.



Zukünftig könnten mithilfe von leistungsfähigeren **RFID-Chips** auch komplexere Daten, wie beispielsweise Bankzahlungen, übertragen werden. Da diese per Radiofrequenzen übertragenen Informationen relativ einfach von Dritten mitgelesen werden können, könnten Fortschritte im Datenschutz die Akzeptanz der RFID-Chips erhöhen.¹⁰⁶ Darüber hinaus könnten die Chips zukünftig auch eine Energieversorgung aus dem Körper heraus herstellen und auf diese Weise z. B. GPS-Daten generieren.¹⁰⁷ **Digitale Tattoos** könnten in Zukunft – insbesondere durch die Messung und Übertragung von Körperwerten – Anwendungsgebiete in der Medizin eröffnen, da etwa Herzrhythmus- oder Schlafstörungen einfacher diagnostiziert werden könnten als mit herkömmlichen Methoden. Insbesondere bei Risikopatientinnen und -patienten oder etwa nach Schlaganfällen könnte diese Technologie Leben retten, da bei kritischen Körperwerten z. B. das digitale Tattoo medizinisches Personal alarmieren könnte. Weitere Anwendungsgebiete könnten sich auch durch die Kopplung mit künstlicher Intelligenz ergeben. Ein weiteres Merkmal dieser Technologie ist die geringe Haltbarkeit. Da die Haut sich stetig regeneriert, muss diese Technologie alle paar Tage erneuert werden. Daher wäre ein geringer Stückpreis eine wichtige Voraussetzung für eine verbreitete Einsatzform der digitalen Tattoos.¹⁰⁸

¹⁰³ Due, B. L. (2014) und Ergebnisse der Delphi-Befragung.

¹⁰⁴ Siehe Fraunhofer (2016).

¹⁰⁵ Vgl. Ergebnisse der Delphi-Befragung; Pinker, A. (2020) und ARD (2020).

¹⁰⁶ Vgl. Chadwick, L. (2020).

¹⁰⁷ Vgl. Läscher, K. (2019).

¹⁰⁸ Bylda, P. (2016).

Zukünftiges Entgrenzungspotenzial der Technologien¹⁰⁹

Schwachtes zukünftiges Entgrenzungspotenzial				
	Etablierung	Eingriffsstärke	Wirkungsstärke	Autonomie
Smart Glasses	teilweise etabliert (TR9)	nicht invasiv	mittel (reversibel und kurzfristig)	automatisiert
Smarte Kontaktlinsen	nicht etabliert (TR6)	nicht invasiv	mittel (reversibel und kurzfristig)	automatisiert
RFID-Chips	teilweise etabliert (TR9)	invasiv	mittel (reversibel und mittelfristig)	automatisiert
Digitale Tattoos	teilweise etabliert (TR8)	nicht invasiv	gering (reversibel und mittelfristig)	voll automatisiert

Exoskelette und (Neuro-)Prothesen



Exoskelette und (Neuro-)Prothesen

Beschreibung

Exoskelette sind mechanische, maschinelle bzw. robotische Strukturen zur körperlichen Unterstützung und Entlastung. In der Regel werden sie am Körper getragen. **Prothesen** kommen klassischerweise zum Einsatz, um Gliedmaßen oder Körperteile künstlich zu ersetzen. Sie kommen sowohl außerhalb des Körpers eingesetzt als auch im Körperinneren (z. B. künstliches Hüftgelenk). Einen Schritt weiter gehen **(sensorische und motorische) Neuroprothesen**. Hierbei werden nicht zwangsläufig Gliedmaßen oder Körperteile ersetzt, sondern schadhafte Nervenverbindungen oder Funktionen ausgeglichen oder stimuliert.¹¹⁰ Elektronische Bauteile werden dazu über invasive (Implantate) oder nicht invasive (externe Elektroden) Schnittstellen mit dem Nervensystem verbunden.

Technologien

Passive Exoskelette:

Sie nehmen körperliche Belastungen über mechanische Funktionsweisen (z. B. mithilfe einer Feder oder einem Kabel) auf und wandeln diese in Energie um, welche wiederum als Unterstützung einer Haltung oder einer Bewegung dient.

Aktive Exoskelette (tragbare Robotik):

Diese übertragen hingegen externe Kräfte mithilfe eines Antriebs (z. B. mittels Sensoren und Aktoren) und können so die Leistungsfähigkeit der Trägerin bzw. des Trägers steigern.¹¹¹ Schließlich können aktive Exoskelette mit invasiven und nicht invasiven Gehirnschnittstellen verbunden werden – mit dem Ziel, die Geräte „per Gedanken“ zu steuern.¹¹²

Motorische Neuroprothesen:

Zum Beispiel **fühlende Hand- und Fußprothesen**, bei denen Elektroimpulse in die Nerven der Trägerin oder des Trägers eingespeist werden. Dies führt dazu, dass die Prothese als Körperteil wahrgenommen

¹⁰⁹ Basis der Einschätzung neben der eigenen Beurteilung: Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten und Ergebnisse der Delphi-Befragung.

¹¹⁰ Für den vollständigen Ersatz von Organen durch künstliche Organe siehe Abschnitt „(Flüssige) Organe auf Basis synthetischer Biologie“.

¹¹¹ VDI (2020) und Ergebnisse der Delphi-Befragung. Vgl. auch das Exoskelett HAL des Unternehmens Cyberdyne.

¹¹² Kawamoto, H. et al. (2013).

werden kann.¹¹³

Sensorische Neuroprothesen:

Zum Beispiel Retina- oder Cochlea-Implantate. Retina-Implantate sind Sehprothesen für stark sehbehinderte oder blinde Menschen, deren Rezeptorzellen der Netzhaut krankheitsbedingt ihre Funktion verloren haben, deren Sehnerv aber noch eine intakte Verbindung zum Gehirn bildet. Das Cochlea-Implantat ist eine Hörprothese für Gehörlose und Ertaubte, deren Hörnerv als Teilorgan der auditiven Wahrnehmung noch funktionsfähig ist.

Stand der Forschung

Die Dynamik der technologischen Entwicklungen von **Exoskeletten** hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen, was an den Patentanmeldungen deutlich wird. Der Großteil der Patentanmeldungen erfolgt von Antragstellerinnen bzw. Antragstellern mit Geschäftssitz in den USA, wenngleich sich die anmeldenden Einrichtungen mehrheitlich in China befinden.¹¹⁴ Auch im Bereich der Publikationstätigkeit zeigt sich ein starkes Wachstum, bei dem China im Jahr 2018 die USA, was die Publikationszahl angeht, überflügeln konnte. Diese gestiegene Bedeutung findet sich auch in den Zitationen wieder, wobei die relative Bedeutung der Forschung aus den USA die chinesische noch immer knapp übertrifft.¹¹⁵ Einfache Exoskelette sind

Expertinnen- und Experteninterview 17

„Es gibt einen Wettlauf: Was wird eher flächendeckend etabliert sein – der Roboter, der die Arbeit für die Menschen übernimmt oder Exoskelette für Industriearbeiter, um diese bei der Arbeit zu unterstützen?“

inzwischen auf dem Markt etabliert. Derzeit finden sie vor allem in einzelnen Industriezweigen, z. B. bei körperlich schwer belastenden Arbeiten oder in Bereichen, bei denen man lange eine einseitige Körperhaltung einnehmen muss, Anwendung. Für aktive Exoskelette ist die Nachfrage in den vergangenen Jahren insbesondere in der medizinischen Rehabilitation gestiegen (z. B. für das Wiedererlernen des Laufens).¹¹⁶ Dieser Bedeutungszugewinn der

Medizin als Anwendungsfeld zeigt sich ebenfalls in der Publikationsdynamik.¹¹⁷ Hier stellt die Medizin das bedeutendste nicht technische Forschungsfeld.

Sensorische Neuroprothesen befinden sich ebenso teilweise bereits im Einsatz – Expertinnen und Experten gehen überwiegend von ihrer Marktreife bis 2030 aus. Während die Forschungspublikationen seit 2010 stetig steigen (über 70 Prozent zwischen 2010 und 2019), flachen die Patentanmeldungen von sensorischen Neuroprothesen seit 2013 ab. Der Großteil der Patentanmeldungen findet in den USA statt, gefolgt von Deutschland.¹¹⁸ Auch hier zeigt sich die Intensivierung der Forschung insbesondere in der Volksrepublik China, welche die USA in ihrer relativen Bedeutung zunehmend überflügelt. Deutschland nahm insbesondere bis 2016 eine wichtige Rolle ein, in den letzten Jahren hat die Bedeutung deutscher Forschung bei Neuroprothesen jedoch etwas abgenommen.¹¹⁹ Als typische Prothesen werden Retina-Implantate bereits heute eingesetzt, um bei stark sehbehinderten Menschen die verloren gegangene Sehfähigkeit zu kompensieren – die meisten Patentanmeldungen stammen ebenfalls aus diesem Bereich. Gleiches gilt für das Cochlea-Implantat, welches eine starke bis hochgradige Hörminderung ausgleicht. In beiden Fällen werden jedoch nach wie vor funktionierende Nervenstränge benötigt. Weitere Fortschritte in der Erforschung sensorischer Neuroprothesen könnten etwa dazu führen, dass künftig beispielsweise komplett erblindete

¹¹³ In der Literatur werden häufig auch invasive oder nicht invasive Gehirnschnittstellen aufgeführt, mit denen z. B. Beeinträchtigungen wie Parkinson, Querschnittslähmung oder das Locked-in-Syndrom behandelt werden, um motorische Fähigkeiten wiederherzustellen. Da der Einsatz von invasiven oder nicht invasiven Gehirnschnittstellen in Verbindung mit mehreren verschiedenen Technologien vorkommt und diese zudem eine große Bandbreite von Anwendungsbereichen und Funktionen aufweisen können, werden diese gesondert im Abschnitt „Neuroelektronische Schnittstellen“ beschrieben.

¹¹⁴ Ergebnisse der Patentanalyse. Anmerkung: Die Diskrepanz zu den Anmeldeländern ergibt sich aus der mangelnden Datenlage.

¹¹⁵ Ergebnisse der Publikationsanalyse.

¹¹⁶ Vgl. Benabid, A. L. et al. (2019). und Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten.

¹¹⁷ Unter den Top Drei der IPC-Klassifikationen in der Patentanalyse finden sich u. a.: 619 A61H1 - Geräte für passives Training; Vibrationsgeräte; chiropraktische Geräte, z. B. Körperschlaggeräte, externe Geräte zur kurzzeitigen Streckung oder Ausrichtung von ungebrochenen Knochen und 578 A61H3 – Geräte als Gehhilfe für Patienten oder behinderte Personen.

¹¹⁸ Ergebnisse der Patentanalyse.

¹¹⁹ Ergebnisse der Publikationsanalyse.

Menschen wieder sehen. Dabei könnten insbesondere die Verbesserung der Leistungsfähigkeit der implantierten Mikroelektroden und Fortschritte in der Entschlüsselung von Hirnsignalen zu dieser qualitativen Steigerung der sensorischen und motorischen Fähigkeiten führen.¹²⁰

Mögliche Entwicklungen in der Zukunft

Zukünftig könnte die Nachfrage nach **Exoskeletten** insbesondere im medizinischen Bereich und in der Rehabilitation weiter zunehmen – vor allem dann, wenn es gelänge, die Akkulaufzeit oder die Energiezufuhr zu verbessern und so einen längeren Einsatz zu ermöglichen (Systeme mit motorischen Hüften und Knien, die Menschen mit einer Rückenmarksverletzung beispielsweise das Gehen ermöglichen, haben derzeit häufig nur eine Akkulaufzeit von ca. drei Stunden).¹²¹ Eine Variante davon könnte die Verknüpfung von Exoskeletten mit nicht invasiven Schnittstellen darstellen. Vorstellbar wäre dann die Steuerung von Exoskeletten durch Gedankenkraft (z. B. mittels externer Elektroden).¹²² Expertinnen und Experten sehen bereits in dieser Verknüpfung ein Entgrenzungspotenzial, welches noch stärker ausfiele, wäre die Gedankensteuerung mittels invasiver Schnittstellen möglich. So könnte die Verknüpfung mit der Gedankensteuerung beispielsweise die dauerhafte Fortbewegung – d. h. unabhängig von Akkulaufzeiten – querschnittsgelähmter Personen mithilfe von Exoskeletten begünstigen. Das Exoskelett würde dann über die Gehirnschnittstelle bewegt und würde keinen Akku mehr benötigen, der die Fortbewegung antreibt. Diese Entwicklungen, aber auch schon einfachere Verbesserungen, beispielsweise die Steigerung der Akzeptanz von Exoskeletten (z. B. dank einer besseren Handhabbarkeit, Gewichtsreduzierung durch leichtere Materialien oder Sicherungsmechanismen gegen mögliche technische Fehlfunktionen), eine bessere Energieversorgung oder längere Akkulaufzeiten sowie eine kostengünstigere Produktion (z. B. mithilfe von 3-D-Druck) könnten zukünftig dazu führen, dass Exoskelette nicht nur im medizinischen Kontext und am Arbeitsplatz eine breite Anwendung fänden, sondern auch im Alltag und in der Freizeit.¹²³ Ältere Personen könnten z. B. Unterstützung des Bewegungsapparats erhalten, der Möbeltransport oder das Umstellen von Möbeln könnte dank Exoskeletten mit weitaus weniger Helferinnen und Helfern durchgeführt werden und im Sport könnten Exoskelette als „technisches Doping“ für eine Leistungssteigerung (ähnlich wie es heute bereits mit Prothesen der Fall ist, siehe unten) eingesetzt werden. Es könnten sich sogar ganz neue Sportarten herausbilden, wie es sich z. B. im Rahmen des Cybathlons bereits abzeichnet.¹²⁴ Dabei handelt es sich um ein 2013 ins Leben gerufenes Wettkampfprogramm, deren Teilnehmende anders als bei den Paralympics auch Geräte mit integrierten Energiequellen und Hilfsmotoren benutzen dürfen. Grundsätzlich könnten die Exoskelette neben der Wiederherstellung von Funktionen bzw. der Unterstützungs- und Schonungsfunktion des menschlichen Körpers zunehmend auch dafür eingesetzt werden, die Fähigkeiten und Leistung der Menschen zu steigern, insbesondere auch im sportlichen Bereich, was ein zusätzliches Entgrenzungspotenzial bieten würde.¹²⁵ Entwicklungen im Bereich der Automatisierung hingegen könnten sich hinderlich auf einen potenziellen zukünftigen flächendeckenden Einsatz von Exoskeletten – insbesondere in der Industrie – auswirken, wenn immer mehr Aufgaben durch automatisierte Maschinen umgesetzt würden.

In Zukunft könnten Exoskelette zudem im militärischen Bereich verstärkt Anwendung finden. Bereits heute werden Prototypen für Ganzkörper-Exoskelette für das Militär hergestellt, damit Soldatinnen und Soldaten z. B. schwerere Lasten über eine längere Strecke tragen oder schneller laufen können. Diese Ganzkörper-Exoskelette befinden sich jedoch überwiegend noch in der Erforschung.¹²⁶ Auch im Katastropheneinsatz könnten sich zukünftig Anwendungsbereiche ergeben, wenn es darum geht, schwere Trümmerteile aus dem Weg zu räumen. In Science-Fiction-Werken schon lange und immer wieder thematisiert – z. B. im Film „Iron Man“, in dem ein „Eisenmann“ sich ein Exoskelett anfertigt, nachdem die Explosion einer Bombe ihn schwer verletzt hat, oder in „Edge of Tomorrow“, in dem Tom Cruise als „Cage“ in einem Hightech-

¹²⁰ Vgl. Normann, R. A. (2007).

¹²¹ Vgl. Lewis, R. (2017).

¹²² Vgl. Heiduk, D. (2019) und Ergebnisse der Delphi-Befragung. Anmerkung: Einige Expertinnen und Experten gehen zudem davon aus, dass solche Entwicklungen bis 2030 Marktreife erlangen.

¹²³ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

¹²⁴ Vgl. Ergebnisse der Delphi-Befragung; Ergebnisse des Futures-Wheel-Workshops und Gorgey, A. S. (2018).

¹²⁵ Ergebnisse der Delphi-Befragung und Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten.

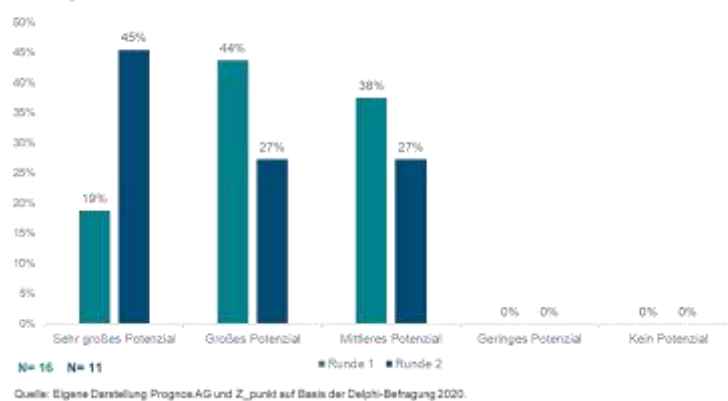
¹²⁶ Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten.

Exoskelett kämpft –, könnten zukünftig u. a. Exoskelette, die ggf. sogar übernatürliche Fähigkeiten aufweisen, für Soldatinnen und Soldaten Wirklichkeit werden.¹²⁷

Während **sensorische Neuroprothesen** derzeit in erster Linie medizinisch motiviert sind und dazu dienen, der Trägerin bzw. dem Träger die Reproduktion von Sinneswahrnehmungen zu ermöglichen, bieten diese auch Anwendungsmöglichkeiten zur Erweiterung der natürlichen Fähigkeiten menschlicher Sinne. Das Retina-Implantat beispielsweise kann die Wahrnehmung von bisher verwehrt Frequenzbereichen (wie etwa UV/Infrarot) ermöglichen.¹²⁸ Mithilfe des Cochlea-Implantats können u. a. Ultraschallfrequenzen gehört werden.¹²⁹ Zudem ermöglicht dieses, Sinneseindrücke zu erweitern und Farben hörbar werden zu lassen. Erste Experimente zielen auf eine Sinneserweiterung ab, ohne dass körperliche Einschränkungen vorliegen: So kann der erste von einer Regierung anerkannte Cyborg Neil Harbisson mittels eines selbst gebauten Sensors, der die Farbinformationen in Form von Tönen an sein Gehirn weiterleitet, bis zu 360 verschiedene Farbabstufungen wahrnehmen.¹³⁰ Ein hohes Entgrenzungspotenzial dieser Technologien sehen Expertinnen und Experten entsprechend dann, wenn diese in größerem Maßstab bei Menschen ohne jegliche körperliche Einschränkung eingesetzt werden, vor allem da die Technik durch den invasiven Eingriff dauerhaft mit dem Menschen verbunden werden kann. Dem entgegen steht derzeit noch der vergleichsweise hohe Risikograd, der aus dem notwendigen chirurgischen Eingriff resultiert. Ähnlich wie bei Exoskeletten könnten diese Entwicklungen zukünftig auch in einem militärischen Zusammenhang von Interesse

sein, um die Leistung von Soldatinnen und Soldaten zu steigern bzw. zu erweitern.

Welches Potenzial haben sensorische Neuroprothesen, zur Entgrenzung der Biologie/des Menschen beizutragen?



Motorische Neuroprothesen könnten sich zukünftig wie tatsächliche Körperteile für die Trägerin oder den Träger anfühlen. Erste Erfolge gab es dabei bereits: Mittels in die Nervenbahnen eingefädelt Elektroden wird das Fühlen der Griffkraft, d. h., wie weit die Hand geöffnet ist, ermöglicht.

Dadurch entwickelt sich das

Gefühl bei der Trägerin oder dem Träger, die Prothese sei ein natürlicher Teil des Körpers. Die Bewegung der Prothese erfolgt dabei – unabhängig von erlernten Denkmustern – über Gedankenkraft.¹³¹ Derzeit ist die Bewegung noch an Signale des Gehirns an den Körper gekoppelt (z. B. bewusstes Denken an „Hand auf“, um die Hand zu öffnen). Zukünftiges Potenzial wird zudem in der Verknüpfung von Prothetik und künstlicher Intelligenz gesehen, z. B. im Bereich der Armprothetik. Dabei könnten in einer Prothese verbauete Elektroden Nervensignale aus dem gesunden Teil des Arms auslesen. Mittels maschinellen Lernens könnten diese Informationen verarbeitet werden, sodass die Prothese erkennt, welche Bewegungen die Nutzerin bzw. der Nutzer vornehmen möchte. Mit anderen Worten: Auf Basis der aus dem gesunden Körperteil gewonnenen Informationen würde sich so eine bessere Handhabung von Prothesen ergeben.¹³² Weitere Treiber der Prothetik sehen Expertinnen und Experten ähnlich wie bei den Exoskeletten in einer Kostensenkung (z. B. durch 3-D-Druck), der Miniaturisierung der Implantate oder in der Erforschung biokompatibler Materialien.¹³³

¹²⁷ Ergebnisse der Delphi-Befragung und Ergebnisse des Futures-Wheel-Workshops.

¹²⁸ Vgl. Kehl, C.; Coenen, C. (2016) und Park, E. (2019).

¹²⁹ Vgl. Kehl, C.; Coenen, C. (2016).

¹³⁰ Vgl. WDR (2014).

¹³¹ Universität Freiburg (2019). und Thoma-Widmann, N. (o. D.).

¹³² Vgl. Niller, E. (2018) und Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten.

¹³³ Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten.

Zukünftiges Entgrenzungspotenzial der Technologien¹³⁴

Schwachendes zukünftiges Entgrenzungspotenzial				
	Etablierung	Eingriffsstärke	Wirkungsstärke	Autonomie
Passive Exoskelette	etabliert (TR8)	nicht invasiv	mittel (reversibel und kurzfristig)	teilweise automatisiert
Aktive Exoskelette ohne Verbindung mit Gehirnschnittstellen	etabliert (TR8)	nicht invasiv	mittel (reversibel und kurzfristig)	teilweise automatisiert
Starkes zukünftiges Entgrenzungspotenzial				
Motorische Prothesen	teilweise etabliert (TR6)	invasiv	hoch (aufwendige Reversibilität & langfristig)	automatisiert
Sensorische Prothesen	teilweise etabliert (TR9)	invasiv	hoch (aufwendige Reversibilität und langfristig)	voll automatisiert
Aktive Exoskelette in Verbindung mit Gehirnschnittstellen	nicht etabliert (TR4)	teilinvasiv	hoch (aufwendige Reversibilität und langfristig)	voll automatisiert

Neuroelektronische Schnittstellen



Neuroelektronische Schnittstellen

Beschreibung

Unter **neuroelektronischen Schnittstellen** sind Anwendungen zu fassen, bei denen maschinelle Systeme mit dem menschlichen Nervensystem gekoppelt werden. Dabei gibt es einerseits **ableitende Schnittstellen**, die elektrische Signale vom Nervensystem erfassen und an eine Technologie (Apparat, Computer, Prothese) übertragen, und andererseits **stimulierende Schnittstellen**, die elektrische Signale von außen zum Nervensystem leiten. Darüber hinaus gibt es Methoden, die beides in sich vereinen (**bidirektionale Schnittstellen**).¹³⁵ Schließlich können die entsprechenden Schnittstellen invasiv, also chirurgisch in den Körper implantiert sein, oder nicht invasiv, d. h. extern am Körper appliziert sein. Nicht invasive Schnittstellen weisen in der Regel eine geringere Genauigkeit der Datenübertragung als invasive auf. Daher finden nicht invasive Anwendungen derzeit überwiegend noch in Zusammenhang mit einem Computer statt, der dann einfache Befehle ausführen kann, und weniger mit komplexeren Maschinen. Für das Ausführen aufwendigerer Datenübertragungen (z. B. Drohnen, Exoskelette, Prothesen) werden hingegen eher ableitende invasive Verfahren eingesetzt. Dabei handelt es sich um **Implantate**, die im peripheren Nervensystem oder im Motorkortex angesiedelt sind.¹³⁶

¹³⁴ Basis der Einschätzung neben der eigenen Beurteilung: Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten und Ergebnisse der Delphi-Befragung.

¹³⁵ Vgl. Kehl, C. (2016), S. 11.

¹³⁶ Vgl. Kehl (2016), S. 11 ff.

Technologien

Transkranielle Magnet- und Gleichstromstimulation (stimulierend und nicht invasiv): ¹³⁷

Im Zuge dieser Technologie wird eine Person entweder mittels einer Spule, eines Magnetfelds oder zweier Kontakte auf der Kopfhaut einem schwachen Stromfluss ausgesetzt. Einzelne Muskeln, Nerven oder Gehirnbereiche können so per Magnet- oder Elektrostimulation gezielt angesprochen werden.

Tiefe Hirnstimulation (stimulierend und invasiv):

Bei der tiefen Hirnstimulation werden einer Person eine Elektrode und ein elektronischer Impulsgeber (Hirnschrittmacher) im Gehirn implantiert. Bei Bedarf leitet dieser Hirnschrittmacher elektrische Impulse in den Teil des Gehirns, an dem die Elektrode eingesetzt ist. Auf diese Weise können motorische Störungen, wie etwa bei der Parkinson-Krankheit, behandelt werden.¹³⁸

Elektroenzephalografie (EEG) (ableitend und nicht invasiv):

Hierbei erfolgt die Erfassung neurologischer Gehirnaktivitäten über die Kopfoberfläche. Diese werden in maschinell nutzbare Impulse umgewandelt. Die Informationen gehen in der Regel an eine Maschine, daher werden solche Anwendungen auch **Gehirn-Maschine-Schnittstelle** genannt (Brain-Machine-Interfaces, BMIs).

Bidirektionale Schnittstellen:

Dazu zählen z. B. intelligente Implantate (beispielsweise **Elektrozeutika**¹³⁹), die Hirnsignale autonom überwachen und nur beim Auftreten von Auffälligkeiten stimulatorisch aktiv werden, oder **fühlende Prothesen** (siehe Abschnitt „Exoskelette und (Neuro-)Prothesen“), die eine sensorische Rückmeldung geben und damit Bewegungen ermöglichen, zu fassen.¹⁴⁰ In ihrem Anwendungsgebiet ähneln Elektrozeutika der tiefen Hirnstimulation. Durch die gezielte Stimulation von Nerven könnten Elektrozeutika zur Behandlung von chronischen Erkrankungen wie Parkinson und Diabetes eingesetzt werden.¹⁴¹

Weitere Gehirnschnittstellen:

Neben dem Versuch, das (menschliche) Gehirn mit einer Maschine zu verknüpfen, gibt es zudem auch Bestrebungen einer Verknüpfung des Gehirns mit einem anderen Gehirn (**Brain-to-Brain-Schnittstelle** [BTBs])¹⁴² oder mit der Cloud (**Brain-Cloud-Schnittstelle** [BCIs]). In beiden Fällen gibt es hier sowohl invasive als auch nicht invasive Ansätze. Ray Kurzweil geht bei den BCIs sogar davon aus, dass hierfür Nanobots (siehe auch Abschnitt „Smarte medizinische Technologien“ und Abschnitt „Micro- und Nanobots aus leuchtenden Materialien“) eingesetzt werden könnten, die den menschlichen Neokortex mit einem synthetischen Neokortex in der Cloud verbinden.¹⁴³

Whole-Brain-/Mind-Emulation

Auf Basis hypothetischer Konzepte wird daran geforscht, mithilfe von Gehirn-Cloud-Schnittstellen einen Scan des Gehirns durchzuführen und basierend auf diesem ein detailgetreues Softwaremodell des Gehirns zu konstruieren.

¹³⁷ Vgl. Paulus, W. (2009).

¹³⁸ Vgl. Kehl, C.; Coenen, C. (2016), S. 11.

¹³⁹ Obgleich hier die Gehirnstimulation im Fokus steht, könnten Elektrozeutika auch an Nerven außerhalb des Gehirns eingesetzt werden.

¹⁴⁰ Vgl. Kehl, C.; Coenen, C. (2016).

¹⁴¹ Vgl. Fraunhofer IZM (2020).

¹⁴² Vgl. TEDx Talks (2015) und Jiang, L. et al. (2019).

¹⁴³ Vgl. TED (2014) und Martins, N. R. B. et al. (2019).

Stand der Forschung

Verschiedene nicht invasive Stimulationsverfahren wie etwa die **transkranielle Magnet- und Gleichstromstimulation** sind in der Medizin bereits recht etabliert, z. B. zur Behandlung neurologischer Krankheiten (u. a. von Parkinson, Multipler Sklerose oder Schlaganfällen). Zudem wird intensiv an der Behandlung von psychischen Krankheiten wie Depressionen oder dem Tourettesyndrom geforscht.¹⁴⁴

Die Patentaktivitäten zur **transkraniellen Magnet- und Gleichstromstimulation** verliefen lange relativ stabil auf einem Niveau und sind im Jahr 2019 sprunghaft angestiegen. Die Anmeldereinrichtungen stammen vor allem aus Israel und den USA. Das dominierende Thema unter den Patenten ist die Magnetotherapie, welche insbesondere zur Behandlung von Schmerzen und Geweberegeneration eingesetzt wird.¹⁴⁵ Auch mit Blick auf die Publikationen zeigt sich ein kontinuierliches und bedeutendes Wachstum des Themas, das sich vor allem anhand gestiegener Publikationszahlen aus den USA und China erklärt. Deutschland ist jedoch nach den beiden größten Forschungsländern USA und China das Land mit der drittgrößten Publikationsintensität. Dies zeigt sich auch in der kontinuierlich großen Bedeutung Deutschlands bei der Zitationshäufigkeit.¹⁴⁶ Eine umfassende Marktreife im Jahr 2030 halten Expertinnen und Experten für wahrscheinlich¹⁴⁷ – insbesondere da es sich wegen der externen Anwendung um eine Technologie mit überschaubaren Risiken handelt, wenngleich die beobachteten Effekte bislang unspezifisch und von kurzer Dauer sind.¹⁴⁸

Ableitende Schnittstellen befinden sich heutzutage ebenfalls bereits im Einsatz und weisen eine große Bandbreite von Anwendungsbereichen auf. Nicht invasive Schnittstellen sind dabei bereits etablierter. Invasive Schnittstellen hingegen befinden sich zwar in Form erster Anwendungen bereits im Einsatz, bedürfen jedoch grundsätzlich eines noch höheren Grads der Erforschung. Entsprechend erwarten die Expertinnen und Experten überwiegend eine Marktreife im Jahr 2030 für die nicht invasiven Schnittstellen, jedoch nicht für die invasiven.¹⁴⁹ Ein wesentlicher Vorteil der invasiven Gehirnschnittstellen gegenüber den nicht invasiven ist die Geschwindigkeit und hohe Qualität der erreichten Datenübertragung. Diese gehen jedoch durch den benötigten chirurgischen Eingriff mit einem höheren Risiko, z. B. Infektionsgefahr und Abstoßungsreaktionen, einher. Entwicklungsmöglichkeiten hängen somit stark von dem Risikograd der invasiven Eingriffe zur Implantation der Gehirnschnittstellen ab. Gleichwohl sehen Expertinnen und Experten zunehmend Fortschritte mit Blick auf die Datengenauigkeit und -geschwindigkeit von nicht invasiven Schnittstellen.¹⁵⁰ Durch die Integration in den menschlichen Körper weisen invasive Gehirnschnittstellen ein hohes Entgrenzungspotenzial auf, während sich die Expertinnen und Experten bei den nicht invasiven Technologien uneinig sind.¹⁵¹ Mit Blick auf Patentanmeldungen haben ableitende Schnittstellen insbesondere ab 2015 an Fahrt aufgenommen. Die Länder, in denen mit Abstand am meisten Patente in diesen Bereichen angemeldet wurden, waren die USA und Südkorea. Viele anmeldende Einrichtungen hingegen stammen dabei aus China.¹⁵² Mit großem Abstand kommen die meisten Veröffentlichungen aus den zwei IPC-Hauptgruppen G06F3 und A61B5. Erstgenannte subsumiert Patente aus dem Bereich elektrische und digitale Datenverarbeitung, insbesondere zu Eingabe- und Ausgabevorkehrungen zur Übertragung von Daten zum Computer oder zur Ausgabeeinheit. Letztgenannte Hauptgruppe subsumiert Patente aus dem Bereich

Expertinnen- und Experteninterview 10

„Aktuell erreicht man eine hohe Genauigkeit nur durch invasive Technologien oder durch Elektroden mit Gel. Aber auch die nicht invasiven Anwendungen werden immer besser und könnten bald dieselben Ergebnisse erreichen wie invasive Schnittstellen.“

¹⁴⁴ Vgl. Perlmutter, J. S.; Mink, J. W. (2006).

¹⁴⁵ Ergebnisse der Patentanalyse.

¹⁴⁶ Ergebnisse der Publikationsanalyse.

¹⁴⁷ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

¹⁴⁸ Vgl. Kehl, C.; Coenen, C. (2016). S. 63 ff.

¹⁴⁹ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

¹⁵⁰ Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten.

¹⁵¹ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

¹⁵² Die Diskrepanz ergibt sich aus einer mangelnden Datenübertragung an die Patentplattform.

Diagnose, Chirurgie und Identifikation.¹⁵³ Auch die Forschung zeigt einen deutlichen Zuwachs an Publikationsintensität, bei dem sich China nach einem engen Kopf-an-Kopf-Rennen an die Spitze der Publikationsherkunftsländer gesetzt hat. Deutschland spielte über viele Jahre eine bedeutende Rolle in der Forschung zu Gehirnschnittstellen, konnte mit der US-amerikanischen und chinesischen Publikationsdynamik der letzten Jahre jedoch nicht mithalten.¹⁵⁴

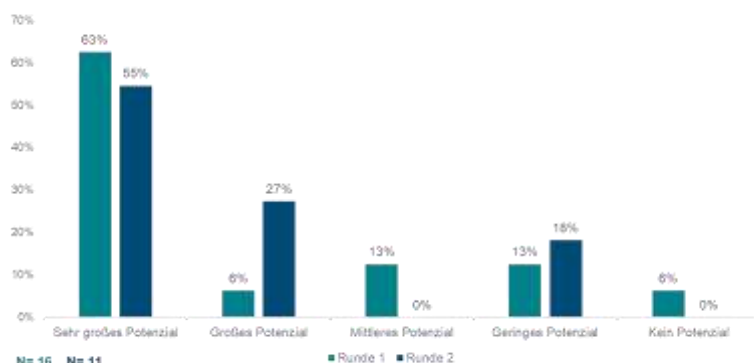
Bereits heute können **ableitende invasive und nicht invasive Schnittstellen** teilweise als Kommunikationsmittel eingesetzt werden, z. B. bei gelähmten Personen oder Locked-in-Syndrom-Patientinnen und -Patienten, die mithilfe der Schnittstellen und eines Computers (BMIs) durch willkürliche Anstrengung des Gehirns (Gedankenkraft) kurze Sätze schreiben oder im Internet surfen können.¹⁵⁵ Vielfach befinden sich diese Schnittstellen jedoch noch in der Erforschung.

Mögliche Entwicklungen in der Zukunft

Invasive Stimulationsverfahren könnten ein zukünftiges Entgrenzungspotenzial durch Nebenwirkungen, die teilweise auch persönlichkeitsändernde Effekte beinhalten, entfalten. Auf diese Weise könnten die Technologien beispielsweise künftig zur Beeinflussung des Charakters und der Gefühlslage eingesetzt werden.¹⁵⁶ Auch leistungssteigernde Anwendungspotenziale, wie etwa erhöhte Konzentrationsfähigkeit („Botox of the Brain“¹⁵⁷), könnten sich ergeben.¹⁵⁸

Für **ableitende invasive und nicht invasive Schnittstellen werden** zukünftige Anwendungsbereiche in der Steuerung von Geräten wie Exoskeletten oder sogar Drohnen gesehen.¹⁵⁹ Auch in der Prävention könnten insbesondere invasive Gehirnschnittstellen künftig große Wirkungen haben, z. B. in der Früherkennung von Krankheiten. Informationen über das Konzentrations- und Stresslevel der Nutzerin oder des Nutzers könnten z. B. im Arbeitskontext dazu beitragen, der Person unter Einbezug eines IT-Systems automatisch Pausen vorzuschlagen.¹⁶⁰ Damit könnte nicht nur das Wohlbefinden der Person gesteigert werden, sondern u. a.

Welches Potenzial haben invasive Gehirnschnittstellen, zur Entgrenzung der Biologie/des Menschen beizutragen?



Quelle: Eigene Darstellung Prognos AG und Z_punkt auf Basis der Delphi-Befragung 2020.

auch die menschliche Produktivität dank der Ruhephasen.¹⁶¹ Wäre es dem Computer oder anderen Geräten zukünftig möglich, Gefühlslagen zu erkennen, könnten sie eine entsprechende Warnung aussprechen, z. B. bestimmte Entscheidungen in diesem Moment nicht zu fällen.¹⁶² Denkbar wäre dann, z. B. bei der Erkennung gefährlicher Situationen, ggf. auch eine Art (Früh-)Warnsystem oder die Anwendung im militärischen

Bereich in Form von BMIs mit strategisch relevanten Informationen, die direkt abgerufen werden können.¹⁶³ Weitere Zukunftsvisionen beschreiben u. a. das Erkennen der Gedanken mittels ableitender Schnittstellen

¹⁵³ Ergebnisse der Patentanalyse.

¹⁵⁴ Ergebnisse der Publikationsanalyse.

¹⁵⁵ Vgl. Lenzen, M. (2016).

¹⁵⁶ Vgl. Pham, U. et al. (2015) und Coenen, C. et al. (2009), S. 11.

¹⁵⁷ Vgl. Coenen et al. (2009), S. 30.

¹⁵⁸ Vgl. Coenen et al. (2009), S. 11.

¹⁵⁹ Vgl. Collinger, J. L. et al. (2013).

¹⁶⁰ Ergebnisse des Futures-Wheel-Workshops.

¹⁶¹ Vgl. Cabahug, M. (2018).

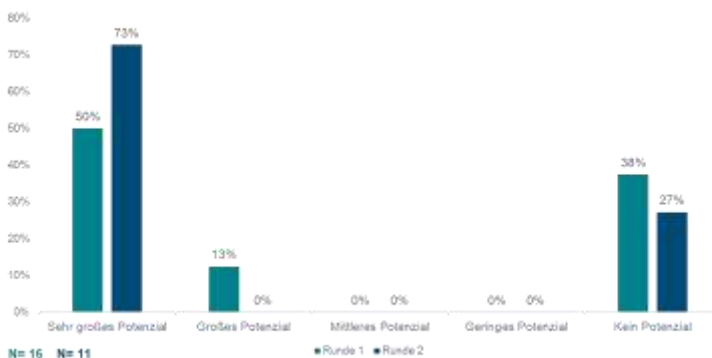
¹⁶² Vgl. Lenzen, M. (2016).

¹⁶³ Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten.

bei bestimmten Tätigkeiten, z. B. beim Einkauf. Interessant würden Schnittstellen dann auch für das Marketing zur Beeinflussung von Kaufentscheidungen.¹⁶⁴ Die Verknüpfung von **zwei Gehirnen (BBI)** könnte schließlich dazu führen, dass Gedanken und sogar Befehle auf ein anderes menschliches oder (wie bereits geschehen) tierisches Gehirn (sogenannte Hybros) übertragen werden.¹⁶⁵ Der Einsatz gedankengesteuerter Tiere könnte zukünftig u. a. bei Rettungseinsätzen erfolgen.¹⁶⁶ Zukünftig denkbar wäre zudem auch eine Verknüpfung des **Gehirns mit dem Internet oder der Cloud (BCI)**, wodurch der Download von Wissen und der Upload von Gedanken ermöglicht werden könnten (siehe auch unten: Mind-Uploading). Denken könnte so zu einer Mischform von (nicht-) biologischem Denken werden. Der nicht biologische Teil könnte zudem mit dem Ausweiten der Informationen im Netz unaufhörlich anwachsen. Denkbar wäre dann auch das unaufhörliche Speichern von Erinnerungen. Die Erweiterung des Neokortex wäre keiner räumlichen Begrenzung durch den Kopf mehr unterlegen. Dies könnte zukünftig zudem weitreichende Auswirkungen auf Innovationen in Kultur und Technologie haben.¹⁶⁷ Einen Einfluss auf die zukünftige Entwicklung von Schnittstellen könnten zudem auch Weiterentwicklungen im Bereich der künstlichen Intelligenz haben. Beispielsweise könnten KI-Systeme zukünftig genutzt werden, um Tierversuche, die für die Weiterentwicklung der Schnittstellen derzeit noch sehr wichtig sind, durch virtuelle Simulationen und Berechnungen zu ersetzen.¹⁶⁸

Ähnlich der Idee, das Gehirn mit der Cloud zu verbinden, ist jene des **Mind-Uploadings**. Die Forschung dazu befindet sich bislang aber noch in den Anfängen.¹⁶⁹ Im Fokus steht die Vorstellung, dass sich die Gehirn-Scans genau wie das Original-Gehirn verhalten könnten. Somit könnte zukünftig ein Mensch beziehungsweise sein Geist unsterblich gemacht werden.¹⁷⁰ Demnach wird angenommen, dass durch Mind-Uploading im Sinne der Transhumanisten eine ewige Existenz des individuellen Geistes und die Überwindung menschlicher Körperlichkeit erreicht werden könnten. Durch diese Digitalisierung eines Menschen ergibt sich ein hohes Entgrenzungspotenzial, bei der die Grenze zwischen realer und digitaler Welt verschwinden würde.¹⁷¹ Einer Entwicklung und Anwendung dieser Technologie stehen aktuell noch wesentliche Herausforderungen im Wege.¹⁷²

Welches Potenzial haben Mind Uploading zur Entgrenzung der Biologie/des Menschen beizutragen?



Quelle: Eigene Darstellung PrognosAG und Z_punkt auf Basis der Delphi-Befragung 2020.

Zum einen müssen die richtigen technischen Voraussetzungen geschaffen werden. Zur Durchführung dieses Prozesses wird eine Scanning-Technologie benötigt, um alle wichtigen Informationen im Gehirn zu erkennen und zu extrahieren. Zudem bedarf es eines leistungsfähigen Computers, der als neue Grundlage für den Geist dienen könnte. Darüber hinaus ist ein vertieftes Verständnis der Funktionsweise des Gehirns und des Bewusstseins erforderlich, um Aussagen zur Detailgenauigkeit des Scans treffen zu können. Eine Initiative, die sich mit diesen Herausforderungen auseinandersetzt, ist das Human Brain Project der Europäischen Kommission.¹⁷³ Ziel dieses Projekts ist es, sämtliche verfügbare Informationen über das Gehirn zu sammeln und zu versuchen, das Gehirn mittels Computer- und Softwaremodellen zu replizieren. Ein weiterer Entwicklungspfad der Whole-Brain-/Mind-Emulation könnte sich

¹⁶⁴ Vgl. Hartlmaier, B. (2018) und Lenzen, M. (2016).

¹⁶⁵ Vgl. Zhang et al. (2019).

¹⁶⁶ Vgl. Benedikter, R. (2019), S. 3.

¹⁶⁷ Vgl. TED (2014).

¹⁶⁸ Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten.

¹⁶⁹ Siehe auch Ergebnisse der Delphi-Befragung.

¹⁷⁰ Vgl. Sandberg, A.; Bostrom, N. (2008) und Ergebnisse des Futures-Wheel-Workshops.

¹⁷¹ Ergebnisse des Futures-Wheel-Workshops und Ergebnisse der Delphi-Befragung.

¹⁷² Vgl. Mathwig, K. (o. D.).

¹⁷³ Siehe Human Brain Project (o. D.).

aber zunächst auch durch die Replikation von Personen mittels künstlicher Intelligenz und maschinellen Lernens ergeben.¹⁷⁴ Mittels dieser Technologien könnte eine Maschine, die mit Informationen über eine Person gespeist wurde, mit anderen Personen interagieren. Durch die an die Maschine übermittelten Informationen könnte diese die Sprache der Person übernehmen; dabei könnte diese Interaktion wie mit einem Chatbot oder auch über einen Avatar erfolgen.

Zukünftiges Entgrenzungspotenzial der Technologien¹⁷⁵

Schwachestes zukünftiges Entgrenzungspotenzial				
	Etablierung	Eingriffsstärke	Wirkungsstärke	Autonomie
Transkranielle Magnet- und Gleichstromstimulation	etabliert (TR9)	nicht invasiv	mittel (reversibel und kurzfristig)	teilweise automatisiert
Tiefe Hirnstimulation (Hirnschrittmacher)	teilweise etabliert (TR9)	invasiv	hoch (aufwendige Reversibilität und langfristig)	automatisiert
Elektroenzephalografie (EEG)	teilweise etabliert (TR9)	nicht invasiv	mittel (reversibel und kurzfristig)	automatisiert
Starkes zukünftiges Entgrenzungspotenzial				
Elektrozeutika	nicht etabliert (TR6)	invasiv	hoch (aufwendige Reversibilität und langfristig)	voll automatisiert
Invasive ableitende Schnittstelle, insbesondere BMIs	nicht etabliert (TR6)	invasiv	hoch (aufwendige Reversibilität und langfristig)	automatisiert
Gehirn-zu-Gehirn-Schnittstelle	nicht etabliert (TR1)	nicht invasiv oder invasiv	mittel (reversibel & kurzfristig) oder hoch (aufwendige Reversibilität und langfristig)	automatisiert bis voll automatisiert
Gehirn-Cloud-Schnittstellen	nicht etabliert (TR1)	nicht invasiv oder invasiv	mittel (reversibel & kurzfristig) oder hoch (aufwendige Reversibilität und langfristig)	voll automatisiert bis (teil-)autonom
Whole-Brain-Emulation/Mind-Uploading	nicht etabliert (TR1)	nicht invasiv	hoch (unklare Reversibilität und langfristig)	voll automatisiert bis (teil-)autonom

¹⁷⁴ Vgl. Savin-Baden, M.; Burden, D. (2019) und SWR (2020).

¹⁷⁵ Basis der Einschätzung neben der eigenen Beurteilung: Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten sowie Ergebnisse der Delphi-Befragung.

(Flüssige) Organe auf Basis synthetischer Biologie



(Flüssige) Organe auf Basis synthetischer Biologie

Beschreibung

Mit synthetischer Biologie werden biologische Systeme wie künstliche Organe im Labor entworfen und hergestellt. Dies umfasst sowohl die Herstellung von künstlichem Blut als auch Organe aus festem Gewebe.

Technologien

Künstliches Blut:

Künstliches Blut bezeichnet Blutersatzstoffe, welche die Funktionen und Aufgaben von körpereigenem Blut übernehmen können. Diese Blutersatzstoffe können nach bisherigem Entwicklungsstand entweder auf Hämoglobin (menschlicher, tierischer oder biotechnologischer Herkunft) oder synthetisch hergestellten Sauerstoffträgern wie Perfluorcarbonen basieren.¹⁷⁶

Künstliche Organe aus festem Gewebe:

Diese Organe werden aus synthetischem Gewebe erzeugt, das durch zwei verschiedene Verfahren gefertigt werden kann. Zum einen kann die Fertigung künstlicher Organe mittels Tissue-Engineering, also der gezielten Züchtung von menschlichen oder tierischen Zellen, erfolgen. Zum anderen besteht die Möglichkeit, diese per Bioprinting – einem 3-D-Druck-Verfahren, welches lebendige Organismen als „Biotinte“ verwendet – zu erzeugen (siehe auch Abschnitt „Biologisierte Technologie als Produktionsmittel“).¹⁷⁷

Stand der Forschung

Weltweit stellt die mangelnde Verfügbarkeit von Spenderblut und Spenderorganen die Medizin vor große Probleme.¹⁷⁸ Künstliche Organe könnten als Ersatz für Letztere zukünftig eine Lösung sein. Der Einsatz von **künstlichem Blut** erfolgt teilweise bereits heute in der Notfallmedizin.¹⁷⁹ Bislang kann es jedoch nur für akute Fälle eingesetzt werden, da es innerhalb von 48 Stunden zunehmend die Transportkapazität für Sauerstoff verliert.¹⁸⁰ Auch im Sport ist künstliches Blut für die Leistungssteigerung zum Teil bereits verbreitet.¹⁸¹ Die Veröffentlichungsaktivität in diesem Forschungsfeld zeigt sich recht volatil, sodass in einzelnen Jahren (2016) auch Rückgänge zu verzeichnen sind. In der Zahl und Bedeutung der Veröffentlichungen liegen die USA, China, Japan und Deutschland nah beieinander. Auch die Patentaktivitäten weisen eine gewisse Volatilität auf: Ist bis 2016 noch ein kontinuierliches Wachstum der Anmeldungen zu erkennen, kam es in den folgenden zwei Jahren zu einem geringen Rückgang, während im Jahr 2019 wieder das Niveau von 2016 erreicht wurde. Mit Abstand die meisten Patentveröffentlichungen kommen aus der IPC-Klasse A61, also Medizin und Veterinärwissenschaft sowie Hygiene. Der Großteil der Patente wird in Japan angemeldet, gefolgt von den USA, Südkorea und Deutschland.¹⁸² Eine Marktreife der Technologien für künstliches Blut im Jahr 2030 hält ein Viertel der Expertinnen und Experten für eher wahrscheinlich, u. a. für akute Fälle, wenn Engpässe bei menschlichem Spenderblut vorliegen. Ein Drittel der Expertinnen und Experten hält dies jedoch für eher unwahrscheinlich, u. a. da das natürliche Blut noch weitaus komplexere Funktionen innehat als nur den Sauerstofftransport, der über das künstliche Blut replizierbar wäre.¹⁸³

¹⁷⁶ Vgl. Sarkar, S. (2008). Siehe etwa Entwicklungen von Alliance Pharmaceutical Corp.

¹⁷⁷ Vgl. MDR Wissen (2015); Graf, P. & Wirsching, S. (2013) und Pooler, M. (2019) sowie Bio-Printer von deutschen Unternehmen wie EnvisionTEC GmbH oder BioFluidix GmbH.

¹⁷⁸ Vgl. WHO (2020) und WHO (o. D).

¹⁷⁹ Vgl. Jelkmann, W. (2016) und Ergebnisse der Delphi-Befragung.

¹⁸⁰ Vgl. scinexx (2005).

¹⁸¹ Vgl. Jelkmann, W. (2016) und Ergebnisse der Delphi-Befragung.

¹⁸² Ergebnisse der Patentanalyse.

¹⁸³ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

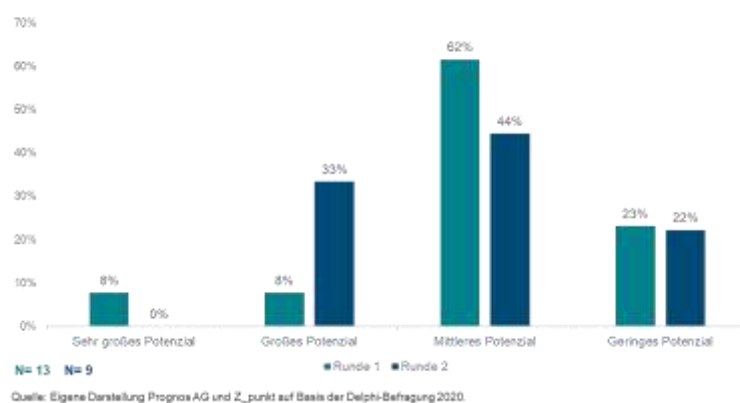
Vom Einsatz **künstlicher Organe** aus festem Gewebe ist man aktuell weit entfernt, da die Blutversorgung in den komplex aufgebauten synthetischen Organen ein bislang ungelöstes Problem darstellt. Die Publikationen zur Forschung an künstlichen Organen aus festem Gewebe befinden sich in den vergangenen Jahren auf einem nahezu stabilen sowie mittleren Niveau. Dabei konnte die Forschung aus China an relativer Bedeutung gewinnen, während Japans Bedeutung in diesem Forschungsfeld schrumpfte. Gleichwohl ist die Zahl an Forschungspublikationen aus dem japanischen Raum immer noch bedeutend.¹⁸⁴ Die Zahl der Patentanmeldungen hingegen hat sich seit 2012 recht dynamisch entwickelt. Die meisten Anmeldungen erfolgen in den USA, gefolgt von Deutschland und Frankreich. Die Anmelderinnen und Anmelder der Patente hingegen stammen überwiegend aus asiatischen Ländern, aber z. B. auch aus Frankreich.¹⁸⁵

Mögliche Entwicklungen in der Zukunft

Zukünftige Anwendungsgebiete für **künstliches Blut** werden einerseits in einer Erhöhung der Verfügbarkeit gesehen, andererseits auch darin, die Risiken einer Bluttransfusion zu minimieren.¹⁸⁶ Bei der Transfusion von künstlichem Blut spielen die unterschiedlichen Blutgruppen und Risiken durch die Verbreitung von Krankheiten keine Rolle mehr. Ein

gewisses Entgrenzungspotenzial – was von den Expertinnen und Experten jedoch eher im mittleren Bereich eingestuft wird – könnte künstliches Blut zukünftig vor allem dann entwickeln, wenn beispielsweise mittels weiterer biotechnologischer Bearbeitung dieser Blutersatzstoffe auch eine Leistungssteigerung (etwa durch Erhöhung der Sauerstoffaufnahme-fähigkeit des Hämoglobins) erreicht werden kann. Möglich wäre dann auch die Anpassung des menschlichen Körpers an bislang ungewohnte oder unnatürliche Umwelten, z. B. den Weltraum oder das Tiefseetauchen. Eingesetzt werden könnte künstliches Blut zukünftig aber auch in Kriegs- und Krisengebieten sowohl für militärische Zwecke als auch für die Zivilgesellschaft, um z. B. verletzte Personen kurzzeitig zu versorgen.¹⁸⁷

Welches Potenzial hat künstliches Blut, zur Entgrenzung der Biologie/des Menschen beizutragen?



Wenngleich die Motivation zur Entwicklung **künstlicher Organe** überwiegend medizinischer Natur ist, nämlich zum Austausch versehrter Organe, könnte der Einsatz dieser Technologie auch die Verbesserung der menschlichen Fähigkeiten nach sich ziehen: z. B. durch die Verlängerung der menschlichen Lebenszeit. Ein potenzieller Einsatz künstlicher Organe könnte zukünftig u. a. dazu führen, dass mehr Menschenleben gerettet werden, da sich das Warten auf ein Spenderorgan und die Zeit bis zur Aufnahme einer lebensrettenden Behandlung verkürzen würden. Ein weiteres Anwendungsfeld bietet sich für künstliche Organe als Ersatz für die Durchführung von Tierversuchen.¹⁸⁸

¹⁸⁴ Ergebnisse der Publikationsanalyse.

¹⁸⁵ Ergebnisse der Patentanalyse.

¹⁸⁶ Vgl. Chang, T. M. S. (1997) und Heise, G.; Starkey, L. (2014).

¹⁸⁷ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

¹⁸⁸ Vgl. Wenzel, S.; Schwarz, T. (2020).

Zukünftiges Entgrenzungspotenzial der Technologien¹⁸⁹

Starkes zukünftiges Entgrenzungspotenzial

	Etablierung	Eingriffsstärke	Wirkungsstärke	Autonomie
Künstliches Blut	teilweise etabliert (TR8)	invasiv	hoch (unklare Reversibilität und langfristig)	automatisiert
Künstliche Organe	nicht etabliert (TR1)	invasiv	hoch (aufwendige Reversibilität und langfristig)	automatisiert

Smarte medizinische Technologien



Smarte medizinische Technologien

Beschreibung

Unter smarten medizinischen Technologien werden Medikamente oder andere Technologien gefasst, die eingesetzt werden, um Wirkstoffe gezielt im Körper abzusetzen oder um die Medikation und Einnahme zu überprüfen.

Technologien

Intelligente Medikamente:

Dabei handelt es sich z. B. um Medikamente in Form einer Tablette, die mit Sensoren oder sonstigen Technologien ausgestattet und verbunden sind. In ihrer Anwendung können diese intelligenten Medikamente in drei Unterkategorien klassifiziert werden. **Datenübertragende intelligente Medikamente** können über die Sensoren aus dem Körper heraus Informationen (etwa über die Einnahme eines Medikaments) an einen Computer oder eine App übermitteln.¹⁹⁰ **Teilautomatisierte intelligente Medikamente**, beispielsweise in Form von im Körper integrierten bioelektronischen Trägern, tragen dazu bei, Wirkstoffe herzustellen oder freizusetzen. Diese Wirkstoffe könnten Bakterien und die Ursachen von Reisedurchfall oder auch Jetlag bekämpfen.¹⁹¹ Im Unterschied zu den teilautomatisierten intelligenten Medikamenten, welche eine Bedienung durch die Trägerin oder den Träger erfordern, agieren die **voll automatisierten intelligenten Medikamente** eigenständig. Damit besteht die Möglichkeit, die Freigabe von Wirkstoffen automatisch zu regulieren, z. B. wenn bestimmte Körperfunktionswerte über- oder unterschritten werden.

Nano- bzw. Microbots:¹⁹²

Dies sind winzige Maschinen auf Molekularebene aus Metall oder Kohlenstoff, die im Menschen voll automatisiert körperliche Funktionen überwachen und bei Bedarf Maßnahmen, wie etwa die Zerstörung schädlicher Zellen, durchführen können.¹⁹³ In ihrer Größe sind diese Nano-Roboter vergleichbar mit Bakterien oder roten Blutkörperchen und könnten für den gezielten Transport von Wirkstoffen oder andere Arbeiten eingesetzt werden. Im Gegensatz zu den hier betrachteten Nano- bzw. Microbots

¹⁸⁹ Basis der Einschätzung neben der eigenen Beurteilung: Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten und Ergebnisse der Delphi-Befragung.

¹⁹⁰ Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten und Deutsche Apothekerzeitung (2017). Vgl. auch Entwicklungen des Medizintechnikunternehmens Medtronic plc.

¹⁹¹ Vgl. Sheehan, P. (o. D.).

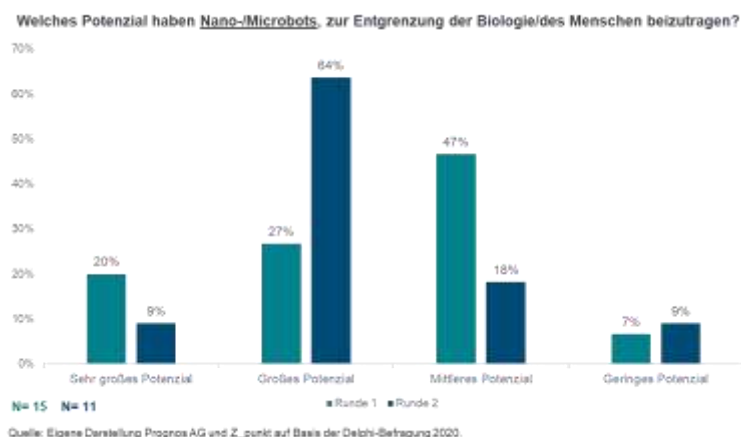
¹⁹² Vgl. Gutierrez, B.; Bermúdez, C. V.; Ureña, Y. R. C. (2017). Vgl. auch Entwicklungen von Unternehmen wie Bionaut Labs oder CyCa OncoSolutions.

¹⁹³ Vgl. von der Weiden, S. (2017) und Mielke, J. (2016).

aus Metall oder Kohlenstoff existieren auch solche, die sich aus lebendigen Materialien zusammensetzen. Diese werden im Abschnitt „Micro- und Nanobots aus lebendigen Materialien“ tiefergehend behandelt.

Stand der Forschung

Intelligente Medikamente werden bereits heute bei Patientinnen und Patienten mit Schizophrenie und bipolarer Erkrankung eingesetzt. Auf diese Weise kann die Patientin bzw. der Patient selbst, aber auch ärztliches Personal oder Familienangehörige verfolgen, ob und wann das Medikament genommen wurde. Bereits für Forschungszwecke zugelassen sind zudem elektronische Pillen, die über einen Säuresensor mitteilen, wo sie sich im Körper befinden. Die Pillen können im Vorfeld so programmiert werden, dass sie an einer bestimmten Stelle Wirkstoffe freisetzen. Bei der Medikamenten- und Wirkstoffforschung können so z. B. Daten generiert werden, die den Forschenden genau verraten, an welcher Stelle Wirkstoffe ins Blut gelangen. Die Patentanmeldungen im Bereich der intelligenten Medikamente hat in den vergangenen Jahren einen dynamischen Zuwachs erfahren – insbesondere in den USA und in Deutschland. Die meisten Veröffentlichungen kommen aus der IPC-Hauptgruppe A61M5, in welcher Patente mit Bezug zu Vorrichtungen zum Einbringen von Medien und Technologien in den Körper auf subkutanem, intravaskulärem oder intramuskulärem Wege gesammelt werden. Mit großem Abstand ist der Pharmakonzern Sanofi-Aventis Deutschland, der u. a. auf moderne und innovative Arzneimittel und Medikamente spezialisiert ist, stärkster Anmelder.¹⁹⁴ Im Bereich der Forschungspublikationen ist ebenfalls ein starker Zuwachs der Intensität, insbesondere seit 2017, festzustellen (Wachstum um 600 Prozent von 2010 bis 2019). Dabei ist die Bedeutung Deutschlands nicht so hervorstechend wie bei den Patentaktivitäten. Die Bedeutsamkeit der deutschen Forschung zeigt sich vor allem an der Zahl der Zitationen, bei der Deutschland den vierten Platz nach den publikationsstärkeren Ländern USA, China und Indien einnimmt.¹⁹⁵



Nano- und Microbots befinden sich zwar noch am Anfang ihres Entwicklungsstadiums, gleichwohl ist in den vergangenen Jahren eine zunehmende Dynamik in den Patentanmeldungen zu verzeichnen. Die häufigsten Anmeldungen erfolgen in Südkorea, die Anmelderinnen und Anmelder wiederum stammen überwiegend aus China und Südkorea.¹⁹⁶ Auch im Bereich der Forschung zeigt sich ein kräftiges Wachstum der Publikations-

zahlen seit 2016. Neben den USA und China sind vor allem Japan und Südkorea Länder mit einer hohen Forschungsintensität zu Nano- und Microbots. Deutschland zeichnet sich dabei durch eine niedrigere Publikationszahl mit einer großen Reichweite seiner Forschung aus. So nimmt Deutschland trotz vergleichsweise geringer Publikationszahlen den dritten Platz bei der Zahl der Zitationen ein. Gut die Hälfte der Expertinnen und Experten schätzt zwar die Marktreife von Nano- und Microbots bis 2030 als gegeben ein, aber auch gut ein Drittel sieht dies eher nicht.

¹⁹⁴ Ergebnisse der Patentanalyse.

¹⁹⁵ Ergebnisse der Publikationsanalyse.

¹⁹⁶ Ergebnisse der Patentanalyse.

Mögliche Entwicklungen in der Zukunft

Zukünftig könnten **intelligente Medikamente** auch in der individualisierten Medizin zum Einsatz kommen – beispielsweise bei Erkrankungen wie chronischen Darmentzündungen, bei denen Patientinnen und Patienten individuelle Krankheitsverläufe zeigen. Ort und Dosierung eines Wirkstoffs könnten mithilfe der intelligenten Medikamente individuell angepasst werden und dadurch effektiver wirken. Diese zielgerichtetere Behandlung könnte eine schonendere und niedrigere Dosierung ermöglichen und so weniger Nebenwirkungen hervorrufen.¹⁹⁷ Denkbar wäre zudem, dass die intelligente Pille ärztliche Dienstleistungen bis zu einem gewissen Grad ersetzt, aber gleichzeitig auch z. B. zu einer besseren Versorgung in ländlichen Gebieten mit einer geringen Versorgungsstruktur führt oder beispielsweise älteren immobileren Personen den Weg zur Ärztin bzw. zum Arzt zeitweise erspart.¹⁹⁸ Zwar ist der Einsatz der intelligenten Medikamente zur Bekämpfung von Krankheiten überwiegend medizinisch motiviert. Allerdings ist die Grenze zum nicht therapeutischen Enhancement schnell überschritten. Zukünftig könnte die Technologie auch eingesetzt werden, um sich an eine neue Umgebung anzupassen. Denkbar ist der Einsatz im militärischen Bereich, um Soldatinnen und Soldaten z. B. in anderen Zeitzonen oder extremen Klimazonen widerstandsfähiger zu machen. Auch im Katastrophenschutz oder bei Forschungsteams, die in abgelegenen Orten unterwegs sind, könnten die teil- und voll automatisierten intelligenten Medikamente Anwendung finden. Möglich wäre auch, dass sich smarte Medikamente in der Reisebranche etablieren, sofern eine günstige Kostenstruktur gefunden wird.

Nano- und Microbots werden ebenfalls für den gezielten Transport von Wirkstoffen in gewünschte Körperareale eingesetzt. Darüber hinaus könnten sie in Zukunft jedoch auch verwendet werden, um im Blut ungewünschte Zellen (wie etwa Krebszellen) aufzuspüren und zu zerstören oder auch kleine chirurgische Eingriffe im Körper durchzuführen. Somit könnten Nano- und Micro-Roboter eine potenziell effizientere und schonendere Behandlungsmethodik in der Medizin darstellen. In der Herstellung von Nano- und Micro-Robotern werden bislang zwei Ansätze verfolgt.¹⁹⁹ Dabei wird einerseits versucht, bestehende und funktionierende Technologien (wie etwa mikroelektromechanische Systeme) zu verkleinern. Andererseits wird versucht, komplett neue Roboter aus einzelnen Molekülen zu bauen. Zentrale Probleme, die dem Einsatz dieser Technologie noch im Wege stehen, stellen Antrieb, Energieversorgung und Zielerkennung der Nano- und Microbots dar. Dies hängt auch mit den spezifischen physikalischen Gesetzmäßigkeiten, z. B. in Bezug auf den Flüssigkeitswiderstand, zusammen. Sofern zukünftig der Durchbruch gelingt und Nano- und Microbots in die breite Anwendung gelangen, sehen Expertinnen und Experten ein hohes Entgrenzungspotenzial, da sich die Mini-Roboter relativ eigenständig im Körper des Menschen bewegen.²⁰⁰ Derzeit noch unklar ist, wie die Technologie wieder aus dem Körper extrahiert werden würde, welche Missbrauchspotenziale sich ggf. auch durch fremdgesteuerte oder vorprogrammierte Nano- und Microbots ergeben könnten und welche ungewollten oder auch unvorhergesehenen Auswirkungen ihr Einsatz im menschlichen Organismus haben könnte.

¹⁹⁷ Vgl. Krauter, R. (2015).

¹⁹⁸ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

¹⁹⁹ Vgl. Bhat, A. (2014).

²⁰⁰ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

Zukünftiges Entgrenzungspotenzial der Technologien ²⁰¹				
Schwachendes zukünftiges Entgrenzungspotenzial				
	Etablierung	Eingriffsstärke	Wirkungsstärke	Autonomie
Datenübertragende intelligente Medikamente	teilweise etabliert (TR 8)	invasiv	mittel (reversibel und kurzfristig)	teilweise automatisiert
Teilautomatisierte intelligente Medikamente	nicht etabliert (TR2)	invasiv	hoch (aufwendige Reversibilität und langfristig)	teilweise automatisiert
Starkes zukünftiges Entgrenzungspotenzial				
Voll automatisierte intelligente Medikamente	nicht etabliert (TR2)	invasiv	hoch (unklare Reversibilität und langfristig)	voll automatisiert bis (teil-)autonom
Nano- und Microbots	nicht etabliert (TR3)	invasiv	hoch (unklare Reversibilität und langfristig)	voll automatisiert bis (teil-)autonom

²⁰¹ Basis der Einschätzung neben der eigenen Beurteilung: Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten und Ergebnisse der Delphi-Befragung.

4.2 Biologisierung technischer Systeme: Entgrenzung von Technologie

Menschen- und tierähnliche Roboter



Menschen- und tierähnliche Roboter

Beschreibung

Menschen- und tierähnliche Roboter sind Maschinen, die mit dem Ziel konstruiert werden, als Agentinnen und Agenten in natürlichen und menschlich geschaffenen Umgebungen eingesetzt zu werden. Dazu werden ihre physische Form sowie ein Teil ihrer Funktionen und Aspekte ihres Verhaltens dem menschlichen bzw. tierischen Vorbild bis zu einem gewissen Grad angepasst. Es entstehen Lebewesen ähnliche Roboter. Sie stellen somit eine spezielle Entwicklungsrichtung in der Robotik dar und bauen auf schon etablierteren Roboterklassen wie **Industrierobotern** und **Endverbraucher-Servicerobotern** auf.²⁰²

Technologien

Laufroboter:

Roboter, die grundsätzlich versuchen, den menschlichen oder tierischen Körper in seinem Bewegungsapparat nachzubauen.²⁰³

Softe Roboter:

Mit soften Robotern versucht die Forschung, dem menschlichen oder tierischen Vorbild bzw. dessen Funktionen u. a. mithilfe von weichen Materialien näherzukommen. Dadurch soll nicht nur ein menschen- oder tierähnlicheres Erscheinungsbild, sondern auch eine lebensnahe Anpassungsfähigkeit, etwa für natürliches Greifen oder Bewegen (z. B. raupen- oder rochenähnliches Bewegen), ermöglicht werden.²⁰⁴

Humanoide Roboter:

Für diese Roboter werden die Entwicklungen einzelner Aspekte in der Robotik, wie weiche Materialien und Laufroboter, aufgegriffen und mit dem Ziel zusammengeführt, sie als menschliche Interaktionspartnerinnen und -partner zu etablieren.²⁰⁵ Zusätzlich zu der menschenähnlichen physischen Gestalt und Bewegungsart wird versucht, mittels künstlicher Intelligenz das Verhaltensrepertoire des Roboters dem menschlichen anzugleichen – auch hinsichtlich Empathie und Emotionen.

Digitale Androiden:

Neue Entwicklungen nutzen die Fortschritte der Emotions-KI-Methoden nicht nur bei der Vermenschlichung physischer Roboter, sondern arbeiten auch an der Erstellung virtueller Menschen ohne physische Form. Dabei handelt es sich um netzwerkbasierende Imitationen des menschlichen Charakters.²⁰⁶

Androiden:

Obige Entwicklungen zusammenführend, wird in einer Spezialklasse der humanoiden Roboter die Ähnlichkeit

²⁰² Vgl. Wandelbots (2020) und Scheuer, S.; Kerkmann, C. (2018).

²⁰³ Vgl. Boston Dynamics Laufroboter „Atlas“ oder Agility Robotics „Digit“.

²⁰⁴ Vgl. Parsch (2018). Vgl. auch Festos „Bionic Soft Hand“.

²⁰⁵ Vgl. Lamarche-Toloza, A. (2020). Vgl. Produkte von u. a. Festo und BMBF-geförderten Start-ups wie Robotise GmbH, MetraLabs GmbH oder Mojin Robotics GmbH.

²⁰⁶ Vgl. Dang, S. (2019). Vgl. Samsungs NEON-Projekt oder die Uneeq-Plattform.

zwischen Mensch und Roboter auf die Spitze getrieben und eine vollständige Ununterscheidbarkeit angestrebt – in Form sogenannter Androiden. Bei der Entwicklung dieser Robotermenschen legen die Entwicklerinnen und Entwickler besonderen Wert auf das menschliche Erscheinungsbild.²⁰⁷

Stand der Forschung

Während Service-Roboter für Endverbraucherinnen und -verbraucher bereits als automatisierte Rasenmäher und Staubsauger mit Verkaufszahlen von 17,6 Millionen Einheiten im Jahr 2019 eine etablierte Verbreitung erreicht haben, sind **menschen- und tierähnlichere Roboter** noch weiter von einer Marktdurchdringung entfernt.²⁰⁸ Nach langen Entwicklungszeiten gelingt den ersten Vertretern der **Laufroboter** derzeit der Durchbruch zur Marktreife, wie etwa dem hundeähnlichen Roboter „Spot“ der Firma Boston Dynamics. Durch eine Ausstattung mit Sensoren soll der Roboter als vollumfänglich bewegliche Vielzweck-Plattform beispielsweise auf dem Fabrikgelände zur Datensammlung, Inspektion und für Kontrollgänge verwendet werden.²⁰⁹

Auch **softe Roboter** konnten in einigen Teilgebieten der Robotik bereits eine Marktreife verzeichnen. So werden softe Roboter derzeit vor allem als Industrieroboter eingesetzt, um Maschinen zu einem weichen Griff zu befähigen.²¹⁰ Weitere aktuelle Umsetzungen der weichen Robotik wie Roboterfische, Raupenroboter und quallen- oder tintenfischähnliche Tentakelroboter dienen eher der Erforschung von Grundlagen und als Wirknachweis.

Humanoide Roboter wie der Zweibeiner „Atlas“ greifen gewisse Aspekte der laufenden und weichen Roboter auf, um zunehmend menschenähnlichere Maschinen zu entwickeln.²¹¹ Ihre zumindest rudimentär menschliche Form und Kommunikationsfähigkeit werden stetig weiterentwickelt und sind für ihr Anwendungspotenzial von zentraler Bedeutung. So werden humanoide Roboter bereits heute in Testfällen für die Interaktion mit Menschen im Dienstleistungsbereich eingesetzt. In ersten Versuchen werden humanoide Roboter zu Beraterinnen und Beratern und Interaktionspartnerinnen und -partnern, beispielsweise in Krankenhäusern und beim Kundenkontakt in Hotels, Baumärkten, Banken und Flughäfen. Insbesondere Japan gilt als Vorreiter des Einsatzes von humanoiden Robotern, z. B. in der Pflege und Rehabilitation. Doch selbst hier ist die Marktdurchdringung noch „sporadisch“ zu nennen.²¹² Dem Thema humanoide Robotik wird in der Forschung eine kontinuierliche Aufmerksamkeit zuteil, wobei vor allem Japan, China, die USA, Deutschland und Italien als Publikationsländer mit hohem Niveau herausstechen. Im Zitationsvergleich zeigt sich von 2010 bis 2019 eine schrumpfende Bedeutung der USA bei kontinuierlich wachsender Bedeutung Chinas. Nimmt man Zitationszahlen als Maßstab, so zeigen die fünf Länder eine recht gleichartige Wichtigkeit ihrer Forschung.²¹³ Die Patentanmeldungen zu humanoiden Robotern haben seit 2014 kontinuierlich zugenommen und fokussieren sich vor allem auf Frankreich, die USA und Südkorea. Innerhalb der IPC-Hauptgruppen sind humanoide Roboter vergleichsweise breit aufgestellt. Allerdings beziehen sich die meisten Patentveröffentlichungen auf Manipulatoren und Fahrzeuge.²¹⁴ Die Expertinnen und Experten halten es überwiegend für sehr bis eher wahrscheinlich, dass humanoide Roboter bis 2030 umfassende Marktreife erzielt haben, insbesondere dann, wenn eine kostengünstigere Produktion gelingt.

Mögliche Entwicklungen in der Zukunft

Zukünftig könnten **Laufroboter** überall, wo in schwierigem Gelände navigiert werden muss, eingesetzt werden. Laufroboter könnten beispielsweise als Schwerstarbeiter auf Baustellen Verwendung finden. Mit stabiler Lauffähigkeit könnte der Roboter auch unwegsames Terrain überwinden, schwere Platten und Material heben und so die körperliche Belastung der menschlichen Kolleginnen und Kollegen senken.²¹⁵ Ebenso könnten Laufroboter als niemals ermüdende Botinnen und Boten zur vollständig automatisierten und trotzdem individualisierten

²⁰⁷ Vgl. Produkte des Unternehmens Hanson Robotics oder Promobot.

²⁰⁸ Vgl. Stewart, D.; Casey, M.; Wigginton, C. (2019).

²⁰⁹ Vgl. Vincent, J. (2020).

²¹⁰ Vgl. Automationspraxis (2020).

²¹¹ Siehe Boston Dynamics (o. D.).

²¹² Vgl. Braeseke, G. et al. (2019).

²¹³ Ergebnisse der Publikationsanalyse.

²¹⁴ Ergebnisse der Patentanalyse.

²¹⁵ Vgl. Marsiske, H.-A. (2019).

Lieferung beitragen. So klingelt in Zukunft vielleicht der Laufroboter mit einer Paketzustellung an der Haustür. Der Einsatz als Botin bzw. Bote könnte auch zu einer militärischen Verwendung erweitert werden. Dabei könnten Laufroboter trotz gefährlicher Umstände eine kontinuierliche Versorgung selbst im unwegsamen Gelände gewährleisten und so das Leben der Soldatinnen und Soldaten schützen. Auch im Bereich der Such- und Rettungsaktionen könnten die Roboter die Gefahr für menschliche Kolleginnen und Kollegen mindern, indem sie Aufgaben in gefährlichen Abschnitten übernehmen.²¹⁶ Mit ihrem stabilen Gang könnten die Roboter auch zur versatilen Exploration anderer Planeten eingesetzt werden. Dabei könnten sie mit ihrer Beweglichkeit derzeitige Explorationssysteme übertrumpfen und ein Steckenbleiben verhindern. Der Einsatz von Laufrobotern könnte jedoch auch menschliche Arbeitskraft ersetzen und damit soziale Problematiken durch Arbeitslosigkeit verstärken.

Zukünftig könnten **softe Roboter** dank der weichen Materialien ihre Form dynamisch anpassen und sich für Such- und Bergungseinsätze als „Diagnose- und Wartungsroboter in engen Tunnelschächten, Röhren“ nutzen lassen.²¹⁷ Softe Roboter könnten aber auch die Interaktion der Roboter mit Menschen revolutionieren, da sie Menschen durch die Anpassungsfähigkeit der verwendeten Materialien nicht verletzen würden. Beispielsweise könnten Roboterarme mit weichen Händen zur intensiven Roboter-Mensch-Kollaboration bei der Montage dienen. Damit würden bisherige Schutzkonzepte, die den Robotereinsatz aufgrund der Verletzungsgefahr für den Menschen in Käfigen vorsieht, überflüssig. Zukünftig könnten somit Mensch und Maschine bedarfsorientiert zusammenarbeiten, und eine vorausschauende Maschine z. B. notwendige Werkzeuge bereitstellen. Derartige Interaktionssicherheit könnte softe Roboter auch als Assistenzen in der Altenpflege einsetzbar machen, die beispielsweise bei der Körperpflege unterstützen. Auch in der Raumfahrt könnten softe Roboter als krabbelnde, schwieriges Terrain überwindende Erkundungssysteme bisherige Roboter ersetzen. Im besten Fall wäre es den weichen Robotern möglich, sich auf ein Signal hin in ihre Bestandteile zu zersetzen, damit sie umweltverträglich etwa bei der „Umweltüberwachung (z. B. Detektion von Schwermetallen im Wasser)“ eingesetzt werden könnten.²¹⁸

Zukünftig könnten allgegenwärtige humanoide Roboter Menschen in Hotels, Banken oder Geschäften willkommen heißen, durch fremde Städte führen und im Alter emotional und physisch stützend begleiten.²¹⁹ Ein zunehmender Einsatz von humanoiden Robotern könnte aber auch im Privaten, beispielsweise als persönliche Haushaltshilfe, erfolgen. So könnten Roboter Menschen beim Einkauf und bei der Ernährung mit immer größeren Entscheidungsfreiräumen unterstützen. Mit einer hohen Autonomie über die Empfehlung oder sogar den Kauf von Produkten könnten die humanoide Roboter selbst zu ökonomischen Akteuren werden. Sollte die ökonomische Verwaltung des Haushalts vermehrt humanoiden Robotern überlassen werden, könnten sich Marketingstrategien entwickeln, die die robotischen Algorithmen direkt ansprechen, um Produkte bestmöglich zu bewerben.²²⁰ Auch standardmäßige Voreinstellungen der humanoiden Systeme wären von großer Bedeutung für die Gesundheit und den Lebensstil ihrer Besitzerinnen und Besitzer. Um in solchen Fällen die Nachvollziehbarkeit und Fairness zu wahren, müssten gesetzliche Regelungen zur spezifischen Gestaltung der Algorithmen, die eine Vorauswahl an Produkten treffen oder den Kauf bestimmen, getroffen werden.

Das zukünftige Entgrenzungspotenzial stufen Expertinnen und Experten als eher mittelmäßig ein und machen es u. a. vom Grad der Autonomie der Roboter abhängig.²²¹ Die Interaktionsfähigkeit von Maschinen könnte zukünftig insbesondere durch Emotions-KI erweitert werden, die menschliche Emotionen für Maschinen lesbar macht und die emotionale Interaktivität von Computerprogrammen erhöhen soll. Der derzeitige Einsatz von Emotions-KI geschieht noch eher außerhalb humanoider Robotik, etwa im Bereich virtueller Chatbots oder zum Monitoring des emotionalen Zustand psychisch instabiler Menschen.²²² Diese KI-Methoden könnten zunehmend auch in Robotern eingesetzt werden, um sie grundsätzlich sozialer zu gestalten und die Mensch-Maschine-Kommunikation zu erleichtern. Damit könnten sozial und emotional intelligente Roboter weite Ver-

²¹⁶ Vgl. Bellicoso, C. D. et al. (2018).

²¹⁷ Siehe Schulte, A. (o. D.).

²¹⁸ Siehe Schulte, A. (o. D.).

²¹⁹ Vgl. Sonnenberg, V. (2016).

²²⁰ Vgl. Hackl, C. (2020).

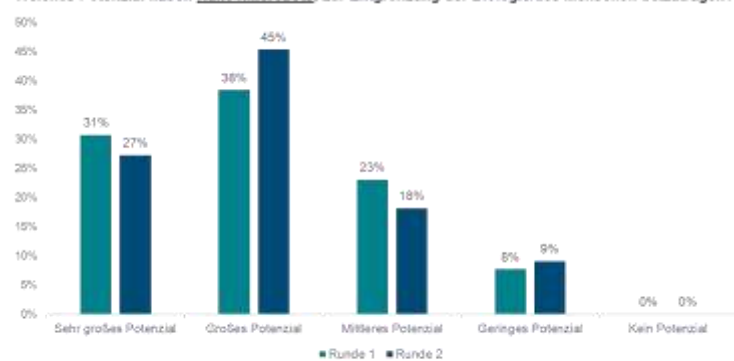
²²¹ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

²²² Vgl. Gujral, R. (2019).

breitung als Assistenzen in der Pflege und Betreuung alter Menschen oder bei der Interaktion mit Kindern (insbesondere mit Auffälligkeiten im Autismus-Spektrum) finden.²²³

Emotional intelligente Programme werden derzeit auch zur Erstellung virtueller Menschen entwickelt. Ergänzt um eine computergenerierte grafische Darstellung könnten **digitale Androiden** zu permanenten individualisierten Interaktionspartnern werden. Ihr „menschlicher“ Charakter könnte sie für eine Vielzahl an Kommunikationsrollen qualifizieren. Denkbar sind digitale Androiden z. B. als Online-Fitnesstrainerinnen und -Fitnesstrainer, die uns beim Training motivieren, als Lehrpersonen, die uns vom Gitarrenspiel bis zum Geschichtsunterricht interaktiv Wissen vermitteln, als Akteurinnen und Akteure in der medizinischen oder finanziellen Beratung, wo sie Informationen individuell anpassen, oder sie werden vielleicht sogar zu persönlichen Freundinnen bzw. Freunden.²²⁴ Bei einer zunehmenden Digitalisierung und Virtualisierung der menschlichen Aktivität könnten digitale Androiden Menschen zunehmend ersetzen. Durch eine individuelle Gestaltung der virtuellen Menschen könnte das Bedürfnis nach sozialem Kontakt insbesondere in vereinsamenden alternden Gesellschaften gedeckt werden. Hinsichtlich der Verbreitung und Marktreife digitaler Androiden im Jahr 2030 sind sich die Expertinnen und Experten eher uneins – so gibt es einfache digitale Androiden bereits heute, und die erfolgreiche Verknüpfung mit einer emotionalen KI erscheint derzeit noch unwahrscheinlich. Das Entgrenzungspotenzial von digitalen Androiden hingegen wird von den Expertinnen und Experten als mittel bis gering eingeschätzt, u. a. da sie auf rein virtueller Ebene interagieren. Gleichwohl befürchten auch die Expertinnen und Experten, dass die digitalen Androiden zukünftig menschliche Interaktionspartnerinnen und -partner vollkommen ersetzen könnten. Zwischenmenschliche Kontakte könnten so verloren gehen, insbesondere in wichtigen Bereichen wie der Patient-Arzt-Beziehung. Auch die Glaubwürdigkeit von Informationen könnte noch stärker in Zweifel gezogen werden (Fake News). Digitale Androiden könnten zukünftig gravierenden Einfluss auf für die menschliche Autonomie und Entscheidungsfindung nehmen.²²⁵

Welches Potenzial haben Nano-/Microbots zur Entgrenzung der Biologie/des Menschen beizutragen?



Quelle: Eigene Darstellung Prognose AG und Z_punkt auf Basis der Delphi-Befragung 2020.

Während die Entwicklung von **Androiden** bereits in gewissen Aspekten dem menschlichen Äußeren und Verhalten nahekommt (z. B. Sophia),²²⁶ sind derzeit noch keine vollumfänglich adaptiven Systeme entworfen worden. Sollten sich die Funktionalitäten der Androiden zukünftig zur generellen Problemlösefähigkeit eines Menschen erweitern (Androiden mit Allround-Fähigkeit), denken einige Entwicklerinnen und Entwickler an einen Einsatz etwa als Haushaltshilfen, Pflegeassistenzen, zur Kindererziehung, in Verkaufsgesprä-

chen und letztlich bei jeder anderen menschlichen Tätigkeit.²²⁷ Das größte Hemmnis der Verbreitung wären die hohen Kosten für die individualisierte Herstellung der Androiden. Auch wenn der heutige Stand der Technologie noch weit von einer Allround-Funktionalität entfernt ist, treibt die demografische Entwicklung einiger Industrienationen diese menschenähnlichste Variante an Robotern insbesondere in sozialen Berufen voran. Dabei ist von einer komplexen Wirkbeziehung auszugehen, in der die Entwicklung von Androiden durch die Verfügbarkeit günstiger Arbeitskräfte gehemmt und von diskriminierenden Tendenzen einer nicht inklusiven Gesellschaft gefördert wird. Ein vollständiges Ersetzen der sozialen und dienstleistungsbezogenen Tätigkeiten durch menschenähnliche Roboter würde in vielerlei Hinsicht Grundannahmen der heutigen Gesellschaft infrage stellen. Eine Verknappung der Arbeitsplätze könnte insbesondere vulnerable Gesellschaftsgruppen weiter benachteiligen und die Prinzipien der leistungsorientierten und sozial mobilen Gesellschaft in Zweifel ziehen. Das grundsätzliche Verhältnis zwischen besitzendem Menschen und versklavter Maschine könnte mit wach-

²²³ Vgl. Snow, J. (2019).

²²⁴ Vgl. Burden, D.; Savin-Baden, M. (2019), S. 166 ff.

²²⁵ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

²²⁶ Siehe Hanson Robotics (o. D.).

²²⁷ Vgl. Hornyak, T. (2019).

sender Ähnlichkeit der menschlichen und maschinellen Funktionalitäten zunehmend infrage gestellt werden. Auch intimere Beziehungen wären durch die Entwicklung von Androiden vorstellbar. Empathische Maschinen könnten zunehmend als gleichberechtigte Interaktionspartnerinnen und Interaktionspartner wahrgenommen werden und genuine Gefühle im Menschen auslösen. Von der persönlichen Freundin bzw. dem persönlichen Freund über Roboter-Adoptivkinder bis hin zur individuell eingerichteten Kopie einer bzw. eines verstorbenen Geliebten würden Androiden unser Verständnis vom Menschsein herausfordern.²²⁸

Eine Entwicklung von Androiden wird jedoch auch durch das sogenannte Uncanny Valley gehemmt. Dabei gehen Forschende von einem paradoxen Sinken der Akzeptanz von Nutzerinnen und Nutzer gegenüber menschenähnlichen Robotern aus, die noch vom Menschen unterscheidbar sind. Grund dafür ist ein Gefühl des Grusels, das ein solcher technisch simulierter Mensch auslösen würde. Erst nahe der vollständigen Verwechselbarkeit und der Überwindung des „Uncanny Valley“ steigt die Akzeptanz demnach wieder an. Die Marktreife im Jahr 2030 schätzen die Expertinnen und Experten für sehr unwahrscheinlich ein. Das Entgrenzungspotenzial hingegen halten sie eher für sehr groß bis groß. Allround-Androiden könnten sich bis zur Unkenntlichkeit den Menschen angleichen. Die Expertinnen und Experten befürchten, dass dies fundamentale Auswirkungen auf das soziale Gefüge hätte, da nicht mehr eindeutig erkennbar wäre, ob man mit einem Menschen oder einem Artefakt interagiere. Dies zieht sowohl rechtliche als auch ethische Fragen nach sich.²²⁹ Gleichwohl könnten Allround-Androiden eingesetzt werden, um einen Großteil von Arbeiten zu erledigen, was den Menschen mehr Zeit für Freizeitaktivitäten böte und gleichzeitig zu geringeren Arbeitskosten führen könnte. Allerdings sehen einige Expertinnen und Experten auch Möglichkeiten, dass Androiden die Menschen auch in anderen Bereichen zunehmend ersetzen. So könnte beispielsweise ein Androiden-Kind nach Wunsch anstelle eines eigenen biologischen Kinds treten.²³⁰ Weder für die digitalen Androiden noch für die Allround-Androiden liegen derzeit umfassende Patentaktivitäten vor.²³¹ Im Bereich der Forschung zeigt sich bei anthropomorphen Robotern, also in ihrem Erscheinungsbild nach menschlichem Vorbild ausgerichteten Maschinen, eine steigende Zahl an Publikationen. Besonders herausragend ist der Forschungsausput dabei in den USA, Deutschland und Japan. In den letzten Jahren wurde die Forschung zu Androiden vermehrt auch in Italien und China betrieben, sodass die internationale Führungsrolle in diesem Gebiet noch von keinem Land besetzt wurde. Noch deutlich mehr wird zu digitalen Androiden geforscht, wobei auch hier Deutschland eine gute Position im internationalen Vergleich einnimmt. Neben den USA und China sind insbesondere Deutschland und Großbritannien wichtige Treiber der Forschung.²³²

²²⁸ Vgl. The Future of Humanoid Robots (o. D.).

²²⁹ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

²³⁰ Ergebnisse des Futures-Wheel-Workshops.

²³¹ Ergebnisse der Patentanalyse.

²³² Ergebnisse der Publikationsanalyse.

Zukünftiges Entgrenzungspotenzial der Technologien ²³³			
Schwachendes zukünftiges Entgrenzungspotenzial			
	Etablierung	Ähnlichkeit (biol. System)	Autonomie
Laufroboter	teilweise etabliert (TRL 4 bis 9)	wesentliche Ähnlichkeit zu Lebewesen in Form und Bewegung	hoch automatisiert bis voll automatisiert
Softed Roboter	wenig etabliert (TRL 4 bis 8)	wesentliche Ähnlichkeit zu Lebewesen in Adaptivität	hoch automatisiert bis voll automatisiert
Humanoide Roboter	wenig etabliert (TRL 4 bis 8)	wesentliche Ähnlichkeit zu Lebewesen in Form und Funktionalität	voll automatisiert
Starkes zukünftiges Entgrenzungspotenzial			
Digitale Androiden	wenig etabliert (TRL 4 bis 8)	virtuell ununterscheidbar	voll automatisiert
Androiden	vor allem neuartig (TRL 1 bis 5)	ununterscheidbar	autonom

Micro- und Nanobots aus lebendigen Materialien

 Micro- und Nanobots aus lebendigen Materialien
Beschreibung Micro- und Nano-Roboter aus lebendigen Materialien sind maschinelle Agenten auf sehr kleiner Ebene, die im Gegensatz zu Nano-Robotern aus harten Materialien (siehe auch Abschnitt „Smarte medizinische Technologien“) vollständig oder für einen Teil ihrer Fähigkeiten auf biologische Komponenten zurückgreifen. Diese Micro- und Nano-Roboter werden für spezielle Tätigkeiten im mikroskopischen Umfeld, etwa im menschlichen Körper, programmiert.
Technologien Biohybride Roboter: Diese Maschinen sind mikroskopische Agenten, die für einen Teil ihrer Funktionalitäten, beispielsweise als Antriebssystem oder zur Steuerung, lebendige natürliche Zellen nutzen.²³⁴ Xenobots: Vollständig biologische Roboter. Diese bestehen z. B. aus Froschzellen, deren physische Form und damit einhergehende Funktion durch Algorithmen designet wurden.²³⁵ Synthetische Zellen (Artificial Cells): Sie werden mit dem Ziel erforscht, als Mikro-Agenten im menschlichen Körper eingesetzt zu werden. Synthetische Zellen sind künstlich zusammengefügte Molekülverbindungen, deren Form und viele weitere biologische Eigenschaften so genau wie möglich jenen von lebendigen Zellen nachempfunden sind (z. B. Zellwände oder metabolische Energieumwandlung). Dazu werden entweder sehr simple biologische Zellen

²³³ Basis der Einschätzung neben der eigenen Beurteilung: Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten und Ergebnisse der Delphi-Befragung.

²³⁴ Vgl. Webster-Wood, V. (2016).

²³⁵ Vgl. Schumann, F. (2020).

immer weiter reduziert oder Einheiten aus organischen und synthetischen Molekülen synthetisiert, die zur autonomen Kommunikation innerhalb und zwischen Zellen sowie zur Kooperation fähig sind.²³⁶

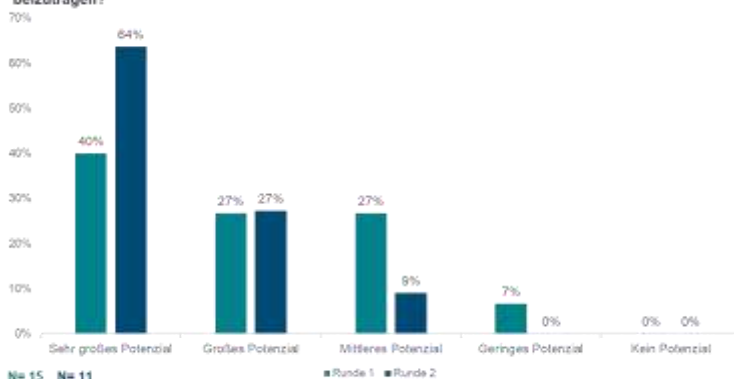
Stand der Forschung

Micro- und Nanobots mit lebendigen Komponenten sind derzeit noch nicht weit verbreitet. Erste **biohybride Roboter** wurden als Demonstratoren bereits entwickelt. Beispielsweise können sie durch die Verwendung von Muskelzellen und optogenetische Steuerung von lebendigen Neuronen zielgerichtet und von außen steuerbar schwimmen.²³⁷ Auch die Erstellung vollständig **biologischer Roboter** wurde auf Mehrzellenebene bereits demonstriert. Jedoch ist die Forschung noch grundlagenorientiert, die Anwendung beschränkt sich derzeit auf die Bewegung von Mikro-Material. Die Forschung zu **synthetischen Zellen** kann derweil einige erfolgreiche Durchbrüche aufweisen, die sie ihrem Ziel künstlich erstellten Lebens einige Schritte näherbringt. So wurden in immer neuen Fortschritten viele der Komponenten für synthetische Zellen, wie etwa künstliche Chloroplasten, künstliche Kompartimente und synthetische Organellen, entwickelt.²³⁸

Mögliche Entwicklungen in der Zukunft

Für einen zukünftigen Einsatz von **Micro- und Nanobots** aus vollständig oder teilweise lebendigem Material sind weitere grundlegende Forschungsbemühungen zur Steuerbarkeit und Versorgung lebendiger Strukturen zu betreiben. Die Verwendung lebendiger Materialien für Mikro- und Nanobots bietet aber einige entscheidende Vorteile, die sich in zukünftigen Anwendungsmöglichkeiten widerspiegeln. Durch die Biokompatibilität lebendiger Strukturen könnten hybride bzw. biologische Roboter oder auch synthetische Zellen im menschlichen Körper eingesetzt werden, ohne mechanischen Schaden zu verursachen. Ausgestattet mit biologischen Komponenten zur Detektion von Schadstoffen oder Verletzungen, könnten sie

Welches Potenzial haben biohybride Roboter, zur Entgrenzung der Biologie/des Menschen beizutragen?



Quelle: Eigene Darstellung Prognos AG und Z_punkt auf Basis der Delphi-Befragung 2020.

lebendiges Gewebe zielgenau ansteuern, Schadstellen lokalisieren und auf chemisch-kontrollierte Weise manipulieren.²³⁹ Durch ihre biologischen Komponenten könnten sich größere Roboterstrukturen bzw. Agenten-Zellsysteme auch erst nach der Aufnahme im Körper und an der Einsatzstelle aufbauen. Durch die Programmierung könnten sie direkt am Zielort zu ihrer notwendigen Funktion zusammenwachsen und derzeitige mechanische Operationen über-

flüssig werden lassen. Auch ein präventiver Einsatz wäre denkbar, indem ein Bestand an biobasierten Robotern durch eine autonome Energieversorgung und organische Heilprozesse im Körper längerfristig überleben könnte.²⁴⁰ Zukünftig könnten also neben den Darmbakterien auch eine Vielzahl an biologischen bzw. biohybriden Robotern oder künstlichen Zellen leben, die sich bei der Detektion eines Schadstoffs oder einer Verletzung selbst aktivieren. Dabei besteht eine erhebliche Anwendungsschnittmenge mit den intelligenten Medikamenten (siehe auch Abschnitt „Smarte medizinische Technologien“). Biologische oder biohybride Roboter und synthetische Zellen könnten zukünftig ebenso zur Messung körperlicher Vorgänge, zur

²³⁶ Vgl. Powell, K. (2018).

²³⁷ Vgl. Science Daily (2019).

²³⁸ Vgl. Max-Planck-Gesellschaft (2020).

²³⁹ Vgl. Mimee, M. et al. (2018).

²⁴⁰ Vgl. Appiah, C. et al. (2019), S. 24.

gezielten Medikamentenabgabe, zur Reinigung von Arterien oder zur Lokalisierung und Eliminierung von Schadzellen (z. B. Tumorzellen) dienen.²⁴¹ Auch eine Anwendung der biohybriden Roboter als „Bioprinter“, der Zellmaterial direkt im Körper an benötigten Stellen druckt, wurde bereits demonstriert.²⁴²

Zudem könnten Micro- und Nanobots vermehrt außerhalb des menschlichen Körpers Anwendung finden. Beispielsweise könnten sie zukünftig zur Erfassung der Schadstoffbelastung in Flüssen, Abwässern oder Lebensmitteln genutzt werden. Durch ihre Biokompatibilität könnten sie zudem als umweltverträgliche Option Umweltbelastungen beseitigen, indem sie beispielsweise Mikroplastik in Ozeanen sammeln.²⁴³ Im Falle ihres Absterbens würden sie als Nahrungsquelle für andere Lebewesen dienen. Für diese Verwendung wäre jedoch eine intensive Erprobung des jeweiligen Systems unter natürlichen Umständen notwendig, da die Systeme mit anderen Mikroorganismen interagieren könnten. Gegebenenfalls müssten Verdrängungseffekte aufgrund ähnlicher Lebensräume oder sogar die Verbreitung genetischen Materials der Roboter kontrolliert werden. In jedem Fall müsste sichergestellt werden, dass die biohybriden und biologischen Roboter keine eigenständige Mutation aufweisen bzw. der menschlichen Kontrolle unterworfen bleiben. Eine Erweiterung der Verbindung von belebten und unbelebten Strukturen wie im Fall der biohybriden Roboter wäre auch für große makroskopische Roboter von Bedeutung. Eine Verwendung organischen Materials und künstlichen Metabolismus für deren Erhalt könnte auch makroskopischen Robotern die Möglichkeit zur Heilung oder Reproduktion verleihen. Damit könnten beispielsweise Explorations- und Kolonisationsvorhaben in der Weltraumforschung durchgeführt werden, die für Menschen wegen ihrer begrenzten Lebensspanne nicht zu erreichen sind.

Einige Expertinnen und Experten sehen im Rahmen von biohybriden oder biologischen Robotern sogar Potenziale für eine neue Art der Kommunikation. Biohybride Roboter könnten durch den oder im Körper (z. B. über Muskeln) kommunizieren und biologische Roboter in einem Körper als eine Art neuartiges Haustier leben. Gleichmaßen könnte sich durch die Roboter ein neues Verständnis von Natur und Umwelt ergeben. Schließlich könnten die mithilfe der lebendigen Roboter gesammelten Informationen für eine Art „Gesundheitsdiktatur“ eingesetzt werden, in der sich der Krankenversicherungsbeitrag nach den Xenobot-Informationen richtet.²⁴⁴ Die Forschung zu biohybriden Robotern steigerte sich in den letzten zehn Jahren von einem sehr geringen Niveau auf etwa 50 Publikationen jährlich. Getrieben wird die Forschungsaktivität vor allem von den USA, China, Japan und Deutschland, die dieses Forschungsfeld in Zukunft fest etablieren könnten.²⁴⁵ Die Patentanmeldungen haben im Jahr 2015 ein Hoch erfahren und entwickeln sich in den vergangenen Jahren erneut dynamisch.²⁴⁶ Die Expertinnen und Experten sind sich über eine potenzielle Marktreife der Technologien in 2030 eher uneinig, einige sehen die Technologien noch sehr weit am Anfang. Im Falle einer erfolgreichen Etablierung sehen sie jedoch ein eher großes bis sehr großes Entgrenzungspotenzial, u. a. da Technologie und Biologie hierbei tatsächlich eins werden und teilweise sogar ganz neue Wesen geschaffen werden.²⁴⁷

Spezifisch für **synthetische Zellen** könnten sich weitere Anwendungsszenarios ergeben. Die Erstellung neutraler Zellplattformen könnte dabei der Entwicklung eine entscheidende Richtung geben, indem sie den Tätigkeitsbereich der Zelle durch frei wählbare Moleküleinbindung flexibilisiert. Dadurch könnten synthetische Zellen bei Verfügbarkeit entsprechender Agenten-Moleküle eine unbegrenzte Anzahl an spezifischen chemischen Vorgängen im Körper oder der mikroskopischen Umwelt auslösen.²⁴⁸ Bei hinreichender Interaktionsfähigkeit der Zellen könnten auch dauerhafte zelluläre Verbindungen, etwa als künstliches Gewebe oder smarte Materialien, genutzt werden. Diese Materialien könnten ihre Umgebung wahrnehmen und sich in ihrer Form an Veränderungen anpassen (siehe auch biohybride Materialien im Abschnitt „Biologisierte Technologie als Produktionsmittel“).²⁴⁹ Die Forschung zum Thema synthetische Zellen weist ein kontinuier-

²⁴¹ Vgl. Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme (o. D.).

²⁴² Vgl. Zhao, W.; Xu, T. (2020).

²⁴³ Vgl. Nagels, P. (2020).

²⁴⁴ Ergebnisse des Futures-Wheel-Workshop.

²⁴⁵ Ergebnisse der Publikationsanalyse.

²⁴⁶ Ergebnisse der Patentanalyse.

²⁴⁷ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

²⁴⁸ Vgl. Dunning, H. (2019).

²⁴⁹ Vgl. Dogterom, M. et al. (2016).

liches Wachstum auf, wobei insbesondere Deutschland im letzten Jahr deutlich an Forschungsbeiträgen zulegen konnte. Damit schließt Deutschland beinahe zum Spitzenreiter USA auf. Aber auch Großbritannien, China und Japan zeigen intensivierte Forschungsaktivitäten.²⁵⁰ Die Patentanmeldungen zu synthetischen Zellen unterliegen in den vergangenen Jahren leichten Schwankungen. Die mit Abstand meisten Patente werden in den USA angemeldet, gefolgt von Frankreich und Deutschland. Zudem stammen auch die meisten anmeldenden Einrichtungen aus den USA.²⁵¹ Die Expertinnen und Experten halten es überwiegend für unwahrscheinlich, dass synthetische Zellen im Jahr 2030 marktreif sind. Hinsichtlich eines zukünftigen Entgrenzungspotenzials sind sie sich eher uneinig, gehen aber tendenziell eher davon aus, dass ein Entgrenzungspotenzial bestehen würde. Für ungewiss halten sie die Nebenwirkungen, die in Zukunft auftreten könnten.²⁵²

Zukünftiges Entgrenzungspotenzial der Technologien²⁵³

Schwachendes zukünftiges Entgrenzungspotenzial			
	Etablierung	Ähnlichkeit (biol. System)	Autonomie
Biohybride Roboter	neuartig (TRL 1 bis 5)	wesentliche Ähnlichkeit in Form und Funktionalität	voll automatisiert
Starkes zukünftiges Entgrenzungspotenzial			
Biologische Roboter	neuartig (TRL 1 bis 5)	ununterscheidbar	autonom
Synthetische Zellen	neuartig (TRL 1 bis 5)	ununterscheidbar	voll automatisiert bis autonom

Technologien zur Datenverarbeitung



Technologien zur Datenverarbeitung

Beschreibung

Bei der Messung und Verarbeitung von Informationen werden vermehrt biologische Komponenten und Systeme eingesetzt. Dabei wird versucht, elektronische Daten mithilfe biologischer Systeme auszuwerten und biologische Zustände elektronisch besser messbar und auswertbar zu machen.

Technologien

Hybride Prozessoren:

Es handelt sich um eine Verbindungen aus siliziumbasierten „traditionellen“ Mikrochips und lebendigen (tierischen) Nervenzellen. Ziel ist es, die Vorteile der Biologie für die Datenverarbeitung zu erschließen.²⁵⁴

Biologische Computer bzw. Biological Computing:

Bei dieser Technologie werden statt siliziumbasierter Transistoren und Elektronenfluss chemische Reaktionen von DNA- und RNA-Molekülen zur Datenverarbeitung genutzt.²⁵⁵ In einem anwendungsnahen Teilbereich versuchen Forschende, Daten in genetischem Code zu speichern.

²⁵⁰ Ergebnisse der Publikationsanalyse.

²⁵¹ Ergebnisse der Patentanalyse.

²⁵² Ergebnisse der Delphi-Befragung.

²⁵³ Basis der Einschätzung neben der eigenen Beurteilung: Interviews mit Expertinnen und Experten sowie Delphi-Befragung.

²⁵⁴ Vgl. Kahn, J. (2020). Siehe auch das US-amerikanische Start-up Koniku oder das australische Cortical Labs.

²⁵⁵ Vgl. Griffin, M. (2018).

DNA-basierte Informationsspeicherung:

Hierbei werden digital vorliegende Daten in Nukleinsäuren kodiert und so langfristig haltbar und platzsparend gespeichert.²⁵⁶

Biosensoren:

Dies sind Messgeräte, die aus der Verknüpfung von (mikro-)elektronischen Komponenten und biologischen Systemen bestehen. Je nach Aufgabe des Biosensors werden unterschiedlich komplexe aktive Biosysteme – beispielsweise Antikörper oder vollständige Zellen – als Detektoren verwendet.²⁵⁷

Organs-on-a-Chip:

Dabei werden spezifische Arten biologischer Zellen in mikrofluidische Systeme integriert, um realitätsnahe Zustände im Körper zu simulieren.²⁵⁸

Stand der Forschung

Hybride Prozessoren sind insgesamt eher im Grundlagenstadium und werden derzeit entwickelt. Entsprechend liegen im Rahmen der Patentanalyse keine angemeldeten Patente in diesem Bereich vor.²⁵⁹ Nichtsdestoweniger geht knapp die Hälfte der Expertinnen und Experten davon aus, dass hybride Prozessoren im Jahr 2030 marktreif sein werden.²⁶⁰ Dem Unternehmen Koniku beispielsweise gelang vor Kurzem, die erste vermarktbare Verbindung von riechenden Nervenzellen und Halbleitertechnik in einem lebendigen Moleküldetektor.²⁶¹ Darüber hinaus arbeitet das Start-up Cortical Labs an einem ersten Demonstrator eines programmierbaren hybriden Prozessortyps, der Neuronen und Silikonchips verbindet. In einem ersten Test werden die hybriden Prozessoren darauf trainiert, Pingpong zu spielen. Durch die Verbindung lebendiger Neuronen und siliziumbasierter Mikrochips sollen die hybriden Prozessoren später zu energieeffizienten, robusten und skalierbaren Recheneinheiten werden, die sich mittels Selbstorganisation optimal auf Rechenaufgaben einstellen können.

Entsprechend steckt auch die Erstellung **biologisch-chemischer Computer** noch in den Kinderschuhen. Zwar wurden die ersten derartigen biologischen Einheiten bereits konzipiert und umgesetzt, jedoch ist ihr Potenzial vorläufig auf die Lösung sehr spezifischer Probleme wie etwa der Berechnung von Quadratwurzeln bis 900 begrenzt.²⁶² Eine Marktreife im Jahr 2030 erachten die Expertinnen und Experten als eher unwahrscheinlich.²⁶³ Die Forschung zu hybriden Prozessoren und Biocomputern zeigt keine klare Wachstumstendenz, sondern unterliegt mittleren jährlichen Schwankungen. Dabei zeigen sich die USA und China als wichtigste Akteure in diesem Forschungsfeld. Deutschland ist international nicht sehr sichtbar aufgestellt.²⁶⁴

Die **Speicherung digitaler Informationen in DNA-Strängen** hat in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt. So konnte kürzlich die Automatisierung des gesamten Prozesses der Speicherung und des Abrufs von digitalen Daten in DNA demonstriert werden. Dies spiegelt sich auch in der Publikationsdynamik wider, die ein stetiges Wachstum der Forschungsaktivität aufweist. Dabei sind die beiden Großmächte USA und China besonders forschungsstark. Von einer einflussreichen Forschung zeugen zudem die Zitationszahlen zu Publikationen aus Großbritannien.²⁶⁵ Seit 2017 wächst die Zahl der Patentveröffentlichungen stark und hat sich seitdem versechzehnfacht. Allerdings ist zu beachten, dass die Aussagekraft der Ergebnisse aufgrund der geringen Gesamtzahl von 62 Patentveröffentlichungen begrenzt ist.

²⁵⁶ Lee, S. (2019). Insbesondere Microsoft und Western Digital fördern dieses Themenfeld aktiv.

²⁵⁷ Vgl. Burger-Kentscher, A. (o. D.). Vgl. das im „BIO Go“-Programm vom BMBF geförderte Unternehmen Dynamic Biosensors GmbH.

²⁵⁸ Vgl. Heiduk, D. (2019).

²⁵⁹ Ergebnisse der Patentanalyse.

²⁶⁰ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

²⁶¹ Vgl. Scheuer, S.; Kerkmann, C. (2018).

²⁶² Vgl. Beiersmann, S. (2020).

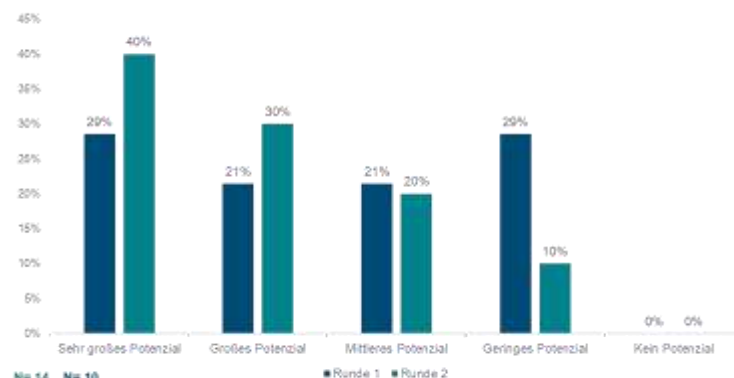
²⁶³ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

²⁶⁴ Ergebnisse der Publikationsanalyse.

²⁶⁵ Ergebnisse der Publikationsanalyse.

Die meisten Patentveröffentlichungen kommen aus den USA und Deutschland.²⁶⁶ Eine Marktreife im Jahr 2030 schätzen die meisten Expertinnen und Experten für eher bis sehr unwahrscheinlich ein.²⁶⁷

Welches Potenzial haben Biosensoren, zur Entgrenzung der Biologie des Menschen beizutragen?



Biosensoren sind bereits weitgehend etabliert. Derzeit werden sie vor allem zur Messung von molekularen Vorgängen in der Medizin und Forschung sowie in der Lebensmittelindustrie verwendet. Dass Biosensoren trotz verbreiteter Anwendung ein hohes Potenzial aufweisen, wird u. a. durch die hohe Anzahl an Forschungspublikationen unterstrichen (4.000 Publikationen jährlich). Dabei geht ein Großteil der Forschung auf chinesische Einrichtungen zurück, die mit weitem Abstand

vor den USA das Forschungsgeschehen dominieren.²⁶⁸ Die Entwicklung der Patentaktivitäten ist in den vergangenen Jahren relativ gleichbleibend auf einem hohen Niveau geblieben. Ein Großteil der Patentveröffentlichungen bezieht sich auf Verfahren zum Messen, Testen oder Analysieren von Materialien durch Bestimmung ihrer chemischen oder physikalischen Eigenschaften. Angemeldet werden die Patente vor allem in den USA und in asiatischen Ländern (z. B. Japan und China), gefolgt von der Schweiz und Deutschland. Mit großem Abstand ist die Jinan-Universität in China Hauptanmelderin in dieser Technologie.²⁶⁹ Die Expertinnen und Experten gehen mehrheitlich von einer Marktreife im Jahr 2030 aus.²⁷⁰

Die Integration lebendiger Zellen in mikrofluide Systeme zu **Organs-on-a-Chip** ermöglicht ähnlich den Biosensoren die zielgerichtete Auswertbarkeit der Zustände biologischer Zellverbände. Bereits derzeit können damit wirklichkeitsnahe biologische Umwelten und Funktionen wie etwa der menschlichen Niere imitiert werden. Mit diesen Systemen lassen sich komplexe Zusammenhänge modellieren und Auswirkungen von Arzneien studieren.²⁷¹

Mögliche Entwicklungen in der Zukunft

Zukünftig wären mithilfe von **hybriden Prozessoren** (teil-)lebendige Computer denkbar, die ihre Architektur energieoptimiert der jeweiligen Aufgabe anpassen und mittels paralleler Arbeitsweise der Nervenzellen die Prozessorgeschwindigkeit revolutionieren.²⁷² Die Verwendung lebendiger biologischer Neuronen könnte zudem einen entscheidenden Schritt bei der Weiterentwicklung künstlicher Intelligenz bedeuten. So könnten hybride Prozessoren etwa die breite Verwendung von höhergradigen KI-Methoden bzw. Algorithmen ermöglichen, indem sie den gewaltigen Energiebedarf dank effizienterer Verarbeitung reduzieren und durch die parallele Verarbeitung beschleunigen. Zum anderen könnte die Verwendung biologischer Systeme zu emergentem Verhalten und damit genereller künstlicher Intelligenz führen. Die Forschungslinie zur grundlegenden Verbindung biologischer Neuronen und Mikrochips steht hier in enger Verbindung mit der Entwicklung direkter Neuron-Elektronik-Schnittstellen für den zukünftigen Einsatz auch im Menschen. Aber auch außerhalb der Anwendung als generelle Recheneinheiten könnte die Leistungsfähigkeit biologischer Neuronen in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Beispielsweise könnten hybride Prozessoren als speziali-

²⁶⁶ Ergebnisse der Patentanalyse.

²⁶⁷ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

²⁶⁸ Ergebnisse der Publikationsanalyse.

²⁶⁹ Ergebnisse der Patentanalyse. Anmerkung: Die Diskrepanz zwischen den einzelnen Anmeldeländern ergibt sich aus der mangelnden Datenlage.

²⁷⁰ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

²⁷¹ etwa technologische Entwicklungen des deutschen Start-ups TissUse GmbH.

²⁷² Vgl. Koetsier, J. (2020).

sierte und energieeffiziente Recheneinheiten zur sensorischen Detektion von Zielmolekülen genutzt werden, damit analoge Zustände angemessen repräsentiert werden.²⁷³ Denkbar wäre etwa die Nutzung solcher lebendigen Systeme in Drohnen in der Agrikultur zur Bestimmung des Erntezeitpunkts oder aber auch bei der Detektion von gefährlichen Stoffen im Militäreinsatz, am Flughafen oder in chemischen Fabriken. Selbst der Gesundheitszustand eines Menschen könnte durch ein spezialisiertes Training der Neuronen auf spezifische Krankheitsmoleküle gemessen werden. Auch in der Pandemiebekämpfung könnten die hybriden Prozessoren zukünftig als Spürhunde auf den Spuren des Coronavirus eingesetzt werden.²⁷⁴ Mit Blick auf das zukünftige Entgrenzungspotenzial sind sich die Expertinnen und Experten überwiegend einig – sie betrachten dieses als eher groß.²⁷⁵

Mit einer Weiterentwicklung von **biologisch-chemischen Computern** und einem Design zur Beschleunigung der Rechenleistung sowie Erweiterung der Problemlösefähigkeit könnte sich das Biological Computing als wichtige Rechenart neben dem elektronischen Rechnen und Quantenrechnen etablieren. Ein preiswerteres, leichter zu synthetisierendes und kleineres Rechensubstrat (DNA-Moleküle vs. Halbleiter) könnte eine neue Transformation der Rechenkapazitäten in der Welt bedeuten. Günstigere, kleinere und parallele Rechenkapazität verspricht insbesondere bei großen Rechenproblemen wie komplexen Routenberechnungen oder bei der Entschlüsselung kryptografisch gesicherter Nachrichten einen Effizienzgewinn. Während ein vollständiges Ablösen elektronischer Computer aufgrund der langsameren und spezifischeren Rechenoperationen unwahrscheinlich erscheint, könnten sich Biocomputer dank ihrer massiven Parallelität und Funktionalität bei Zimmertemperaturen als Alternative zu Quantencomputern durchsetzen.²⁷⁶ Durch ihre biologischen Eigenschaften besitzen sie ein nahezu unbegrenztes und flexibles Skalierungs- und Reorganisationspotenzial, das zudem auf deutlich geringeren Energiekosten und hoch parallelen Rechenschritten basiert. Durch genetische Veränderung könnte eine Vielzahl an Zellarten zu Biocomputern werden und in menschlichen oder tierischen Körper eingesetzt werden. Durch ihre biologische Funktionsweise könnten sie über chemische Reaktionen direkt mit dem menschlichen Körper kommunizieren und beispielsweise den Gesundheitszustand überwachen bzw. die Aktivität des Körpers beeinflussen. Das Biocomputing stellt dabei die reliable Möglichkeit der Steuerung auf Nano-Ebene, sodass eine erhöhte Kontrollierbarkeit und zeitsensitive Aktivierung von Nano- und Microbots realisiert werden könnte (siehe „Nano- und Microbots“ im Abschnitt „Smarte medizinische Technologien“ und den Abschnitt „Micro- und Nanobots aus lebendigen Materialien“). Mit Blick auf das Entgrenzungspotenzial sind sich die Expertinnen und Experten eher uneinig, gehen aber vermehrt von einem großen Potenzial aus.²⁷⁷

Die Entwicklung von **Speichermöglichkeiten digitaler Informationen in DNA** könnte sich zukünftige zentrale Vorteile von DNA als Medium wie die Dichte und Langlebigkeit, mit der Daten gespeichert werden können, zunutze machen. So könnten beispielsweise die rasant wachsenden Datenströme kosten- und klimafreundlich verarbeitet werden. Magnetbandbasierte Serverfarmen benötigen derzeit noch riesige Flächen, die unter gewaltigem Energieverbrauch beständig gekühlt werden müssen. Bestehende Trends wie das Internet der Dinge werden die Generierung und den Austausch von Daten voraussichtlich exponentiell anwachsen lassen. Zukünftig könnte die Speicherung von Daten in DNA-Strängen die platzintensiven magnetbandbasierten Serverfarmen ersetzen und so den erwartbaren Zuwachs an Datengenerierung ohne siliziumbasierte Halbleitertechnologie abdecken.²⁷⁸ Mit einer DNA-basierten Speicherung von Daten würden zudem Biocomputing-Technologien an Bedeutung gewinnen. Von dieser Synergie würden insbesondere große unstrukturierte Datenmengen wie Bildmaterial oder Sensordaten profitieren, bei denen auf eine konsequente Verwertung aus Kostengründen verzichtet wurde. Die Expertinnen und Experten sehen ein überwiegend großes Potenzial für eine zukünftige Entgrenzung durch DNA-basierte Datenspeicherung.²⁷⁹

²⁷³ Vgl. Wakefield, J. (2017).

²⁷⁴ Vgl. Hentschel, A. (2020).

²⁷⁵ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

²⁷⁶ Vgl. Loeffler, J. (2019).

²⁷⁷ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

²⁷⁸ Vgl. Lee, S. Y. (2019).

²⁷⁹ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

Biosensoren wird zukünftig eine zentrale Rolle in der Point-of-Care-Diagnostik im menschlichen Körper zugeschrieben, wo sie zur vielfältigen Messung biologischer Daten zum Einsatz kommen könnten. Mit der Entwicklung einfacher Diagnostik-Toolkits könnte die Überwachung von Medikamenteneinnahme und Vitaldaten zunehmend von zu Hause aus und in Echtzeit geschehen.²⁸⁰ Ebenso könnten globale Gesundheitsrisiken und Krankheitsausbrüche durch kostengünstige Biosensoren besser überwacht und durch den weiten Einsatz in der Natur vielleicht sogar präventiv verhindert werden. Über den medizinischen Bereich hinaus ist von einem verstärkten Einsatz von Biosensoren in der Landwirtschaft, Bioproduktion, militärischen Überwachung und zur Qualitätssicherung bei alltäglichen Konsumgütern auszugehen. Biosensoren könnten so das Internet der Dinge um den Informationsfluss aus lebendigen Systemen erweitern.²⁸¹ Bei der Einschätzung des Entgrenzungspotenzials gehen die Meinungen der Expertinnen und Experten auseinander und schwanken zwischen einem sehr großen und einem geringen Entgrenzungspotenzial.²⁸²

Mit **Organs-on-a-Chip** könnte in Zukunft die Medikamentenentwicklung beschleunigt und Tiermodelle verzichtbar werden. Sie könnten zudem zum Design angepasster Medikamente für die personalisierte Medizin genutzt werden.²⁸³ Durch die Einbettung von Zellen einer erkrankten Person könnten verschiedene Medikamente auf ihre Wirksamkeit getestet bzw. angepasst werden, bevor sie im ganzen Körper eingesetzt werden.²⁸⁴

Zukünftiges Entgrenzungspotenzial der Technologien²⁸⁵

Schwachendes zukünftiges Entgrenzungspotenzial			
	Etablierung	Ähnlichkeit (biol. System)	Autonomie
Biosensoren	flächendeckend etabliert (TRL 9)	üblicherweise keine oder geringe Ähnlichkeit	hoch automatisiert bis voll automatisiert
Organs-on-a-Chip	teilweise etabliert (TRL 6 bis 9)	keine oder geringe Ähnlichkeit	hoch automatisiert
DNA-Datenspeicher	wenig etabliert (TRL 4 bis 8)	keine oder geringe Ähnlichkeit	hoch automatisiert bis voll automatisiert
Starkes zukünftiges Entgrenzungspotenzial			
Hybride Prozessoren	wenig etabliert (TRL 4 bis 8)	wesentliche Ähnlichkeit in Funktion	voll automatisiert
Biologische Computer	neuartig (TRL 1 bis 5)	ununterscheidbar	voll automatisiert bis autonom

²⁸⁰ Vgl. Cynober, T. (2020).

²⁸¹ Vgl. Ibrahim, A. U. et al. (2020), S. 2.

²⁸² Ergebnisse der Delphi-Befragung.

²⁸³ Vgl. Heiduk, D. (2019).

²⁸⁴ Vgl. Trietsch, B. (2019).

²⁸⁵ Basis der Einschätzung neben der eigenen Beurteilung: Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten und Ergebnisse der Delphi-Befragung.

Biologisierte Technologie als Produktionsmittel



Biologisierte Technologie als Produktionsmittel

Beschreibung

Im industriellen Bereich werden biologische Komponenten zunehmend für eine Optimierung der Produktionstechnologien und -mittel genutzt.

Technologien

Biofabrikation:

Hierbei wird die biologische Zelle selbst das Produktionssystem bzw. die „Cell-Factory“. Dazu wird der Stoffwechsel der Zelle derartig verändert, dass sie individuell bestimmbare Chemikalien, Brenn- und Wirkstoffe produziert.²⁸⁶ Aber nicht nur die Produktionstechnologie wird biologisch.

Biohybride Materialien:

Hierbei werden auch die Werkstoffe lebendig, aus denen Produkte gefertigt werden. Unter Verwendung verschiedener Methoden werden biologische Zellen und unbelebtes Material verschmolzen, um die Vorteile beider Stoffe zu vereinen.²⁸⁷ Es entstehen beispielsweise sich selbst heilende Grundstoffe, die sich nach ihrem inneren Bauplan selbst aufbauen.

Semiartifizielle Photosynthese-Systeme:

Biologische Zellen werden zu optimierten Akteurinnen und Akteuren der menschlichen Energiegewinnung.

Stand der Forschung

Derzeitiges Anwendungsfeld der **Biofabrikation** ist vor allem die Produktion von biobasierten Materialien und medizinischen Wirkstoffen. Hier sind vielerlei Produktionslinien bereits etabliert.²⁸⁸ Mit Biofabrikation können beispielsweise aufwendige synthetische Verfahren durch genetische veränderte Zellen ersetzt werden, die eine energiearme und kostengünstige Produktion spezifischer synthetischer und biologischer Komponenten durch biologische Prozesse erlauben. Die Forschung im Bereich der Biofabrikation entwickelte sich in den letzten zehn Jahren besonders dynamisch. So vervierfachte sich die Zahl der jährlichen Publikationen zwischen 2010 und 2019 auf 450. Dabei nimmt Deutschland als Forschungsstandort mit dem dritten Platz nach China und den USA eine hervorgehobene Position ein, die sich in ihrer Relevanz über die Jahre halten konnte.²⁸⁹ Die Patententwicklungen bewegten sich insgesamt auf einem eher niedrigeren Niveau, stiegen aber in den vergangenen Jahren an. Die meisten Anmeldungen erfolgen mit Abstand in den USA.²⁹⁰ Die Expertinnen und Experten erachten die Biofabrikation für einen wichtigen Ansatz, der einen bedeutenden Einfluss auf Produktionsketten nehmen könnte. Eine Marktreife dieser Technologie im Jahr 2030 halten sie überwiegend für wahrscheinlich und sehen darin zukünftig auch ein großes Entgrenzungspotenzial. Eine Rolle spielt dabei auch, dass die Technologie vielfältig einsetzbar und skalierbar wäre.²⁹¹

Ein ebenso breites Anwendungsgebiet bieten **biohybride, „lebendige“ Materialien** oder auch „Engineered Living Materials“. Sie befinden sich zurzeit noch in der Grundlagenforschung und demonstrieren in ersten Anwendungen den Wirknachweis. Der Einsatz biologischer Systeme wird auch im Bereich der Energiegewinnung erforscht.

²⁸⁶ Vgl. Wu, Y. et al. (2020). Vgl. Produkte von BASF, Bayer oder AGC Biologics.

²⁸⁷ Vgl. INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien (2020). Vgl. auch die internationale Konferenz zu „Engineered Living Materials“.

²⁸⁸ Vgl. Evolution Bioscience (o. D.).

²⁸⁹ Ergebnisse der Publikationsanalyse.

²⁹⁰ Ergebnisse der Patentanalyse.

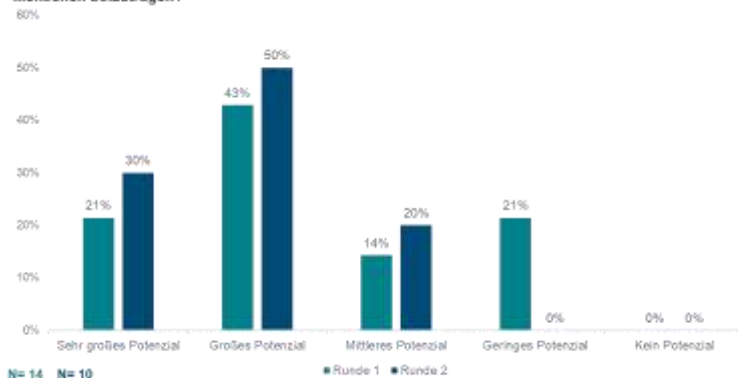
²⁹¹ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

Die **semiartifizialen Photosynthese-Systeme** haben ihre kommerzielle Marktreife noch nicht erreicht.

Mögliche Entwicklungen in der Zukunft

In Zukunft wäre auch ein Einsatz von **Biofabrikation** in der Textilindustrie möglich. Kleidung könnte anstelle eines komplizierten Fertigungsprozesses – vom Baumwollfeld bis zur Webfabrik – direkt von biologischen Zellen produziert und eingefärbt werden.²⁹² Ähnliche Möglichkeiten gäbe es für die Herstellung von Möbeln und Verpackungen. Vorteile der Biofabrikation wie geringere Energiekosten, eine ressourcenschonendere Konfiguration von Produkten und umweltfreundlichere Verfahren ergänzen die Vorteile biologischer Produktkomponenten und machen den Einsatz biologischer Systeme als Produktionsmittel auch in nicht biologischen Anwendungsfeldern wie der Elektronikherstellung denkbar.²⁹³

Welches Potenzial haben Biofabrikation und Bio-Manufacturing, zur Entgrenzung der Biologie/des Menschen beizutragen?



Quelle: Eigene Darstellung Prognos AG und Z_punkt auf Basis der Delphi-Befragung 2020.

nendere Konfiguration von Produkten und umweltfreundlichere Verfahren ergänzen die Vorteile biologischer Produktkomponenten und machen den Einsatz biologischer Systeme als Produktionsmittel auch in nicht biologischen Anwendungsfeldern wie der Elektronikherstellung denkbar.²⁹³

Biohybride lebende Materialien können durch die genetische Veränderung verwendeter Zellen umgebungssensitiv designt werden, sodass sie sich Licht- oder Temperaturverhältnissen anpassen.

In einem zukünftigen Schritt soll das genetische Material der Materialzellen so verändert werden, dass diese als Teil ihres neu programmierten Lebenszyklus nicht nur das gewünschte Material produzieren, sondern durch synthetische Morphogenese, also einem künstlichen Wachstumsprogramm, die Strukturen autonom formen.²⁹⁴ Durch die genetische Veränderung der biologischen Zellen könnten diese beispielsweise dazu programmiert werden, aus lokal vorrätigen Ressourcen vorgegebene dreidimensionale Strukturen zu schaffen und so ganze Gebäude zu errichten. Die Expertinnen und Experten sehen darin auch die Möglichkeit eines intelligenten Facility-Managements durch biohybride Materialien und damit einhergehend in diesen Bereichen auch Veränderungen im Arbeitsmarkt, z. B. durch den Wegfall von Jobs.²⁹⁵ Biohybride, „lebendige“ Materialien könnten sich durch ihre biologische Funktionalität zudem selbst reparieren und sich verändernden Umgebungsbedingungen wie Licht- oder Temperaturschwankungen anpassen. Denkbar wären in Zukunft, entsprechend den Meinungen der Expertinnen und Experten, dann auch selbstreinigende Materialien. Weiter gedacht könnte dies zu einer hygienischeren Umgebung und im besten Falle sogar zu einer Reduzierung von Krankheitserregern führen.²⁹⁶ Neben einer Verwendung als smarte Bauelemente könnten diese Materialien auch für viele weitere Produkte genutzt werden, deren Langlebigkeit und Adaptivität von besonderer Bedeutung ist. Für die weniger komplexen Druckverfahren ist eine Anwendung beispielsweise als individuell angepasste Medizintechnik mit lokal Wirkstoff produzierenden Zellen oder als intelligente Verpackungen von Lebensmitteln zur Detektion von Toxinen angedacht.²⁹⁷ Die Forschung zu biohybriden Materialien zeigt seit 2015 ein größeres Wachstum. Dabei sind die USA und China, aber auch Deutschland wichtige Treiber dieses Trends.²⁹⁸ Die Patentanmeldungen von biohybriden Materialien haben in den vergangenen Jahren bei einem niedrigen Niveau abgenommen. Aufgrund der geringen Zahl an Patenten (49) ist die Aussagekraft der Ergebnisse mit Vorsicht zu bewerten.

²⁹² Vgl. Rodríguez Fernández, C. (2020).

²⁹³ Vgl. Cumbers, J. (2020).

²⁹⁴ Vgl. Nguyen, P. Q. (2018), S. 21.

²⁹⁵ Ergebnisse des Futures-Wheel-Workshops.

²⁹⁶ Ebd.

²⁹⁷ Vgl. MIT News Office (2020).

²⁹⁸ Ergebnisse der Publikationsanalyse.

Nichtsdestoweniger erfolgen relativ gesehen die meisten Anmeldungen in Deutschland und von deutschen Unternehmen.²⁹⁹ Vonseiten der Expertinnen und Experten wird den biohybriden Materialien ein großes Entgrenzungspotenzial zugeschrieben.³⁰⁰

Durch die Verwendung biologischer und synthetischer Komponenten könnten **semiartifizielle Photosynthese-Systeme** Vorteile belebter und unbelebter Materialien wie eine erweiterte Spektralnutzung vereinen. Mit diesen hybriden Modulen könnten in Zukunft effiziente Produktionsanlagen entstehen, die Energie gewinnen, CO₂ aufnehmen und verarbeiten, Medikamente herstellen und Kraftstoffe produzieren.³⁰¹ Mit semiartifiziellen Photosynthese-Systemen könnte so zukünftig bereits ausgestoßenes CO₂ für nützliche Werkstoffe umgewandelt und gleichzeitig die Temperaturerhöhung durch den Klimawandel gemindert werden. Die biohybride Nutzung der Photosynthese könnte sich insbesondere für die Herstellung von Wasserstoff als Kraftstoffquelle der Zukunft eignen. Somit würde die biohybride Photosynthese eine große Rolle in einem ganzheitlichen Konzept aus dezentraler, nachhaltiger und flexibler Energiegewinnung einnehmen.

Zukünftiges Entgrenzungspotenzial der Technologien³⁰²

Schwachestes zukünftiges Entgrenzungspotenzial			
	Etablierung	Ähnlichkeit (biol. System)	Autonomie
Semiartifizielle Photosynthese	wenig etabliert (TRL 4 bis 7)	keine bis geringe Ähnlichkeit	hoch automatisiert bis voll automatisiert
Starkes zukünftiges Entgrenzungspotenzial			
Biofabrikation	in Teilen flächendeckend etabliert (TRL 9), in Teilen wenig etabliert (TRL 4 bis 8)	wesentliche Ähnlichkeit in Form und Funktion bis zur Ununterscheidbarkeit	voll automatisiert
Biohybride Materialien	neuartig (TRL 1 bis 5)	wesentliche Ähnlichkeit in Form und Funktion bis zur Ununterscheidbarkeit	autonom

²⁹⁹ Ergebnisse der Patentanalyse.

³⁰⁰ Ergebnisse der Delphi-Befragung.

³⁰¹ Vgl. Miller, T. E. et al. (2020), S. 649.

³⁰² Basis der Einschätzung neben der eigenen Beurteilung: Ergebnisse der Interviews mit Expertinnen und Experten sowie Ergebnisse der Delphi-Befragung.

5. METHODIK

Die vorliegende Studie stützt sich auf ein breites Methodenrepertoire. Unterschiedliche qualitative und quantitative (Foresight-)Methoden bilden den Grundstein der Analysen. Das Thema wird somit aus verschiedenen Perspektiven betrachtet. Explorative (Foresight-)Methoden und deskriptive Methoden ergänzen sich in diesem Ansatz und bilden somit eine solide empirische Basis für die Studie.

Startpunkt der Studie stellt ein umfassendes **Desk-Research** dar. Ziel dessen war zum einen die Identifikation von biodigitalen Anwendungstechnologien, die zukünftig zu einer Entgrenzung zwischen Technologie und Biologie sowie umgekehrt beitragen könnten. Die Technologien wurden in Kategorien gebündelt und entweder der Dimension „Technologisierung des Menschen“ (insgesamt fünf Kategorien) oder der Dimension „Biologisierung von Technologie“ zugeordnet (insgesamt vier Kategorien). Die weiteren Methoden orientierten sich entsprechend an dieser Systematik. Andererseits beinhaltete das Desk-Research eine Analyse zu relevanten gesellschaftlichen Trends, die die Etablierung und Akzeptanz von Entgrenzungstechnologien vorantreiben könnten. Da keine allgemeingültige Definition von Entgrenzung existiert, diente das Desk-Research auch dazu, Merkmale von Entgrenzung zu bestimmen. Auf dieser Basis wiederum konnte ein Bewertungsschema mit Blick auf das Entgrenzungspotenzial der Anwendungstechnologien entwickelt werden. Ergänzt und validiert wurden die Rechercheergebnisse durch **Interviews mit 15 Expertinnen und Experten** aus unterschiedlichen Disziplinen (siehe Kapitel 8). Ausgehend von den ermittelten Anwendungstechnologien sowie den insgesamt neun Kategorien wurde je Kategorie mindestens eine Technologie, die zukünftig ein starkes Entgrenzungspotenzial entfalten könnte, ausgewählt. Sofern in einer Kategorie keine entsprechende Technologie enthalten war, wurde eine mit einem schwachen Entgrenzungspotenzial ausgewählt. Auf diese Weise wurden insgesamt 22 Technologien selektiert, die als Grundlage für weitere Methoden dienten.

Auf Basis der 22 ausgewählten Technologien wurden eine **Publikations-** und eine **Patentanalyse** durchgeführt. Die Publikationsanalyse wurde mit SCOPUS durchgeführt. Zu jeder Technologie wurden Informationen zu der Größe des Forschungsfelds, d. h. die Zahl der Publikationen, die Publikationsdynamik im Ländervergleich sowie nach Forschenden und die Publikationen nach Fachgebiet ausgewertet. Wenn es sinnvoll war, wurden auch die Zitationen berücksichtigt. Der Betrachtungszeitraum schloss die vergangenen zehn Jahre von 2010 bis 2019 ein. Für die Patentanalyse wurde Espacenet, die Patentsuchmaschine des Europäischen Patentamts (EPA), genutzt. Auch hier wurden Informationen zur Dynamik der technologischen Entwicklungen, d. h. die Anzahl der Patente, Anwendungsfelder nach IPC-Klassen sowie Veränderungen in den vergangenen zehn Jahren, die Länder, in denen die Anmeldung erfolgte, sowie die Anmeldenden betrachtet. Der Betrachtungszeitraum bezog sich auf die Jahre 2010 bis 2019.

Mit dem Ziel, eine erste Schärfung potenzieller Zukunftsbilder, die mit einzelnen Technologien einhergehen, sowie Hinweise zu Emerging Issues und dem potenziellen Einsatz der Technologien im Rahmen künftiger Anwendungsszenarien zu erhalten, wurde eine **Delphi-Befragung** durchgeführt. Ziel war es dabei, eine erhöhte Klarheit über die teilweisen noch diffusen Potenziale, die die Technologien zukünftig entfalten könnten, zu gewinnen. An der Befragung nahmen 17 Expertinnen und Experten teil. Abgefragt wurden die 22 ausgewählten Technologien anhand von klar definierten Fragen, die zumeist geschlossen formuliert waren. Ziel war es, Informationen mit Blick auf die potenzielle Marktreife der Technologien im Jahr 2030, deren Entgrenzungspotenzial sowie zu Herausforderungen und Potenzialen des Einsatzes insgesamt zu erhalten. Um die Ergebnisse der Delphi-Befragung weiter zu vertiefen, wurde ein **Futures-Wheel-Workshop** mit insgesamt zwölf Expertinnen und Experten durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein im Foresight-Bereich weit verbreitetes Brainstorming-Verfahren zur systematischen und kreativen Exploration potenzieller künftiger Auswirkungen von Trends, Ereignissen oder konkreten Technologien. Neben direkten Auswirkungen werden hierbei auch indirekte Folgeeffekte zweiter, dritter oder sogar vierter Ordnung exploriert. Die Kernfrage des Workshops lautete somit: Welche Effekte könnten die Technologien künftig in verschiedenen Lebensbereichen, wie etwa im Arbeits-, Freizeit- oder Bildungsbereich, entfalten? In drei Gruppen wurden jeweils zwei Technologien diskutiert. Die Technologien wurden auf Basis der Ergebnisse der Delphi-Befragung ausgewählt. Die Auswahl erfolgte anhand von zwei primären Kriterien:

- hohes zukünftiges Entgrenzungspotenzial auf Basis der Einschätzung der befragten Expertinnen und Experten
- Diversifizierung in der Auswahl

Zudem wurde darauf geachtet, auch solche Technologien zu berücksichtigen, die mit einer relativ hohen Wahrscheinlichkeit nicht vor dem Jahr 2030 Marktreife erlangen, um in der Diskussion auch Raum für visionäre, aus heutiger Sicht eher spekulative Gedanken zu lassen.

Darüber hinaus wurden insgesamt fünf Technologien im Zuge eines **öffentlichen Workshops mit Bürgerinnen und Bürgern** diskutiert. An dem Workshop nahmen insgesamt zehn Diskutantinnen und Diskutanten teil. Im Fokus der Diskussion standen die folgenden beiden Fragen:

- Welche Formen der Entgrenzung könnten Sie sich persönlich gut in Ihrem Lebensalltag vorstellen?
- Welche Herausforderungen sehen Sie durch die Entgrenzung auf Sie als Einzelnen/als Einzelne und die Gesellschaft als Ganzes zukommen?

Die gebündelten Ergebnisse aller voranstehenden Methoden dienten schließlich als Basis für die Entwicklung von **Anwendungsszenarien**. Ausgehend von den Rahmenbedingungen der sechs Globalszenarien³⁰³ der im Sommer 2020 veröffentlichten Studie zur Zukunft von Wertvorstellungen³⁰⁴ wurde für jedes Szenario erarbeitet, in welchen Lebenskontexten und in welcher Form die einzelnen Technologien zukünftig potenziell Anwendung finden könnten. Betrachtet wurden hierbei vor allem die Bereiche Alltag und Arbeitsleben, Wirtschaft und Forschung sowie die spezifischen politischen Rahmenbedingungen hinsichtlich einer möglichen Entgrenzung.

Die Anwendungsszenarien wurden schließlich im Rahmen eines **Validierungsworkshops** mit zwölf Expertinnen und Experten besprochen. Ziel war es dabei, weitere plausible Formen der Entgrenzung je Szenario zu bestimmen, die Rolle der Zivilgesellschaft und der Profiteure einer Entgrenzung zu diskutieren sowie Herausforderungen und neue Ökosysteme in den einzelnen Szenarien zu identifizieren.

³⁰³ Die sechs Szenarien lauten: Szenario 1 – Der europäische Weg, Szenario 2 – Wettbewerbsmodus, Szenario 3 – Rückkehr der Blöcke, Szenario 4 – Tempounterschiede, Szenario 5 – Das Bonussystem und Szenario 6 – „Ökologische Regionalisierung. In Kapitel 3 werden die Globalszenarien jeweils in einer Kurzversion eingeführt. Die ausführlichen Versionen können in der Studie „Zukunft der Wertvorstellungen in unserem Land“ unter www.vorausschau.de nachgelesen werden.

³⁰⁴ Siehe Prognos AG; Z_punkt GmbH The Foresight Company (2020).

6. GLOSSAR

Aktoren sind Antriebselemente, die elektrische Signale oder Strom in mechanische Bewegung umwandeln und so das Bindeglied zwischen Informationsverarbeitung und Arbeitsprozessen (z. B. Elektromotoren) bilden. Das Gegenstück zu Aktoren bilden Sensoren, welche physische oder chemische Eigenschaften qualitativ oder quantitativ erfassen können.

Artefakte bezeichnen vom Menschen zur Erreichung eines praktischen Zwecks geschaffene Gegenstände. Somit existieren Artefakte nicht von Natur aus, sondern entstehen durch die Veränderung von Materialien durch den Menschen.

Augmented Reality (erweiterte Realität) ist eine computerbasierte Erweiterung der realen Welt. Im Sichtfeld der Nutzerin bzw. des Nutzers werden Informationen, wie etwa Bilder oder Text, eingeblendet. Die Realität wird dabei um virtuelle Elemente erweitert, jedoch nicht ersetzt.

Siehe auch: *Augmented Virtuality, Virtual Reality*

Augmented Virtuality (erweiterte Virtualität) bezeichnet Technologien, bei denen in einer vorrangig virtuellen Welt reale Elemente eingeblendet werden. Auf diese Weise kann beispielsweise Kleidung virtuell anprobiert werden.

Siehe auch: *Augmented Reality, Virtual Reality, Immersion*

Ein **Avatar** ist eine computergenerierte grafische Darstellung, die einer Person nachempfunden ist. Die Abbildung kann in dreidimensionaler Form (beispielsweise in virtuellen Welten) oder in zweidimensionaler Form in Internetforen erfolgen. In virtuellen Umgebungen können diese Darstellungen von der Nutzerin bzw. dem Nutzer gesteuert werden und repräsentieren gewissermaßen eine virtuelle Identität.

Biohacking ist der biologische, chemische oder technische Eingriff in Organismen mit dem Ziel der Veränderung und Verbesserung von diesem. Ziel ist es, neuartige Systeme zu erzeugen, die sich in ihrer belebten und unbelebten Umwelt behaupten. Ein Teilbereich ist das Bodyhacking, bei dem man in den tierischen oder menschlichen Körper eindringt.

Biokompatibilität bezeichnet die Verträglichkeit von nicht lebenden Materialien und Werkstoffen mit lebendem Gewebe. Dies bedeutet, dass diese Materialien bzw. Werkstoffe keine negativen Auswirkungen auf den Stoffwechsel haben.

Biomimetik bezeichnet die Übernahme von Funktionsweisen aus der Natur in menschengemachte Stoffe, Systemen oder Geräten. Ein Beispiel für Biomimetik ist die Entwicklung des Klettverschlusses, welcher auf dem Funktionsprinzip einer Pflanzenart basiert. Biomimetik ist eng mit der Bionik, bei der Funktionsweisen aus der Natur auf Technik übertragen werden, verwandt.

Biotechnologie ist eine interdisziplinäre Wissenschaft, die biologische Systeme und lebende Organismen nutzt, um verschiedene Produkte zu entwickeln oder zu schaffen. Zu diesem breiten Feld gehören u. a. die Genetik, Biochemie und Molekularbiologie.

Siehe auch: *NBIC-Konvergenz*

Ein **Chatbot** ist eine auf künstlicher Intelligenz basierende Software, die ein Gespräch (oder einen Chat) mit einem Benutzer in natürlicher Sprache über Messaging-Anwendungen, Websites, mobile Anwendungen oder das Telefon simulieren kann. Mit Chatbots lassen sich diverse Aufgaben automatisieren. So werden Chatbots beispielsweise von Unternehmen in der Kundenkommunikation (etwa zur Beantwortung einfacher Fragen wie

Öffnungszeiten) eingesetzt.

Siehe auch: *Künstliche Intelligenz*

Eine **Cloud** bezeichnet eine IT-Infrastruktur, die der Nutzerin bzw. dem Nutzer eine internetbasierte Bereitstellung von Software, Rechenleistung oder Speicherplatz bietet. Durch diese zentrale internetbasierte Bereitstellung können Software, Rechenleistung und Speicherplatz genutzt werden, ohne dass diese auf einem lokalen Endgerät installiert sind.

Cyborg ist ein Lebewesen, das technisch ergänzt oder erweitert ist. Ziel dabei ist die Erweiterung oder Steigerung menschlichen Fähigkeiten. Cyborgs sind somit der Human-Enhancement-Bewegung zuzuordnen. Ein verwandtes Phänomen ist Biohacking.

Siehe auch: *Human Enhancement, nicht therapeutisches Enhancement, Transhumanismus, Posthumanismus, Biohacking*

Unter **Edge-Systemen** versteht man die dezentrale Bereitstellung von Rechenleistung und Speicherplatz. Diese Bereitstellung erfolgt möglichst nah am nutzenden Endgerät. Somit bilden die dezentralen Edge-Systeme ein Gegenstück zum zentralistischen Ansatz des Cloud-Computings.

Siehe auch: *Cloud*

Gig-Economy beschreibt einen Teil des informellen Arbeitsmarkts. Beschäftigungsverhältnisse sind dabei vor allem durch zeitliche Befristung und Kurzfristigkeit in der Vergabe gekennzeichnet. Oftmals werden dabei die Kontakte zwischen Arbeitgebenden und Arbeitnehmenden über Online Plattformen hergestellt. Ein bekanntes Beispiel einer solchen Plattform ist Uber.

Human Enhancement beschreibt die Optimierung des Menschen durch Verfahren oder Technologien. Dabei werden Menschen mit Hilfsmitteln, Wirkstoffen oder Körperteilen versorgt bzw. mit Technologien verbunden, um die menschliche Leistungsfähigkeit zu steigern. Dies kann sowohl bei gesunden Menschen (Hinzugewinnen von nicht vorhandenen Stärken) als auch bei kranken Menschen (Ausgleichen von Schwächen) der Fall sein. Dementsprechend wird beim Enhancement-Gedanken oftmals unterschieden zwischen *therapeutischem Enhancement* (der Wiederherstellung des gesundheitlichen Normalzustands) und *nicht therapeutischem Enhancement* (Verbesserungsbestrebungen unabhängig vom gesundheitlichen Zustand). Allerdings sind die Grenzen zwischen diesen beiden Strömungen fließend. Bestrebungen, die menschlichen Fähigkeiten über das gegenwärtig Menschenmögliche hinaus zu steigern, also den tatsächlich aktuellen Möglichkeitsraum zu erweitern, gehen über den reinen Enhancement-Begriff hinaus und werden unter *Transhumanismus* beschrieben.

Siehe auch: *nicht therapeutisches Enhancement, therapeutisches Enhancement, Transhumanismus, Posthumanismus*

Immersion beschreibt im Kontext von Virtual Reality das (vollständige) Eintauchen und Versinken in eine virtuelle Welt. Dabei verliert die Nutzerin bzw. der Nutzer das Bewusstsein, sich in einer künstlichen Welt zu befinden. Je realistischer und überzeugender diese virtuelle Realität gestaltet ist, desto besser gelingt die Immersion.

Siehe auch: *Virtual Reality*

Invasive Technologien beschreiben solche Technologien, bei denen ein Eingriff und somit ein Eindringen in den Körper erforderlich ist. Invasive Technologien befinden sich somit meistens vollständig im Körper. Das Pendant zu den invasiven bilden die nicht invasiven Technologien, die am Körper angebracht sind oder getragen werden.

Kognitionswissenschaften umfassen ein interdisziplinäres Wissenschaftsfeld, welches sich mit der Erforschung kognitiver Fähigkeiten befasst. Kognitive Fähigkeiten umfassen insbesondere Wahrnehmung, Motorik, Lernen, Gedächtnis, Denken und Sprache. Im Mittelpunkt steht bei den Kognitionswissenschaften die (oft-

mals computergestützte) Erforschung und Abbildung neuronaler und kognitiver Prozesse des Gehirns.
Siehe auch: *NBIC-Konvergenz*

Die **Informations- und Kommunikationstechnologie** umfasst sämtliche Technologien, die sich mit der Generierung, Verarbeitung, Nutzung und Übermittlung von Informationen befassen. Technologien, die unter diesen Sammelbegriff fallen, sind beispielsweise Rechner, Softwareanwendungen, Smartphones oder auch Satellitensysteme.

Siehe auch: *NBIC-Konvergenz*

Künstliche Intelligenz bezieht sich auf die Fähigkeit von Maschinen (vor allem von Computersystemen), aus Erfahrung zu lernen, mit neuen Informationen umzugehen und Aufgaben zu bewältigen, welche ein menschenähnliches Denkvermögen voraussetzen. Durch diese Simulation menschlicher Intelligenz können Computer beispielsweise Sprachen erlernen und mit Menschen eine Konversation führen.

Lebende Organismen bzw. Lebewesen umfassen Organismen, die durch verschiedene Merkmale gekennzeichnet sind. Dazu zählen insbesondere die Fähigkeit zur Reproduktion, die Fähigkeit zum Stoff- bzw. Energiewechsel, die Fähigkeit zu wachsen und das Bestehen aus Zellen. Zur Verdeutlichung kann das Beispiel von Viren und Bakterien angeführt werden. Während Bakterien u. a. aufgrund ihrer Fähigkeit zur Reproduktion (durch Zellteilung) und ihres Stoffwechsels zu den lebenden Organismen zählen, zählen Viren aufgrund ihrer fehlenden Fähigkeit zur Reproduktion (erfordert eine Wirtszelle) und ihres fehlenden Stoffwechsels nicht zu den lebenden Organismen.

Siehe auch: *nicht lebende Systeme*

Der **Motorkortex** bildet einen Teil der Großhirnrinde und ist im Frontallappen des Gehirns angesiedelt. Über den Motorkortex werden alle willkürlichen, d. h. nicht reflexhaften, Bewegungen gesteuert.

Nanotechnologien sind Technologien, deren Größe sich im Nanometerbereich bewegt, d. h. zwischen einem und 100 Nanometern. Zur Verdeutlichung: Während ein Virus eine Größe von etwa 100 Nanometern aufweisen kann, haben Atome eine Größe von ungefähr 0,1 Nanometern.

Siehe auch: *NBIC-Konvergenz*

NBIC-Konvergenz fasst die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen der Nano-, Bio-, Informationstechnologie und den Kognitionswissenschaften zusammen. Der Vorteil dieser themenübergreifenden Zusammenarbeit ist, dass sich die Themenbereiche gegenseitig befähigen. Beispielsweise tragen Wissenssprünge in der Nanotechnologie zu Miniaturisierungsanforderungen der Informationstechnologien und somit etwa zur Entwicklung von Nanochips bei.

Siehe auch: *Nanotechnologie, Biotechnologie, Informationstechnologie und Kognitionswissenschaften*

Der **Neokortex** bildet einen Teil der Großhirnrinde. Zuständig ist der Neokortex für eine Vielzahl kognitiver Prozesse, wie etwa der Verarbeitung von Sprache und Emotionen, zuständig. Auch bei Gedächtnis- und Lernprozessen spielt dieser Teil des Gehirns eine Rolle.

Nicht invasive Technologien beschreiben solche Technologien, bei denen ein Eingriff und somit ein Eindringen in den Körper nicht erforderlich ist. Im Gegensatz zu den invasiven Technologien wird die Integrität des menschlichen Körpers verletzt. Somit ist ein Kennzeichen nicht invasiver Technologien, dass diese äußerlich am Körper eingesetzt werden.

Siehe auch: *invasive Technologien*

Nicht lebende Systeme bezeichnen Strukturen, die nicht die Merkmale von Lebewesen erfüllen. Zu diesen Merkmalen gehören u. a. die Fähigkeit zur Reproduktion, die Fähigkeit zum Stoffwechsel bzw. Energiewechsel, die Fähigkeit zu wachsen und das Bestehen aus Zellen.

Siehe auch: *lebende Organismen*

Nicht therapeutisches Enhancement bezeichnet das Erreichen einer Leistungssteigerung bei einem gesunden Menschen. Dies bedeutet, dass (in Abgrenzung zum *therapeutischen Enhancement*) Maßnahmen zur Leistungssteigerung ohne medizinische Notwendigkeit ergriffen werden. Ziel dieser Motivation ist es, den Menschen in die Lage zu versetzen, Dinge, die bereits menschlich möglich sind, noch besser zu tun. Siehe auch: *Human Enhancement, therapeutisches Enhancement, Transhumanismus*

Optogenetik bezeichnet eine Biotechnologie, mittels derer Zellen mit Licht gesteuert werden können. Dabei wird Licht über ein in das Gehirn verlegtes Glasfaserkabel auf eine bestimmte Neuronengruppe geleitet. Durch das Licht werden diese Neuronengruppen stimuliert, wodurch auch das Verhalten eines Individuums beeinflusst werden kann.

Posthumanismus zielt (ähnlich wie der Transhumanismus) auf das Übertreffen von menschlichen Fähigkeiten ab. Während Transhumanismus als eine Art Prozess gesehen werden kann (der Mensch geht über seine Grenzen hinaus), wird durch Posthumanismus ein Zustand beschrieben. Durch den Transhumanismus ergeben sich posthumane Wesen, die sich derart verändert haben, dass sie nicht mehr als biologische Menschen gezählt werden können.

Siehe auch: *Transhumanismus, Human Enhancement, Cyborg*

Reversibilität bezeichnet hier die Umkehrbarkeit der Verknüpfung einer Technologie mit dem Menschen. Der Grad der Reversibilität kann dabei von Technologie zu Technologie stark variieren. Während beispielsweise die Verknüpfung des Menschen mit Smart Glasses durch einfaches Abnehmen der Brille erfolgen kann, erfordern invasive Technologien, wie etwa sensorische Neuroprothesen, einen aufwendigen und risikobehafteten chirurgischen Eingriff.

Siehe auch: *invasive Technologien*

Im Mittelpunkt des ***therapeutischen Enhancement*** (als Teil des *Human Enhancement*) steht der Einsatz von Technologien aufgrund einer vorliegenden medizinischen Indikation. So soll die Gesundheit einer Person bewahrt oder wiederhergestellt werden. Ein wesentlicher Unterschied zum *nicht therapeutischen Enhancement* ist, dass mithilfe technischer Hilfsmittel Fähigkeiten ermöglicht werden, die die Menschheit grundsätzlich bereits besitzt. Ziel ist es, einen betroffenen Menschen im Vergleich zu seiner vorangegangenen Kondition zu verbessern und seine eingeschränkten Fähigkeiten zu steigern.

Siehe auch: *Human Enhancement, nicht therapeutisches Enhancement*

Unter ***Transhumanismus*** versteht man eine philosophische Strömung. Obgleich diese keiner allgemein anerkannten Definition folgt, lassen sich darunter Bestrebungen zum Übertreffen menschlicher Fähigkeiten durch den Einsatz von Technologie zusammenfassen. In Abgrenzung zum nicht ,therapeutischen Enhancement sollen etwa bestehende Fähigkeit nicht bloß gesteigert werden, sondern der Mensch soll in die Lage versetzt werden, neue Eigenschaften und Fähigkeiten (beispielsweise durch die Erweiterung der Sinneswahrnehmung) über das normal mögliche Maß zu erreichen. So stellt eines der Hauptziele der Transhumanisten die Überwindung menschlicher Körperlichkeit dar. Obwohl diese Strömung insbesondere in den USA viele Anhänger hat, lassen sich auch in Deutschland Befürworterinnen und Befürworter finden, wie die Gründung der Transhumanen Partei Deutschland im Jahr 2015 zeigt.

Siehe auch: *nicht therapeutisches Enhancement, Human Enhancement, Posthumanismus*

Virtual Reality (virtuelle Realität) bezeichnet eine dreidimensionale, computergenerierte Abbildung der Realität. Nutzerinnen und Nutzer können in die Umgebung dieser virtuellen Realität eintauchen, diese erforschen und mit dieser interagieren.

Siehe auch: *Augmented Reality, Augmented Virtuality, Immersion*

7. QUELLENVERZEICHNIS

Aguilar, W. et al. (2014). The past, present, and future of artificial life. *Frontiers in Robotics and AI*. Online unter: <https://froese.files.wordpress.com/2014/10/aguiar-et-al-14-the-past-present-and-future-of-artificial-life.pdf> (Stand: 07.12.2020).

AOK Nordost (o. D.). Der AOK-Bonus-Wahltarif für alle, die gesund und aktiv leben. Online unter: <https://www.aok.de/pk/nordost/inhalt/der-wahltarif-fuer-alle-die-gesund-und-aktiv-leben-5/> (Stand: 03.12.2020).

Appiah, C. et al. (2019). Living Materials Herald a New Era in Soft Robotics. *Advanced Materials*. Online unter: <https://www.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.201807747> (Stand: 03.12.2020).

Arbeitsgemeinschaft Tiefe Hirnstimulation (o. D.). Webseite für Patienten zur Behandlungsmethode Tiefe Hirnstimulation: Die Anwendungsmöglichkeiten, die Operation sowie Vorsorge- und Nachsorgemaßnahmen nach der Operation werden beschrieben. Online unter: <https://www.uniklinikum-dresden.de/de/das-klinikum/kliniken-polikliniken-institute/nch/spezialgebiete-erkrankungen/tiefenhirnstimulation> (Stand: 08.12.2020).

ARD (2020). EXIT (Video). Online unter: <https://www.daserste.de/unterhaltung/film/filmmittwoch-im-ersten/sendung/exit-106.html> (Stand: 03.12.2020).

Asche, S. (2018). Stark dank Technik. *VDI nachrichten*. Online unter: <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/stark-dank-technik/> (Stand: 26.11.2020).

Automationspraxis (2019). World Robotics Report der IFR: China schwierig, Cobot wenig. Online unter: <https://automationspraxis.industrie.de/news/world-robotics-report-der-ifr-china-schwierig-cobot-wenig/> (Stand: 02.10.2020).

Automationspraxis (2020). Fanuc investiert in US-Greifer Start-up Soft Robotics. Online unter: <https://automationspraxis.industrie.de/news/fanuc-investiert-in-us-greifer-start-up-soft-robotics/> (Stand: 27.11.2020).

Badische Zeitung (2018). In China übernehmen auch Roboter die Erziehung im Kindergarten. Online unter: <https://www.badische-zeitung.de/in-china-uebernehmen-auch-roboter-die-erziehung-im-kindergarten--157465461.html> (Stand: 27.11.2020).

Beck, U. (1986). *Risikogesellschaft – Auf dem Weg in eine andere Moderne* (S. 206–210). Frankfurt am Main: Suhrkamp.

Becker, M. (2019). Transhumanismus: Von der Technikverehrung zur Mythologie (Interview mit dem Biologen und Philosophen Max Schnetker). *Telepolis*. Online unter: <https://www.heise.de/tp/features/Transhumanismus-Von-der-Technikverehrung-zur-Mythologie-4467072.html> (Stand: 01.10.2020).

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

Beiersmann, S. (2020). Im Reagenzglas: DNA-Computer errechnet Quadratwurzel aus 900. ZDNet. Online unter: <https://www.zdnet.de/88375303/im-reagenzglas-dna-computer-errechnet-quadratwurzel-aus-900/> (Stand: 25.11.2020).

Bellicoso, C. D. et al. (2018). Advances in real-world applications for legged robots. Journal of Field Robotics, 35(8), S. 1311–1326. Online unter: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rob.21839> (Stand: 03.12.2020).

Benabid, A. L. et al. (2019). An exoskeleton controlled by an epidural wireless brain–machine interface in a tetraplegic patient: a proof-of-concept demonstration. The Lancet Neurology, 18(12), S. 1112–1122.

Benedikter, R. (2019). Künstliche Intelligenz und Neurowissenschaften. Futuristische Entwicklungen: Brain-Brain-Interfaces. Online unter: <https://www.kas.de/documents/252038/4521287/Künstliche+Intelligenz+und+Neurowissenschaften.pdf/63fc974-2757-565f-dd48-8273fccc23c?version=1.0&t=1575898258780> (Stand: 07.12.2020).

Bhat, A. (2014). Nanobots: The future of medicine. International Journal of Engineering and Management Sciences. Online unter: https://www.researchgate.net/publication/277475210_Nanobots_The_future_of_medicine (Stand: 07.12.2020).

Bitkom e. V. (Hrsg.) (2019). Zukunft der Consumer Technology – 2019. Marktentwicklung, Trends, Mediennutzung, Technologien, Geschäftsmodelle. Online unter: https://www.bitkom.org/sites/default/files/2019-09/190903_ct_studie_2019_online.pdf (Stand: 21.01.2020).

BMBF (2020). Bekanntmachung im Rahmen der Strategie der Bundesregierung zur Internationalisierung von Wissenschaft und Forschung. Richtlinie zur Förderung von Vorhaben der strategischen Projektförderung mit Südkorea unter der Beteiligung von Wissenschaft und Wirtschaft („2 + 2“-Projekte) zu den Themen „Robotik“ und „Leichtbau/Carbon“, Bundesanzeiger vom 01.10.2020. Online unter: <https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-3169.html> (Stand: 26.11.2020).

BMBF (2020). Richtlinie zur Förderung von Forschungsvorhaben zur Bioökonomie für „Zukunftstechnologien für die industrielle Bioökonomie: Schwerpunkt Biohybride Technologien“ im Rahmen der Nationalen Bioökonomiestrategie, Bundesanzeiger vom 04.02.2020. Online unter: <https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-2841.html> (Stand: 03.12.2020).

BMW i (2020). Smart-Living-Monitor. Online unter: https://www.smart-living-germany.de/SL/Redaktion/DE/Publikationen/2020_03_25_Smart-Living-Monitor2020-Vollfassung.html (Stand: 27.11.2020).

Braeseke, G. et al. (2019). Einsatz von robotischen Systemen in der Pflege in Japan mit Blick auf den steigenden Fachkräftebedarf. Abschlussbericht für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMW i). IGES Institut. https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/einsatz-von-robotischen-systemen-pflege-japan.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (Stand: 26.11.2020).

Brunker, M. (2016). Microsoft and University of Washington researchers set record for DNA storage. Microsoft – The AI Blog. Online unter: <https://blogs.microsoft.com/ai/synthetic-dna-storage-milestone/> (Stand: 03.12.2020).

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).

Burden, D.; Savin-Baden, M. (2019). Virtual humans: Today and tomorrow. CRC Press.

Bylda, P. (2016). Das digitale Tattoo. Saarbrücker Zeitung. Online unter https://www.saarbruecker-zeitung.de/sz-spezial/internet/das-digitale-tattoo_aid-1344809 (Stand: 26.10.2020).

Cabahug, M. (2018). Adaptive Assistance for Improved Well-Being and Productivity at Work. SAP. Online unter: <https://news.sap.com/2018/10/sap-emotiv-adaptive-assistance-well-being-productivity-work/> (Stand: 30.10.2020).

Chadwick, L. (2020). Schweden. Sind Mikrochip-Implantate in der Hand bald Normalität in Europa? Euronews. Online unter: <https://de.euronews.com/2020/05/13/sind-mikrochip-implantate-bald-realitaet-in-europa> (Stand: 02.10.2020).

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).

Chang, T. M. S. (1997). Blood Substitutes: Principles, Methods, Products and Clinical Trials. Karger Landes Systems.

CNN (2019). Justin Bieber: From YouTube to global superstar. Online unter: <https://edition.cnn.com/2019/03/26/entertainment/gallery/justin-bieber/index.html> (Stand: 02.10.2020).

Coenen, C. et al. (2009). Human Enhancement Study. European Parliament, Science and Technology Options Assessment. Online unter: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2009/417483/IPOL-JOIN_ET\(2009\)417483_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2009/417483/IPOL-JOIN_ET(2009)417483_EN.pdf) (Stand: 07.12.2020).

Collinger, J. L. et al. (2013). High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia. The Lancet, 381(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. Forbes. 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/> (Stand: 26.11.2020).

Cynober, T. (2020). Biosensors: Monitoring Our Health Anywhere, Anytime. Labiotech.eu. Online unter: <https://www.labiotech.eu/in-depth/biosensors-health-monitoring/> (Stand: 25.11.2020).

Dang, S. (2019). Artificial Intelligence In Humanoid Robots. Forbes. Online unter: <https://www.forbes.com/sites/cognitiveworld/2019/02/25/artificial-intelligence-in-humanoid-robots/?sh=3ed5f2c124c7> (Stand: 27.11.2020).

Deloitte (2020). Extended Reality Studie 2020: Marktanalyse und Prognose. Online unter: <https://www2.deloitte.com/de/de/pages/technology-media-and-telecommunications/articles/extended-reality-xr-studie-2020.html> (Stand: 27.11.2020).

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: 25.11.2020).

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/publikationen/1501_dermuehl/index.html (Stand: 07.12.2020).

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: 23.10.2020).

Deutsches Ärzteblatt (2016). Rabatte und Belohnungen: Generali startet Bonus-Programm. Online unter: <https://www.aerzteblatt.de/nachrichten/69259/Rabatte-und-Belohnungen-Generali-startet-Bonus-Programm> (Stand: 25.11.2020).

Deutsches Ärzteblatt (2019). Ethikrat diskutiert ethische Herausforderungen der Robotik in der Pflege. Online unter: <https://www.aerzteblatt.de/nachrichten/104169/Ethikrat-diskutiert-ethische-Herausforderungen-der-Robotik-in-der-Pflege> (Stand: 03.12.2020).

Die Bundesregierung (o. D.). Website zur Strategie künstliche Intelligenz (KI) der Bundesregierung. Online unter: <https://www.ki-strategie-deutschland.de/home.html> (Stand: 03.12.2020).

DIN e. V. (2020). Ethik und Künstliche Intelligenz: Was können technische Normen und Standards leisten? Online unter: <https://www.din.de/de/forschung-und-innovation/partner-in-forschungsprojekten/ki/ethik-und-kuenstliche-intelligenz-was-koennen-technische-normen-und-standards-leisten--322016> (Stand: 11.11.2020).

Dogterom, M. et al. (2016). Building a Synthetic Cell – thoughts on a future H2020 FET Flagship initiative. Online unter: <https://www.syntheticcell.eu/wp-content/uploads/2017/03/vision-document-flagship-SyntheticCell4Europe-WEB.pdf> (Stand: 23.11.2020).

Donahue, M. Z. (2017). How a Color-Blind Artist Became the World's First Cyborg. National Geographic. Online unter: <https://www.nationalgeographic.com/news/2017/04/worlds-first-cyborg-human-evolution-science/> (Stand: 01.10.2020).

Drummond, N. M.; Chen, R. (2020). Deep brain stimulation and recordings: Insights into the contributions of subthalamic nucleus in cognition. NeuroImage. Online unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1053811920307862?via%3Dihub> (Stand: 11.11.2020).

Due, B. L. (2014). The future of smart glasses: An essay about challenges and possibilities with smart glasses. Department of Nordic Studies and Linguistics, University of Copenhagen. Online unter: https://circd.ku.dk/images/An_essay_about_the_future_of_smart_glasses.pdf (Stand: 25.09.2020).

Dunning, H. (2019). Researchers build artificial cells that sense and respond to their environment. Imperial College London. Online unter: <https://www.imperial.ac.uk/news/192207/researchers-build-artificial-cells-that-sense/> (Stand: 25.11.2020).

Eckhardt, A. et al. (2011). Human Enhancement. TA-Swiss 56/2011. Zürich: Vdf.

Eich, C.; Bleckmann, A.; Paul, T. (2005). Percussion pacing in a three-year-old girl with complete heart block during cardiac catheterization. British Journal of Anaesthesia. Online unter: [https://bjanaesthesia.org/article/S0007-0912\(17\)34960-7/pdf](https://bjanaesthesia.org/article/S0007-0912(17)34960-7/pdf) (Stand: 08.12.2020).

Elliesen, M. (2016). Influencer vermarkten „Nachhaltigkeit“: Die Öko-Einflüsterer. Die Tageszeitung (taz). Online unter: <https://taz.de/Influencer-vermarkten-Nachhaltigkeit/!5493712/> (Stand: 03.12.2020).

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.biofaction.com/wp-content/uploads/2012/04/FINAL_REPORT_MPL.pdf (Stand: 20.08.2020).

EU-Recycling (2019). Weniger Lebensmittelabfälle: Gas-Sensoren könnten das Haltbarkeitsdatum ersetzen. Online unter: <https://eu-recycling.com/Archive/23925> (Stand: 03.12.2020).

Evolution Bioscience (o. D.). The Future of Biomanufacturing. Online unter: <https://evolution-bio.com/the-future-of-biomanufacturing/> (Stand: 26.11.2020).

Fanta, A.; Rudl, T. (2020). EU plant großen Wurf. Das Plattformgrundgesetz. netzpolitik.org. Online unter: <https://netzpolitik.org/2020/eu-plattformgrundgesetz-digital-services-act/> (Stand: 03.12.2020).

Fellmann, M.; Krause T. (2015). Was gibt's denn da zu gucken? Süddeutsche Zeitung. Online unter: <https://sz-magazin.sueddeutsche.de/wissen/was-gibt-s-denn-da-zu-gucken-81086> (Stand: 07.12.2020).

Le Feuvre, R. A.; Scrutton, N. S. (2018). A living foundry for synthetic biological materials: a synthetic biology roadmap to new advanced materials. Synthetic and Systems Biotechnology, 3(2), S. 105–112. Online unter: <https://europepmc.org/article/PMC/5995479> (Stand: 08.12.2020).

Fischer, L. (2019). Anabolika im Freizeitsport. Aggressiv, impotent und haarig. Zeit Online. Online unter: <https://www.zeit.de/wissen/gesundheit/2019-07/anabolika-doping-amateursport-razzia-onlinehandel> (Stand: 02.10.2020).

Fratzl, P. et al. (2019). Materialforschung: Impulsgeber Natur: Innovationspotenzial biologisch inspirierter Materialien und Werkstoffe. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. Online unter: <https://www.acatech.de/projekt/biologisierte-materialforschung-erforschung-des-innovationspotenzials-der-biologisierung-in-den-material-und-werkstoffwissenschaften/> (Stand: 08.12.2020).

Fraunhofer (2016). Gemeinsam mit Bürgern Zukunftstechnologien entwickeln. Wie wir 2053 leben wollen. Online unter: https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/presse-medien/2016/Juli/ForschungKompakt/fk_07_2016_IAO_Wie-wir-2053-leben-wollen.pdf (Stand: 11. 11. 2020).

Fraunhofer IPT (o. D.). Smart Glasses in der Produktion. Schneller und effizienter mit der Datenbrille. Online unter: <https://www.ipt.fraunhofer.de/de/trendthemen/industrie40/smartglasses.html> (Stand: 25.09.2020).

Fraunhofer IZM (2020). Krankheiten ohne Medikamente heilen. Online unter https://www.izm.fraunhofer.de/de/news_events/tech_news/krankheiten-ohne-medikamente-heilen.html (Stand: 25.09.2020).

Gaskell, A. (2019). Technology Isn't Destroying Jobs, But Is Increasing Inequality. Forbes. Online unter: <https://www.forbes.com/sites/adigaskell/2019/05/03/technology-isnt-destroying-jobs-but-is-increasing-inequality/?sh=6dffce385e78> (Stand: 03.12.2020).

Gebhardt, T. (2020). Technologietrends 2020: Human Augmentation – Was bereits möglich und was noch Zukunftsmusik ist. Spectrum. Online unter: <https://newsroom.spectrum-ag.de/technologietrends-2020-human-augmentation/> (Stand: 20.08.2020).

Gorgey, A. S. (2018). Robotic exoskeletons: The current pros and cons. World Journal of Orthopedics, 9(9). S. 112–119. Online unter: https://www.researchgate.net/publication/327729910_Robotic_exoskeletons_The_current_pros_and_cons (Stand: 08.12.2020).

Graf, P.; Wirsching, S. (2013). Regenerative Medizin. Selbstheilungskraft des Körpers verstehen und nutzen. BMBF. Online unter: https://www.bmbf.de/upload_filestore/pub/regenerative_medizin.pdf (Stand: 23.10.2020).

Griffin, M. (2018). Scientists turned live bacteria into the world's first biological computer. Fanatical Futurist. Online unter: <https://www.fanaticalfuturist.com/2018/05/scientists-turned-a-living-bacteria-into-the-worlds-first-biological-computer/> (Stand: 27.11.2020).

Gujral, R. (2019). The Future Of AI: How Emotion AI Is Making Robots Smarter. Forbes. Online unter: <https://www.forbes.com/sites/theyec/2019/07/17/the-future-of-ai-how-emotion-ai-is-making-robots-smarter/?sh=25b0eb7946c9> (Stand: 25.11.2020).

Gutierrez, B.; Bermúdez, C. V.; Ureña, Y. R. C. (2017). Nanobots: development and future. International Journal of Biosensors & Bioelectronics, 2(5), S. 146–151. Online unter: <https://medcraveonline.com/IJBSE/nanobots-development-and-future.html> (Stand: 08.12.2020).

Haarmann, J. (2017). Roboter als "Pflanzenbaumeister". Quarks. Online unter: <https://www1.wdr.de/wissen/natur/pflanzenroboter-paderborn-100.html> (Stand: 03.12.2020).

Hackl, C. (2020). Marketing To Robots: Why CMOs Need To Start Thinking About Business To Robot To Consumer (B2R2C). Forbes. Online unter: <https://www.forbes.com/sites/cathyhackl/2020/06/14/marketing-to-robots-why-cmos-need-to-start-thinking-about-business-to-robot-to-consumer-b2r2c/?sh=7663e54c21b1> (Stand: 24.11.2020).

Hanson Robotics (o. D.). Sophia. Online unter: <https://www.hansonrobotics.com/sophia/> (Stand: 25.11.2020).

Harari, Y. (2017). Homo Deus – Eine Geschichte von Morgen. München: C.H. Beck.

Hartlmaier, B. (2018). Mit einer VR-Gehirnschnittstelle könnte Facebook 2029 zu Ready Player One werden. GQ-Magazin. Online unter: <https://www.gq-magazin.de/auto-technik/article/mit-einer-vr-gehirnschnittstelle-koennte-facebook-2029-zu-ready-player-one-werden> (Stand: 20.09.2020).

Heiduk, D. (2019). Organ-on-a-chip – Organe im Miniaturformat. Medica Magazin. Online unter: https://www.medica.de/de/News/Thema_des_Monats/Ältere_Themen_des_Monats/Themen_des_Monats_2019/Organ-on-a-chip/Organ-on-a-chip_-_Organe_im_Miniaturformat (Stand: 25.11.2020).

Heise, G.; Starkey, L. (2014). Künstliches Blut aus dem Labor. Deutsche Welle. Online unter <https://www.dw.com/de/künstliches-blut-aus-dem-labor/a-17704704> (Stand: 23.10.2020).

Hentschel, A. (2020). Mit Biochips gegen Corona. Schneller als jeder Test: Dieser Sensor soll Covid-Kranke erschnüffeln. Focus. Online unter: https://www.focus.de/digital/dldaily/mit-biochips-gegen-corona-schneller-als-jeder-test-dieser-sensor-kann-covid-krank-erschnueffeln_id_12607886.html (Stand: 25.11.2020).

Hofmann, R. (2018). Entstehung der Grünen. Planet Wissen. Online unter: https://www.planet-wissen.de/geschichte/deutsche_geschichte/entstehung_der_gruenen/index.html (Stand: 26.11.2020).

Honey, C. (2018). Biobots, die Wesen der Zukunft. Hannoversche Allgemeine. Online unter: <https://www.haz.de/Nachrichten/Wissen/Uebersicht/Biobots-die-Wesen-der-Zukunft> (Stand: 27.11.2020).

Hornyak, T. (2019). Insanely humanlike androids have entered the workplace and soon may take your job. CNBC. Online unter: <https://www.cnbc.com/2019/10/31/human-like-androids-have-entered-the-workplace-and-may-take-your-job.html> (Stand: 25.11.2020).

Hubschmid, M.; Voss, O. (2017). Influencer-Marketing. Das lukrativste Hobby der Welt. Der Tagesspiegel. Online unter: <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/influencer-marketing-das-lukrativste-hobby-der-welt/20065718.html> (Stand: 02.10.2020).

Human Brain Project (o. D.). Homepage des Human Brain Project der Europäischen Kommission: Das Projekt soll sämtliches Wissen über das Gehirn bündeln und dieses mittels Computer nachbilden. Online unter: <https://www.humanbrainproject.eu/> (Stand: 22.10.2020).

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://rd.springer.com/article/10.1007/s11042-020-09010-5> (Stand: 08.12.2020).

IG Metall (2018). 1956–2018. Die Tariferfolge der IG Metall. Online unter: <https://www.igmetall.de/ueber-uns/geschichte/die-tariferfolge-der-ig-metall> (Stand: 02.10.2020).

Immersive Learning News (2020). Touch Sense Will Make VR Indistinguishable From Reality. Online unter: <https://www.immersivelearning.news/2020/10/21/touch-sense-will-make-vr-indistinguishable-from-reality/> (Stand: 27.11.2020).

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

Inglehart, R. (1977). The Silent Revolution: Changing Values and Political Styles among Western Publics. Princeton: Princeton University Press.

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: 30.11.2020).

International Federation of Robotics (2018): Robotisierung im Vergleich. Online unter: <https://de.statista.com/infografik/13676/roboterdichte-in-der-fertigungsindustrie/> (Stand: 12.04.2022).

Jelkmann, W. (2016). Features of Blood Doping. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 67, S. 255–262. Online unter: https://www.germanjournalsportsmedicine.com/fileadmin/content/archiv2016/Heft_11/Review_Jelkmann_Features_Blood_Doping_2016-11.pdf (Stand: 08.12.2020).

Jiang, L. et al. (2019). BrainNet: A Multi-Person Brain-to-Brain Interface for Direct Collaboration Between Brains. Scientific Reports. Online unter: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-41895-7> (Stand: 07.12.2020).

Jugend forscht (2019). Mikrofasern – Gefahr aus der Waschmaschine? 2.0. Online unter: <https://www.jugend-forscht.de/projektdatenbank/mikrofasern-gefahr-aus-der-waschmaschine-20.html> (Stand: 03.12.2020).

Kahn, J. (2020). A startup is building computer chips using human neurons. Fortune. Online unter: <https://fortune.com/2020/03/30/startup-human-neurons-computer-chips/> (Stand: 27.11.2020).

Kawamoto, H., Kamibayashi, K., Nakata, Y., Yamawaki, K., Ariyasu, R., Sankai, Y., ... & Ochiai, N. (2013). Pilot study of locomotion improvement using hybrid assistive limb in chronic stroke patients. *BMC neurology*, 13(1), S. 1-8.

Kehl, C. (2016). TA-Projekt: Mensch-Maschine-Entgrenzungen. Maschinenmenschen, Menschmaschinen: Science-Fiction oder realistische Möglichkeit? Online unter: https://www.its.kit.edu/downloads/tab-brief/tb045_kehl15b.pdf (Stand: 19.08.2020).

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.its.kit.edu/pub/v/2016/keco16a.pdf> (Stand: 08.12.2020).

KIT (2020). Mikrobielle Cyborgs: Bakterien als Stromlieferanten. Online unter: http://www.kit.edu/kip/pi_2020_033_mikrobielle-cyborgs-bakterien-als-stromlieferanten.php (Stand: 03.12.2020).

Koetsier, J. (2020). AI Startup Combines Mouse Neurons With Silicon Chips To Make Computers Smarter, Faster. Forbes. Online unter: <https://www.forbes.com/sites/johnkoetsier/2020/05/30/ai-startup-combines-mouse-neurons-with-silicon-chips-to-make-computers-smarter-faster/#241848124050> (Stand: 23.11.2020).

Krauter, R. (2015). Clevere Pillen. Elektronische Kapseln setzen Arzneimittel gezielt frei. Deutschlandfunk. Online unter: https://www.deutschlandfunk.de/clever-pillen-elektronische-kapseln-setzen-arzneimittel.676.de.html?dram:article_id=313877 (Stand: 08.12.2020).

Krüger-Brand, H. (2020). Robotik in der Pflege: Ethikrat sieht großes Potenzial. Deutsches Ärzteblatt. Online unter: <https://www.aerzteblatt.de/archiv/213177/Robotik-in-der-Pflege-Ethikrat-sieht-grosses-Potenzial> (Stand: 26.11.2020).

Kuhlmann, U. (2020). Neon: Mein digitaler Freund, der Avatar? heise online. Online unter: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Neon-Mein-digitaler-Freund-der-Avatar-4630237.html> (Stand: 03.12.2020).

Lamarche-Toloza, A. (2020). Digital humans, virtual humans, digital doubles ... what's the difference? Virtuals. Online unter: <https://virtuals.co/digital-humans-virtual-humans-differences-overview/> (Stand: 24.11.2020).

Läsker, K. (2019). TUI-Manager über Mikrochip-Implantate. „Der Chip ist Teil meines Körpers geworden“ (Interview mit dem TUI-Nordic-Geschäftsführer Alexander Huber). Der Spiegel (Online). Online unter: <https://www.spiegel.de/karriere/schweden-tui-mitarbeiter-tragen-mikrochips-unter-der-haut-a-1287060.html> (Stand: 24.11.2020).

Lee, S. (2019). Why „Biofabrication“ is the next industrial revolution (Video). TED. Online unter: https://www.ted.com/talks/suzanne_lee_why_biofabrication_is_the_next_industrial_revolution#t-166793 (Stand: 27.11.2020).

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).

Lenzen, M. (2016). Gehirn-Computer-Schnittstellen. Mit der Kraft der Gedanken. Spektrum der Wissenschaft. Online unter: <https://www.spektrum.de/news/gehirn-computer-schnittstellen-werden-alltagstauglicher/1398145> (Stand: 20.11.2020).

Lewis, R. (2017). Maschinensicherheit im Kontext Industrie 4.0 – Die Maschine zum Anziehen – Exo-Skelette. ReWalk Robotics GmbH. Online unter: https://www.dguv.de/medien/fb-holzundmetall/veranst/dokumente/2017/20170706_lewis.pdf (Stand: 07.12.2020).

Lin, C.-T. et al. (2010). Review of Wireless and Wearable Electroencephalogram Systems and Brain-Computer Interfaces – A Mini-Review. Gerontology, 56, S. 112–119. Online unter: https://www.researchgate.net/publication/26704074_Review_of_Wireless_and_Wearable_Electroencephalogram_Systems_and_Brain-Computer_Interfaces_-_A_Mini-Review (Stand: 08.12.2020).

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).

Lomas, N. (2019). Europe should ban AI for mass surveillance and social credit scoring, says advisory group. TechCrunch. Online unter: <https://techcrunch.com/2019/06/26/europe-should-ban-ai-for-mass-surveillance-and-social-credit-scoring-says-advisory-group/> (Stand: 03.12.2020).

Mändlen, L. (2019). Das ist: der 18-Jährige, der Mikroplastik aus dem Wasser filtern will. Jetzt. Online unter: <https://www.jetzt.de/das-ist/fionn-ferreira-erfindet-mit-18-jahren-methode-zum-filtern-von-mikroplastik> (Stand: 03.12.2020).

Marsiske, H.-A. (2019). Wann kommen Laufroboter in der richtigen Welt? heise online. Online unter: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Wann-kommen-Laufroboter-in-der-richtigen-Welt-4431016.html> (Stand: 23.11.2020).

Martins, N. R. B. et al. (2019). Human Brain/Cloud Interface. Frontiers in Neuroscience. Online unter: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2019.00112/full> (Stand: 07.12.2020).

Mathwig, K. (o. D.). Mind Uploading – Neue Substrate für den menschlichen Geist? Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik Halle. Online unter: <https://www.jdzb.de/fileadmin/Redaktion/PDF/veroeffentlichungen/tagungsbaende/D57/13-p1184%20mathwig.pdf> (Stand: 08.12.2020).

Mau, S. (2017). Das metrische Wir: Über die Quantifizierung des Sozialen. Berlin: Suhrkamp.

Max-Planck-Gesellschaft (2020). Energy for artificial cells. Researchers make the proton pump of the respiratory chain work in an artificial polymer membrane. Online unter: <https://www.mpg.de/15213523/polymer-membrane-respiratory-chain> (Stand: 25.11.2020).

Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme (o. D.). Mobile Microrobots. Online unter: https://pi.is.mpg.de/research_fields/mobile-microrobots (Stand: 26.11.2020).

MDR Wissen (2015). Künstliche Organe – Ersatzteile für den Menschen. Neue Entwicklungen in der regenerativen Medizin. Online unter: <https://www.mdr.de/wissen/kuenstlicheorgane130.html> (Stand: 23.10.2020).

MDR Wissen (2020). Seuchen und Pandemien: Die meisten Zoonosen sind menschengemacht. Online unter: <https://www.mdr.de/wissen/umwelt/seuchen-pandemien-zoonosen-immer-mehr-tiere-uebertragen-krankheiten-100.html> (Stand: 26.11.2020).

Mielke, J. (2016). Nanotechnologie. Roboter im Blut. Pharmazeutische Zeitung. Online unter: <https://www.pharmazeutische-zeitung.de/ausgabe-472016/roboter-im-blut/> (Stand: 23.10.2020).

Miller, T. E. et al. (2020). Light-powered CO₂ fixation in a chloroplast mimic with natural and synthetic parts. Science. Online unter: <https://science.sciencemag.org/content/368/6491/649.full> (Stand: 07.12.2020).

Mimee, M. et al. (2018). An ingestible bacterial-electronic system to monitor gastrointestinal health. Science. Online unter: <https://science.sciencemag.org/content/360/6391/915.full> (Stand: 07.12.2020).

MIT News Office (2020). Audio explainer: Exploring the fields of bioprinting and biohybrid materials (Interview mit der Forscherin Rachel Smith vom MIT Media Lab). Online unter: <https://news.mit.edu/2020/audio-explainer-bioprinting-biohybrid-materials-0123> (Stand: 24.11.2020).

Müller-Jung, J. (2017). Das güldene E-Tattoo. Japans Handreichung für den digitalen Himmel. Frankfurter Allgemeine Zeitung. Online unter: <https://www.faz.net/aktuell/wissen/medizin-ernaehrung/japanische-wissenschaftler-stellen-elektronische-tattoos-vor-15110740.html> (Stand: 26.10.2020).

MÜNCHNER KREIS e. V.; Bertelsmann Stiftung (Hrsg.) (2020). Zukunftsstudie: Leben, Arbeit, Bildung 2035+. Durch Künstliche Intelligenz beeinflusste Veränderungen in zentralen Lebensbereichen. Online unter: https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/user_upload/2020_Zukunftsstudie_MK_Band_VIII_Publikation.pdf (Stand: 02.10.2020).

Münchener Merkur (2019). Jeder Fünfte in Deutschland ist tätowiert. Online unter: <https://www.merkur.de/leben/gesundheit/jeder-fuenfte-in-deutschland-ist-taetowiert-zr-13033955.html> (Stand: 02.10.2020).

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).

Nguyen, P. Q. et al. (2018). Engineered living materials: prospects and challenges for using biological systems to direct the assembly of smart materials. Advanced Materials, 30(19, Special Issue: Bioinspired Materials).

Niller, E. (2018). Bionic Limbs ‚Learn‘ to Open a Beer. Deep learning is helping to make prosthetic arms behave more naturally. Wired. Online unter: <https://www.wired.com/story/bionic-limbs-learn-to-open-a-beer/> (Stand: 08.12.2020).

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 (Stand: 07.12.2020).

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

Park, E. (2019). Unter Cyborgs. Wenn Mensch und Maschine zusammenwachsen (Audiodatei). Deutschlandfunk Nova. Online unter: <https://www.deutschlandfunknova.de/beitrag/cyborgs-mensch-und-maschine-wachsen-zusammen> (Stand: 12.10.2020).

Parsch, S. (2018). Wie Roboter dem Menschen ähnlicher werden. Der Spiegel (Online). Online unter: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/wie-roboter-dem-menschen-aehnlicher-werden-a-1199161.html> (Stand: 27.11.2020).

Paulus, W. (2009). Transkranielle Magnet- und Gleichstromstimulation. Deutsches Ärzteblatt. Online unter: <https://www.aerzteblatt.de/archiv/63518/Transkranielle-Magnet-und-Gleichstromstimulation> (Stand: 07.12.2020).

Perlmutter, J. S.; Mink, J. W. (2006). Deep Brain Stimulation. Annual Review of Neuroscience. Online unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16776585/> (Stand: 07.12.2020).

Perrin, A. (2019). Digital gap between rural and nonrural America persists. Pew Research Center. Online unter: <https://www.pewresearch.org/fact-tank/2019/05/31/digital-gap-between-rural-and-nonrural-america-persists/> (Stand: 03.12.2020).

Perryer, S. (2019). Medical research is conducted in developing countries to avoid ethics legislation. The New Economy. Online unter: <https://www.theneweconomy.com/strategy/medical-research-is-conducted-in-developing-countries-to-avoid-ethics-legislation> (Stand: 03.12.2020).

Pham, U. et al. (2015). Personality Changes after Deep Brain Stimulation in Parkinson's Disease. Parkinson's Disease, 29, S. 1–7. Online unter: <https://paperity.org/p/153798968/personality-changes-after-deep-brain-stimulation-in-parkinsons-disease> (Stand: 08.12.2020).

Pinker, A. (2020). Mojo Vision entwickelt smarte Kontaktlinsen für Augmented Reality. Medialist. Online unter: <https://medialist.info/2020/01/17/mojo-vision-entwickelt-smarte-kontaktlinsen-fuer-augmented-reality/> (Stand: 11.11.2020).

Pooler, M. (2019). 3D printing offers hope of building human organs from scratch. The Financial Times. Online unter: <https://www.ft.com/content/eabb0e00-9755-11e9-98b9-e38c177b152f> (Stand: 23.10.2020).

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 (Stand: 17.01.2022).

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

Reil, J. (2017). Neue Studie zur Körpermodifikation. Psychologin: „Narzissmus der kleinen Differenzen“ (Interview mit der Psychologin Ada Borkenhagen). Deutschlandfunk. Online unter: https://www.deutschlandfunk.de/neue-studie-zur-koerpermodifikation-psychologin-narzissmus.807.de.html?dram:article_id=396858 (Stand: 02.10.2020).

Renn, O. (2017). Mensch-Maschine-Entgrenzung. Die politische Meinung. Online unter: https://www.kas.de/documents/252038/253252/7_dokument_dok_pdf_50416_1.pdf/128ea201-cfc3-3ffb-0475-6277ee65dc94 (Stand: 20.08.2020).

Robert Koch-Institut (2012). Demografische Alterung und Folgen für das Gesundheitswesen. Online unter: https://www.rki.de/DE/Content/Gesundheitsmonitoring/Gesundheitsberichterstattung/GBEDownloadsK/2012_2_Demografischer_Wandel_Alterung.pdf?__blob=publicationFile (Stand: 30.09.2020).

Robitzski, D. (2020). Scientists Create Living Factories That Churn Out Hydrogen Fuel. Futurism. Online unter: https://futurism.com/the-byte/living-factories-churn-hydrogen-fuel?mc_eid=743e97978e&mc_cid=36327c8866 (Stand: 03.12.2020).

Roco, M. C.; Bainbridge, W. S. (Hrsg.) (2003). Converging Technologies for Improving Human Performance – Nanotechnology, Biotechnology, Information and Cognitive Science. Dordrecht: Springer.

Rodríguez Fernández, C. (2020). How Biotechnology Is Changing the Way We Make Clothes. Labiotech.eu. Online unter: <https://www.labiotech.eu/industrial/biofabrication-fashion-industry/> (Stand: 26.11.2020).

Rößler, N. (2019). Soziale Pflege-Roboter setzen sich nur langsam durch. Deutschlandfunk. Online unter: https://www.deutschlandfunk.de/zukunft-der-pflege-soziale-pflege-roboter-setzen-sich-nur.724.de.html?dram:article_id=441372 (Stand: 27.11.2020).

Sandberg, A.; Bostrom, N. (2008). Whole Brain Emulation: A RoadMap. Future of Humanity Institute, Oxford University. Online unter: <https://www.fhi.ox.ac.uk/brain-emulation-roadmap-report.pdf> (Stand: 02.10.2020).

Sarkar, S. (2009). Artificial Blood. Indian Journal of Critical Care Medicine, 12(3), S. 140–144. Online unter: <http://www.bioline.org.br/pdf?cm08029> (Stand: 07.12.2020).

Savage, M. (2018). Thousands Of Swedes Are Inserting Microchips Under Their Skin. National Public Radio. Online unter: <https://www.npr.org/2018/10/22/658808705/thousands-of-swedes-are-inserting-microchips-under-their-skin?t=1606234690571> (Stand: 14.11.2020).

Savin-Baden, M.; Burden, D. (2019). Digital Immortality and Virtual Humans. Postdigital Science and Education, 1, S. 87–103. Online unter: <https://paperity.org/p/200054150/digital-immortality-and-virtual-humans> (Stand: 07.12.2020).

Scheuer, S.; Kerkmann, C. (2018). Sie saugen die Wohnung und mähen den Rasen – Roboter übernehmen den Haushalt. Handelsblatt. Online unter: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/it-medien/haushaltsroboter-sie-saugen-die-wohnung-und-maehen-den-rasen-roboter-uebernehmen-den-haushalt/22992774.html> (Stand: 27.11.2020).

Schieritz, M.; Rohwetter, M. (2020). Sollten wir nur vier Tage arbeiten? Die Zeit. Online unter: <https://www.zeit.de/2020/36/viertagewoche-arbeitszeit-pro-contra-realistisch> (Stand: 02.10.2020).

Schimank, U. (2012). Individualisierung der Lebensführung. Bundeszentrale für politische Bildung. Online unter: <https://www.bpb.de/politik/grundfragen/deutsche-verhaeltnisse-eine-sozialkunde/137995/individualisierung-der-lebensfuehrung> (Stand: 30.09.2020).

Schüler, H.-P. (2015). Industrie 4.0: Mit autonomen Maschinen zur Losgröße 1. heise online. Online unter: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Industrie-4-0-Mit-autonomen-Maschinen-zur-Losgroesse-1-2608810.html> (Stand: 01.10.2020).

Schulte, A. (o. D.). Soft Robots – Die weiche (R)Evolution der Maschinen. Fraunhofer INT. Online unter: <https://www.int.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/corporate-technology-foresight/Newsletter2.html> (Stand: 27.11.2020).

Schumacher, T. (2019). Paradigmenwechsel in der Krankenversicherung. Börsen-Zeitung. Online unter: <https://www.boersen-zeitung.de/index.php?li=1&artid=2019122804> (Stand: 25.11.2020).

Schumann, F. (2020). Forscher bauen erstmals lebende Roboter. Tagesspiegel. Online unter: <https://www.tagesspiegel.de/wissen/programmierbare-organismen-forscher-bauen-erstmal-lebende-roboter/25427952.html> (Stand: 27.11.2020).

Science Daily (2019). Researchers build microscopic biohybrid robots propelled by muscles, nerves. Online unter: <https://www.sciencedaily.com/releases/2019/09/190916160826.htm> (Stand: 08.12.2020).

scinexx (2005). Künstliches Blut. Die sichere Alternative. Online unter: <https://www.scinexx.de/dossierartikel/kuenstliches-blut/> (Stand: 08.12.2020).

Sheehan, P. (o. D.). ADvanced Acclimation and Protection Tool for Environmental Readiness (ADAPTER). Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). Online unter: <https://www.darpa.mil/program/advanced-acclimation-and-protection-tool-for-environmental-readiness> (Stand: 23.10.2020).

Siebenhaar, H.-P. (2020). Künstliche Intelligenz. EU-Parlament will Überregulierung von KI verhindern. Handelsblatt. Online unter: <https://www.handelsblatt.com/politik/international/kuenstliche-intelligenz-eu-parlament-will-ueberregulierung-von-ki-verhindern/26281962.html?ticket=ST-6247074-GIYIbjvFFJ0TNtpbhozz-ap5> (Stand: 03.12.2020).

Siepe, L. (2013). Den Menschen verbessern. Spektrum der Wissenschaft. Online unter: <https://www.spektrum.de/magazin/den-menschen-verbessern/1188738> (Stand: 08.12.2020).

Slaghuys, B. (2017). Warum reicht Zufriedenheit im Job nicht mehr aus? Die Welt. Online unter: <https://www.welt.de/wirtschaft/bilanz/article163194513/Warum-reicht-Zufriedenheit-im-Job-nicht-mehr-aus.html> (Stand: 02.10.2020).

Snow, J. (2019). This time, with feeling: Robots with emotional intelligence are on the way. Are we ready for them? PBS. Online unter: <https://www.pbs.org/wgbh/nova/article/robots-emotional-intelligence/> (Stand: 25.11.2020).

Solokov, M. (2019). Virtual influencer trends: an overview of the industry. The Drum. Online unter: <https://www.thedrum.com/opinion/2019/12/05/virtual-influencer-trends-overview-the-industry> (Stand: 03.12.2020).

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.maschinenmarkt.vogel.de/humanoide-roboter-werden-zu-vielseitigen-helfern-a-545355/> (Stand: 26.11.2020).

Spehr, M. (2018). Diese Technik geht unter die Haut. Frankfurter Allgemeine Zeitung. Online unter: <https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/digital/biohacking-technik-geht-unter-die-haut-15703106-p2.html> (Stand: 17.10.2020).

Stake, M.; Bartmann, M. (2019). Enhancement. Deutsches Referenzzentrum für Ethik in den Biowissenschaften. Online unter: <http://www.drze.de/im-blickpunkt/enhancement/der-begriff-2019-enhancement2019> (Stand: 02.10.2020).

Statista (2020a). Absatz von Wearables in Deutschland in den Jahren 2016 bis 2019 und Prognose bis 2022 (in Millionen Stück). Online unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/551366/umfrage/absatz-von-wearables-in-deutschland/> (Stand: 30.09.2020).

Statista (2020b). Durchschnittliche Anzahl der katholischen Gottesdienstbesucher in Deutschland von 1950 bis 2019 (in Millionen). Online unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2637/umfrage/anzahl-der-katholischen-gottesdienstbesucher-seit-1950/> (Stand: 01.10.2020).

Statistisches Bundesamt (2019). Bevölkerung im Erwerbsalter sinkt bis 2035 voraussichtlich um 4 bis 6 Millionen. Online unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2019/06/PD19_242_12411.html (Stand: 29.09.2020).

Statistisches Bundesamt (2020). 23 % der Internetnutzerinnen und -nutzer verwenden Smart Watches, Fitnessarmbänder und Co. Online unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2020/PD20_39_p002.html (Stand: 03.12.2020).

Statistisches Bundesamt (o. D.). Erwerbstätige und Erwerbstätigenquote nach Geschlecht und Alter 2009 und 2019 – Ergebnisse des Mikrozensus. Online unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Erwerbstaetigkeit/Tabellen/erwerbstaechtige-erwerbstaetigenquote.html?nn=206552> (Stand: 29.09.2020).

Stewart, D.; Casey, M.; Wigginton, C. (2019). Robots on the move: Professional service robots set for double-digit growth. Deloitte. Online unter: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/technology/technology-media-and-telecom-predictions/2020/professional-service-robots.html> (Stand: 24.11.2020).

Sustainable Nano (2018). How can graphene nanotechnology improve smart contact lenses? Online unter: <https://sustainable-nano.com/2018/03/14/graphene-nanotechnology-smart-contact-lenses/> (Stand: 30.11.2020).

SWR (2020). Science meets Fiction – Künstliche Intelligenz im Film „Exit“ | SWR (Video). Online unter: <https://www.youtube.com/watch?v=w-Hr7bYqWwE> (Stand: 29.10.2020).

Tagesschau (2019). Tele-Notarzt. Online unter: <https://www.tagesschau.de/multimedia/sendung/tt-6865.html> (Stand: 12.04.2022)

Tagesschau (2020a). Lebenserwartung in Deutschland. Im Ländle lebt man länger. Online unter: <https://www.tagesschau.de/inland/lebenserwartung-109.html> (Stand: 29.09.2020).

Tagesschau (2020b). Zahlen 2019. Kirchengaustritte auf historischem Höchststand. Online unter: <https://www.tagesschau.de/inland/anstieg-kirchengaustritte-101.html> (Stand: 01.10.2020).

Tan, V. (2017). Neuroprosthetics: Medicine of the future. MIMS Today. Online unter: <https://today.mims.com/neuroprosthetics-medicine-of-the-future> (Stand: 27.10.2020).

TED (2014). Bereit für das hybride Denken? (Video). Ray Kurzweil; TED 2014. Online unter: https://www.ted.com/talks/ray_kurzweil_get_ready_for_hybrid_thinking?language=de (Stand: 07.12.2020).

TEDx Talks (2015). Human brain to brain communication has arrived (Video). Giulio Ruffini; TEDxBarcelona. Online unter: <https://www.youtube.com/watch?v=biFWsOIE5OQ> (Stand: 07.12.2020).

The Future of Humanoid Robots (o. D.). Discover. Online unter:
<https://www.discovermagazine.com/technology/the-future-of-humanoid-robots> (Stand: 27.11.2020).

The Medical Futurist (2018). Digital Tattoos Make Healthcare More Invisible. Online unter:
<https://medicalfuturist.com/digital-tattoos-make-healthcare-more-invisible/> (Stand: 26.10.2020).

Thimm, N. M. (2020). Die Zukunft des Computers ist analog. Capital. Online unter:
<https://www.capital.de/wirtschaft-politik/die-zukunft-des-computers-ist-analog> (Stand: 03.12.2020).

Thoma-Widmann, N. (o. D.). Fühlende Prothesen. Freiburger Forscher haben Elektroden entwickelt, die Menschen mit Amputationen beim Greifen helfen. Die Technische Fakultät, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Online unter: <https://www.tf.uni-freiburg.de/de/forschung/fuehlende-prothesen> (Stand: 07.12.2020).

Trietsch, B. (2019). The future of Organ-On-A-Chip. Global Engage. Online unter: <https://www.global-engage.com/life-science/future-of-organ-on-a-chip/> (Stand: 25.11.2020).

Ullrich, W. (2019). Konsum als Arbeit. Pop-Zeitschrift. Online unter: <https://pop-zeitschrift.de/2019/04/01/konsum-als-arbeit-von-wolfgang-ullrich01-4-2019/> (Stand: 02.10.2020).

Umweltbundesamt (2020). Umweltbewusstsein und Umweltverhalten. Online unter:
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/umweltbewusstsein-umweltverhalten#das-umweltbewusstsein-in-deutschland> (Stand: 26.11.2020).

Universität Freiburg (2019). Fühlende Prothesen – Thomas Stieglitz (Video). Online unter:
https://www.youtube.com/watch?v=pmHR_HkwDRA (Stand: 07.12.2020).

VDI (2020). Smart Factory und Gesundheit. Exoskelett für den Job: leichter heben und arbeiten. Online unter
<https://www.vdi.de/news/detail/exoskelett-fuer-den-job-leichter-heben-und-arbeiten> (Stand: 25.09.2020).

Vincent, J. (2020). Boston Dynamics will now sell any business its own Spot robot for \$74,500. The Verge. Online unter: <https://www.theverge.com/21292684/boston-dynamics-spot-robot-on-sale-price> (Stand: 25.11.2020).

Wakefield, J. (2017). TEDGlobal: The computer that can smell explosives. BBC. Online unter:
<https://www.bbc.com/news/technology-40935771> (Stand: 25.11.2020).

Wandelbots (2020). Die Vor- und Nachteile der Automation durch Roboter. Online unter:
<https://wandelbots.com/die-vor-und-nachteile-der-automation-durch-roboter/> (Stand: 27.11.2020).

Waschinski, G. (2018). Deutsche wollen sich nicht von Robotern pflegen lassen. Handelsblatt. Online unter:
<https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/gesundheit-deutsche-wollen-sich-nicht-von-robotern-pflegen-lassen/23219778.html> (Stand: 26.11.2020).

WDR (2014). Mensch 2.0. Online unter:
https://www.wdr.de/tv/applications/fernsehen/wissen/quarks/pdf/Q_Mensch_2.0_video.pdf (Stand 12.04.2022)

WDR 5 (2020). Zukunftsweisend? – Die Optimierung des Körpers (Audiodatei). Online unter:
<https://www1.wdr.de/mediathek/audio/wdr5/wdr5-das-philosophische-radio/audio-zukunftsweisend---die-optimierung-des-koerpers-100.html> (Stand: 20.08.2020).

Webster-Wood, V. (2016). Biohybrid robots built from living tissue start to take shape. The Conversation. Online unter: <https://theconversation.com/biohybrid-robots-built-from-living-tissue-start-to-take-shape-62759> (Stand: 27.11.2020).

von der Weiden, S. (2017). Ein Antrieb für Nanobots. VDI nachrichten. Online unter: <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/ein-antrieb-fuer-nanobots/> (Stand: 23.10.2020).

Weinberger, N.; Reisch, S.; Sahrai, E. (2012). ITA-Monitoring „Soziale Voraussetzungen von Bestrebungen zu technischem Enhancement menschlicher Fähigkeiten“. Karlsruhe: ITAS. Online unter: <http://www.itas.fzk.de/deu/lit/epp/2012/weua12-pre01.pdf> (Stand: 27.11.2020).

Wenzel, S.; Schwarz, T. (2020). Organe züchten. Planet Wissen. Online unter: <https://www.planet-wissen.de/gesellschaft/medizin/organverpflanzung/pwieorganezuechten100.html> (Stand: 18.11.2020).

WHO (2020). Blood safety and availability. Online unter: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/blood-safety-and-availability> (Stand: 23.10.2020).

WHO (o. D.a). eHealth at WHO. Online unter: <https://www.who.int/ehealth/about/en/> (Stand: 30.09.2020).

WHO (o. D.b). Transplantation. WHO Task Force on Donation and Transplantation of Human Organs and Tissues. Online unter: <https://www.who.int/transplantation/donation/taskforce-transplantation/en/> (Stand: 23.10.2020).

Wolf, C. (2019). Doping im E-Sport. Virtuelles Spiel, echte Drogen. Spektrum der Wissenschaft. Online unter: <https://www.spektrum.de/news/virtuelles-spiel-echte-drogen/1608174> (Stand: 03.12.2020).

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 (Stand: 08.12.2020).

Wyss Institute (o. D.). Soft Exosuits for Lower Extremity Mobility. Online unter: <https://wyss.harvard.edu/technology/soft-exosuits-for-lower-extremity-mobility/> (Stand: 03.12.2020).

Yeung, J. (2020). Meet the xenobot: world's first living, self-healing robots created from frog stem cells. CNN. Online unter: <https://edition.cnn.com/2020/01/13/us/living-robot-stem-cells-intl-hnk-scli-scn/index.html> (Stand: 03.12.2020).

Zeit Online (2019). Prognose. Zahl der Kirchenmitglieder halbiert sich bis 2060. Online unter: <https://www.zeit.de/news/2019-05/02/zahl-der-kirchenmitglieder-halbiert-sich-bis-2060-190502-99-52816> (Stand: 01.10.2020).

Zeit Online (2020). Dannenröder Forst. Umweltaktivisten besetzen hessische Landesvertretung in Berlin. Online unter: <https://www.zeit.de/gesellschaft/zeitgeschehen/2020-10/dannenroeder-forst-a49-ausbau-umweltaktivisten-hessische-landesvertretung-waldrodung> (Stand: 26.11.2020).

Zhang, S. et al. (2019). Human Mind Control of Rat Cyborg's Continuous Locomotion with Wireless Brain-to-Brain Interface. Scientific Reports, 9. Online unter: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-36885-0/tables/> (Stand: 08.12.2020).

Zhao, W.; Xu, T. (2020). Preliminary engineering for *in situ in vivo* bioprinting: a novel micro bioprinting platform for *in situ in vivo* bioprinting at a gastric wound site. Biofabrication, 12(4).

Zinner, F. (2019). Die Kontaktlinse, die mitdenkt. MDR Wissen. Online unter:
<https://www.mdr.de/wissen/smart-kontaktlinse-erfolgreich-getestet-100.html> (Stand: 25.09.2020).

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).

8. ANHANG

Übersicht über die Interviewpartnerinnen und -partner sowie Workshopteilnehmerinnen und -teilnehmer

Dr. Norbert Alzmann	Dissertation zu ethischen und rechtlichen Voraussetzungen von Tierversuchen in den Neurowissenschaften, Lehrstuhl für Ethik in den Biowissenschaften an der Universität Tübingen; Universitätsassistent an der Abteilung Ethik der Mensch-Tier-Beziehung des Messerli Forschungsinstituts an der Universität Wien
Dominik Baumann	Mitarbeiter und Doktorand am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme
Prof. Dr. Dr. Dr. Roland Benedikter	Co-Leiter des EURAC Research Center for Advanced Studies in Bozen und Professor am Willy-Brandt-Zentrum der Universität Breslau/Wrocław; mehrere Beiträge zum Thema künstliche Intelligenz und Neurowissenschaften
Prof. Dr. Birgit Beck	Juniorprofessorin und Fachgebietsleiterin des Fachgebiets „Ethik und Technikphilosophie“ an der TU Berlin
Thomas Le Blanc	Vorstand der Stiftung Phantastische Bibliothek Wetzlar sowie Autor (Science-Fiction), Herausgeber, Publizist, Kulturberater; Schwerpunkte: u. a. Entgrenzung des Menschen
Dipl.-Pol. Christopher Coenen	Forschungsgruppenleiter „Gesundheit und Technisierung des Lebens“ am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS); Schwerpunkte: gesellschaftliche, ethische, andere philosophische, historische, kulturelle und politische Aspekte insbesondere neuer und emergierender Technowissenschaften in Berührungs- oder Überschneidungsbereichen von Biologie und Technik
Cornelia Daheim	Foresight-Expertin u. a. in den Bereichen Zukunft der Arbeit, Energie, Mobilität, Ernährung, gesellschaftlicher Wandel und Unternehmerin (Future Impacts Consulting)
Dr. Karim Fathi	Mitglied der European School of Governance und wissenschaftlicher Mitarbeiter in Teilzeit an der Europa-Universität Viadrina Frankfurt (Oder); Mitglied der Forschungsgruppe ethisch-ökologisches Rating; Schwerpunkte: u. a. Entgrenzung des Menschen

Dr. Anna Fricke	Kuratorin für Malerei, Skulptur, Medienkunst, zeitgenössische Kunst am Museum Folkwang in Essen; Kuratorin der Ausstellung „Der montierte Mensch“ im Museum Folkwang vom 8. November 2019 bis zum 15. März 2020, die den Blick auf das Verhältnis zwischen Mensch und Technik in den letzten 120 Jahren richtete
Prof. Dr. med. Dr. phil. Orsolya Friedrich	Juniorprofessorin am Institut für Philosophie/Medizinethik der Fernuniversität Hagen
Prof. Dr. rer. nat. Dr. phil. Sigrid Graumann	Mitglied im Deutschen Ethikrat; Schwerpunkte: Biomedizin, Bioethik und Behinderungen sowie sozialetische Fragen biomedizinischer Forschung und Praxis
Prof. Dr. Armin Grunwald	Inhaber des Lehrstuhls für Technikphilosophie und Technikethik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) sowie Leiter des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB)
Dr. phil. Caroline Hack	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Geschichte und Ethik der Medizin der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Dr. Christoph Kehl	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag); Schwerpunkte: u. a. Bio- und Neurotechnologien, Robotik/KI, Umwelt und Nachhaltigkeit
Dr. Matthias Krischel	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geschichte, Theorie und Ethik der Medizin der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf; Schwerpunkte: u. a. Geschichte und Ethik der Humangenetik
Dr. phil. Jacqueline Lemm	Lehrstuhl- und Projektmanagerin am Lehrstuhl für Soziologie an der RWTH Aachen mit dem Schwerpunkt Technik- und Organisationssoziologie
Prof. Dr. Gesa Lindemann	Professorin für Soziologie, Institut für Soziologie an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg und Mitglied des wissenschaftlichen Beirats der Zeitschrift „Ethik in der Medizin“
Dr. rer. nat. Moritz Julian Maier	Mitarbeiter am Fraunhofer IAO Center for Responsible Research and Innovation CeRRI
Friedhelm Meier	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Systematische Theologie II (Ethik) an der Theologischen Fakultät der Eberhard Karls Universität Tübingen
Prof. Dr. Oliver Müller	Philosophisches Seminar an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und Exzellenzcluster BrainLinks-BrainTools; Schwerpunkte: u. a. Philosophische Anthropologie, Technikphilosophie, Naturphilosophie, philosophische Reflexion aktueller Technologien und Mensch-Maschine-Interaktionen
M.A. Lukas Nehlsen	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Sozialphilosophie und Ethik im Gesundheitswesen der Universität Witten/Herdecke

M.Sc. Psych. Mai Anh Nguyen	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl Marketing und Personalmanagement der Technischen Universität Darmstadt
Dr. Martin Peters	Leiter des Clusters Werkstoffchemie am Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gernot R. Müller-Putz	Leiter des Instituts für Neurotechnik an der Universität Graz; Laboratorium für Brain-Computer Interfaces
Enno Park	Vorsitzender von Cyborg e. V., Informatiker und Technikphilosoph, selbst ein Cyborg
Dr.-Ing. Daniel Renjewski	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Angewandte Mechanik an der Technischen Universität München; Schwerpunkte: u. a. humanoide Robotik
Prof. (apl.) Dr. med. Christian Rupp	Oberarzt (Interdisziplinäres Endoskopiezentrum Heidelberg)
Julia Sellig	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Soziologie mit Schwerpunkt Techniksoziologie und nachhaltige Entwicklung
Joshua Steib	Jugendbotschafter der Evangelischen Akademie Tutzingen
Dr. Joachim Steinbrück	Ehemaliger Landesbehindertenbeauftragter in Bremen
Prof. Dr. Thomas Stieglitz	Professur für Biomedizinische Mikrotechnik an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg; Schwerpunkte: u. a. Neuroprothetik
Prof. Dr. rer. nat. Martina Schraudner	Vorständin der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Schwerpunkte: u. a. Biologie, Biotechnologie, Technik, Gender
Prof. Dr. Christine Selhuber-Unkel	Fachbereich Chemie; Institute for Molecular Systems Engineering an der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg; Schwerpunkte: u. a. biohybride Robotik
Dr. Marco Tamborini	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Philosophie an der Technischen Universität Darmstadt; Fachgebiet: Philosophie und Geschichte der Wissenschaften und Technowissenschaften
Dr. Nicole Thiemer	Wissenschaftliche Mitarbeiterin und geschäftsführende Leiterin der Wilhelm-Schapp-Forschungsstelle an der Technischen Universität Kaiserslautern; Fachgebiet: Philosophie
Dr. Tatjana Noemi Tömmel	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Philosophie, Literatur-, Wissenschafts- & Technikgeschichte der Technischen Universität Berlin; Fachgebiet: Ethik und Technikphilosophie
Dr. Matthias Uhl	Leiter der Nachwuchsforschungsgruppe „Ethik der Digitalisierung“ am Lehrstuhl für Wirtschaftsethik der Technischen Universität München

Dr. Nils-Frederic Wagner	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz; Koordinator des Masterstudiengangs Medizinethik
Gabi Waldhof	Doktorandin an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg am Lehrstuhl für Wirtschaftsethik; Schwerpunkte: u. a. Einfluss von Moral und Gruppendynamiken auf Einstellungen zu neuen Technologien, moralische Werte und moralische Emotionen in der Gentechnikdebatte
Prof. Dr. Thomas Zeilinger	Beauftragter der Evang.-Luth. Kirche in Bayern für Ethik im Dialog mit Technologie und Naturwissenschaft

Anmerkung: Eine Gesprächspartnerin möchte nicht namentlich genannt werden.

Ansprechpartnerinnen und Ansprechpartner

Ansprechpartner Kampagnenbüro Strategische Vorausschau:

Torstraße 49, 10119 Berlin
Telefon: (030) 818 777 158
E-Mail: kontakt@vorausschau.de | presse@vorausschau.de
Internet: vorausschau.de

Ansprechpartner Zukunftsbüro:

Michael Astor

Supervision und Gesamtprojektleitung bei der Prognos AG

Cordula Klaus

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

April 2022

Text

Prognos AG
Z_punkt GmbH

Gestaltung

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

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.