

Umweltrelevante Zukunftsthemen  
**VON LAB-GROWN FUTURE  
ÜBER MARITIME ALGEN-  
WIRTSCHAFT BIS ZUM  
INTERNET DER ZUKUNFT**

Ergebnisse des dritten Horizon Scanning-  
Zyklus für das Umweltressort



# Impressum

## Herausgeber

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
buergerservice@uba.de  
Internet: www.umweltbundesamt.de

## Autor\*innen:

Stephan Richter, Tobias Hungerland, Nikolas Hubel,  
Katharina Dassel, Lia Meißner, Mona Hille, Désirée Tillack  
(Institut für Innovation und Technik [iit]  
in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin)

Gideon Hussels, Walter Kahlenborn,  
Anika Conrad, Jan Christian Polanía Giese, Helin Aras  
(adelphi consult GmbH, Berlin)

## Redaktion:

Sylvia Veenhoff, Fachgebiet I 1.1

## Satz und Layout:

twotype design, Hamburg

## Publikationen als PDF:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Oktober 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung  
liegt bei den Autorinnen und Autoren.

## Bildquellen:

S. 1: AdobeStock/Amila Vector  
S. 8: iStock/rusm  
S. 15: iStock/Rocco-Herrmann  
S. 18: AdobeStock/Jullia  
S. 21: AdobeStock/Itsaraporn  
S. 23: AdobeStock/Lightgeo  
S. 26: AdobeStock/Pragay  
S. 29: iStock/Alexander Traksel  
S. 31: iStock/tifonimages  
S. 37: AdobeStock/luciano  
S. 38: AdobeStock/Jose Luis Stephens  
S. 41: iStock/greenleaf123  
S. 48: iStock/Rocky89

S. 50: iStock/oonal  
S. 53: iStock/Fokusiert  
S. 58: iStock/webphotographeer  
S. 63: AdobeStock/misu  
S. 70: iStock/Ganna Zelinska  
S. 73: iStock/EyeEm Mobile GmbH  
S. 74: AdobeStock/NeuroSky  
S. 76: iStock/gpointstudio  
S. 78: iStock  
S. 83: iStock/SilviaJansen  
S. 85: iStock/primeimages S. 87: iStock/CaoChunhai  
S. 91: iStock/Achim Schneider  
S. 93: AdobeStock/stockphoto-graf  
S. 96: iStock/AntonioSolano  
S. 99: AdobeStock/kwarkot  
S. 103: iStock/brightstars  
S. 107: iStock/Rainer Puster  
S. 108: iStock/da-kuk  
S. 111: iStock/Dragos Condrea  
S. 115: iStock/EvgeniyShkolenko  
S. 117: iStock/Ekaterina79  
S. 121: AdobeStock/Jugoslav  
S. 123: AdobeStock/Man As Thep

Stand: Juli 2024



Umweltrelevante Zukunftsthemen

# **VON LAB-GROWN FUTURE ÜBER MARITIME ALGEN- WIRTSCHAFT BIS ZUM INTERNET DER ZUKUNFT**

Ergebnisse des dritten Horizon Scanning-  
Zyklus für das Umweltressort



# Inhalt

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	7
<b>1 Einleitung: Den Weg zum Horizont ebnen</b> .....	9
1.1 Horizon Scanning für das Umweltressort in Zeiten anhaltender multipler Herausforderungen .....	9
1.2 Identifizierung und Genese der Zukunftsthemen .....	10
<b>2 Zukunftsthemen des dritten Horizon Scanning-Zyklus</b> .....	16
2.1 Lab-grown Future .....	18
2.2 Zukunft der Meerwasserentsalzung .....	31
2.3 Maritime Algenlandwirtschaft .....	41
2.4 Demokratie in Gefahr? .....	53
2.5 Militär, Krieg und Kriegsfolgen .....	63
2.6 Die Krisengesellschaft .....	74
2.7 Transformation in wirtschaftlich unsicheren Zeiten .....	85
2.8 Internet der Zukunft .....	96
2.9 Cybersicherheit und Umweltschutz .....	108
<b>3 Ausblick</b> .....	122
<b>Quellenverzeichnis</b> .....	128



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 01: Aktueller Horizon Scanning-Prozess .....	11
Abbildung 02: Scafelder des Horizon Scanning-Prozesses für das Umweltressort.....	12
Abbildung 03: Aufbau der Beschreibung von Zukunftsthemen .....	17
Abbildung 04: Wasserentsalzungskapazitäten der verschiedenen Technologien in operativen Anlagen .....	34
Abbildung 05: Zwei Hauptmethoden für den Algenanbau: „fixed-off-bottom-method“ und „floating system“ .....	43
Abbildung 06: Weltkarte nach Regimetypen .....	54
Abbildung 07: Globale Verteilung der Regimetypen nach Staaten und Weltbevölkerung .....	56
Abbildung 08: Darstellung der Auswirkungen von Klimamaßnahmen durch verschiedene Regierungen zur Erreichung des Pariser Abkommens mittels Climate Action Tracker (CAT).....	57
Abbildung 09: Kriegstypen seit 1945 .....	64
Abbildung 10: Gesamtzahl der Bürgerkriege und zwischenstaatlichen Konflikte weltweit in den Jahren von 1946 bis 2023 .....	66
Abbildung 11: Höhe der weltweiten Militärausgaben von 2005 bis 2022 (in Mrd. US-Dollar) .....	67
Abbildung 12: Globale Risiken, sortiert nach ihren kurz- und langfristigen Folgen.....	79
Abbildung 13: Zuordnung der Zukunftsthemen zu den Themenfeldern der strategischen Vorausschau des Umweltressorts .....	123

# 1

Den Weg zum  
Horizont ebnen



# 1 Einleitung: Den Weg zum Horizont ebnen

## 1.1 Horizon Scanning für das Umweltressort in Zeiten anhaltender multipler Herausforderungen

Weitreichende Ereignisse werfen ihre Schatten auf unsere gesellschaftlichen Errungenschaften: Die Covid-19-Pandemie wirkt dauerhaft nach, der russische Angriffskrieg gegen die Ukraine hat eine lange Periode von Frieden und Wachstum in Europa beendet und kriegerische Handlungen in Nahost haben Auswirkungen bis mitten in unsere Städte und Gesellschaften. Diese hochaktuellen Geschehnisse, auch als Polykrise bezeichnet, überlagern teilweise die langfristigen globalen Herausforderungen, die durch die Dreifachkrise bestehend aus Klimawandel, Biodiversitätsverlust und Umweltverschmutzung entstanden sind.

Das Risiko, die Dreifachkrise aus dem Blick zu verlieren, kann sich unsere Gesellschaft allerdings nicht leisten, da deren Folgen ungleich schwerwiegender ausfallen als die Auswirkungen der aktuellen Herausforderungen. Sowohl aus ökonomischer als auch gesundheitlicher Sicht wird die Gesellschaft unter der Dreifachkrise leiden:

Klimabedingte Extremereignisse haben in den vergangenen vier Jahrzehnten in der Europäischen Union zu wirtschaftlichen Verlusten von schätzungsweise 650 Mrd. Euro geführt, davon mehr als 100 Mrd. Euro allein in den Jahren 2021 und 2022 (European Environment Agency 2023; European Environment Agency 2024). Die deutschen Treibhausgas- und Luftschadstoff-Emissionen in den Bereichen Straßenverkehr, Strom- und Wärmeerzeugung im Jahr 2021 haben Kosten in Höhe von mindestens 241 Mrd. Euro verursacht (Umweltbundesamt (UBA) 2024). Die bestehende Finanzierungslücke, um die biologische Vielfalt bis zum Jahr 2030 wiederherzustellen, wird auf 711 Mrd. US-Dollar jährlich geschätzt (Allianz Trade 2023). Je später und je zögerlicher Umweltrisiken durch geeignete Maßnahmen gemindert werden, umso mehr drohen die Kosten zu steigen.

Gesundheitliche Folgen, beispielsweise durch zunehmende Hitzewellen verursachte Erkrankungen des Herzkreislaufsystems oder durch Überhitzung verursachte Todesfälle, betreffen künftig einen erheblichen

Teil der Weltbevölkerung. So könnten zwischen einer und drei Mrd. Menschen künftig in Gegenden leben, in denen die mittlere Jahrestemperatur bei 29° C liegt (Hungerland et al. 2023; S. 23ff.). Schon jetzt zeigt sich, dass seit 1980 rund 220.000 Menschen europaweit an den Folgen extremer Wetterereignisse gestorben sind (European Environment Agency 2023). Zukünftig dürften diese Zahlen deutlich steigen und weitere Effekte, wie etwa zunehmende Migrationsbewegungen, verursachen.

Obwohl es internationale Ziele und Beschlüsse für mehr Umweltschutz und den Erhalt von Biodiversität sowie zahlreiche Maßnahmen gegen den Klimawandel bzw. für die Anpassung an die Folgen des Klimawandels gibt, erweist sich deren Umsetzung als schwierig: Beispielsweise erreichen die Vereinten Nationen (UN) die Nachhaltigkeitsziele bislang nicht. Die Herausforderungen scheinen zu groß, vielfältig und komplex, um sie beherrschen oder nur kurzfristig mit Einzelmaßnahmen bewältigen zu können.

Deshalb gewinnt eine kontinuierliche strategische Vorausschau für das Umweltressort an Bedeutung: Denn unsere hochkomplexe, dynamische Welt ist nicht nur durch akute und tiefgreifende Ereignisse wie die oben benannte Polykrise gekennzeichnet, sondern auch durch übergeordnete, weiterreichende und in ihren Auswirkungen deutlich bedrohlichere Entwicklungen – die sogenannte Dreifachkrise. Es sind zahlreiche Wechselwirkungen erkennbar: Während einige Entwicklungen im Kontext der Covid-19-Pandemie positive Effekte auf die Umwelt hatten – wie beispielsweise der Rückgang des weltweiten Luftverkehrs – kommt es nunmehr durch zahlreiche disruptive Ereignisse – wie beispielsweise die eskalierende Gewaltspirale im Nahen Osten – zu zahlreichen neuen Entwicklungen mit potenziellen Umweltwirkungen. Hier setzt das Horizon Scanning an, in dem versucht wird, im gegenwärtigen Umfeld frühzeitig Orientierungswissen für das Umweltressort zu erzeugen und relevante Zukunftsthemen zu identifizieren. Damit soll das Umweltressort in die Lage versetzt werden, Handlungsoptionen zu formulieren.

**Horizon Scanning** ist ein Instrument zur strategischen Früherkennung sozioökonomischer, technologischer, politischer und ökologischer Veränderungen

(Behrendt et al. 2015). Gegenstand des Horizon Scannings ist die Identifikation von schwachen Signalen, sich gerade erst abzeichnenden Themen und aufkommenden Entwicklungen („Emerging Issues“) sowie von Trends (Cuhls et al. 2015). Das Horizon Scanning für das Umweltressort hat primär zum Ziel, neu aufkommende Entwicklungen mit Anknüpfungspunkten für umweltrelevante Maßnahmen für eine antizipatorische Umweltpolitik zu identifizieren. Eine derartige Umweltpolitik soll dazu beitragen, frühzeitig sich bietende Chancen für Nachhaltigkeit und Umweltschutz zu nutzen, aber auch potenzielle Risiken für Umwelt – Schäden oder Gefährdung durch Umsetzungsprobleme von umwelt- und nachhaltigkeitspolitischen Maßnahmen – zu minimieren. So kann eine antizipatorische Umweltpolitik dazu beitragen, die Gesellschaft widerstandsfähiger bei Herausforderungen und insgesamt resilienter zu machen.

Ein Horizon Scanning-Prozess findet nicht losgelöst von seinem Kontext statt, sodass die letztlich identifizierten Themen und deren Entwicklung geprägt sind vom gesellschaftlichen, politischen, technologischen, wirtschaftlichen und ökologischem Umfeld. Bereits eingangs wurde erwähnt, dass das gegenwärtige Trendumfeld von einer hochdynamischen und turbulenten Polykrise dominiert wird, während im Hintergrund eine übergeordnete Dreifachkrise aktuelle Entwicklungen beeinflusst.

Ein Teil der in diesem Horizon Scanning-Zyklus identifizierten Zukunftsthemen stellt daher übergeordnete Herausforderungen mit nur indirekten Bezügen zur Umweltpolitik dar. Dazu zählen beispielsweise die Themen „Demokratie in Gefahr“ (siehe Kapitel 2.4), „Militär, Krieg und Kriegsfolgen“ (siehe Kapitel 2.5), „Die Krisengesellschaft“ (siehe Kapitel 2.6), „Transformation in wirtschaftlich unsicheren Zeiten“ (siehe Kapitel 2.7) oder auch „Cybersicherheit und Umweltschutz“ (siehe Kapitel 2.9). Nichtsdestotrotz spielen diese Themen eine Rolle für die antizipatorische Umweltpolitik, gilt es doch, nicht nur direkte Umweltwirkungen bei der Formulierung umweltpolitischer Maßnahmen zu berücksichtigen, sondern das gesamte Umfeld im Blick zu behalten und auf Entwicklungen vorbereitet zu sein, deren Auswirkungen auf die Umwelt- und Nachhaltigkeitspolitik heute nur unkonkret erscheinen.

## 1.2 Identifizierung und Genese der Zukunftsthemen

Das Umweltbundesamt beschäftigt sich bereits seit dem Jahr 2012 mit dem Thema Horizon Scanning. Zu Beginn wurden in einer Konzeptstudie verschiedene internationale und nationale Horizon Scanning-Aktivitäten ausgewertet (Behrendt et al. 2015). Hierauf aufbauend wurde im Rahmen des Ufoplanvorhabens „Horizon Scanning 2.0 – Etablierung eines Horizon Scanningsystems“ ein Horizon Scanning-Prozess konzipiert, der spezifisch auf die Bedarfe und Anforderungen des Umweltressorts ausgerichtet ist (Umweltbundesamt (UBA) 2016).

Seit Abschluss der Konzeptstudie führt das Umweltbundesamt regelmäßig eigene Horizon Scannings durch:

Der **erste Horizon Scanning-Zyklus** fand von 2016 bis 2019 statt. Der entsprechende Bericht<sup>1</sup> deckt zehn Themen ab, darunter Distributed Ledger-Technologien sowie Virtual und Augmented Reality, staatliche und private Raumfahrt sowie Bioinspirierte Architektur- und Siedlungsentwicklung, alternative Lebenskonzepte und gesellschaftliche Spaltung (Jetzke et al. 2021). Im Rahmen des Horizon Scannings wurde das Thema Künstliche Intelligenz (KI) im Umweltbereich als besonders relevant für das Umweltressort identifiziert und ausführlich in einer separaten Studie analysiert (Jetzke et al. 2019a).

Der **zweite Horizon Scanning-Zyklus** lief von 2020 bis 2021. Der Bericht<sup>2</sup>, der wiederum zehn Zukunftsthemen umfasst, ist vor allem unter dem Eindruck der Covid-19-Pandemie entstanden (Jetzke et al. 2023). Dieses Umfeld prägt den Bericht stark, was sich im breiten Themenspektrum widerspiegelt: Es reicht von Themen, die im Zuge der Covid-19-Pandemie eine neue Qualität erlangt haben, wie beispielsweise die neue Regionalität und die Zukunft von Innenstädten, über Meinungsbildung im digitalen Zeitalter bis hin zu Resilienz als Grundlage zukunftsfähiger Gesellschaften, umfasst aber auch technische Innovationen wie Quantencomputing und Kryptowährung und wirft einen Blick auf die politisch unruhige Gesamtsituation mit einer drohenden neuen Welt(un)ordnung.

1 Ergebnisse des ersten Zyklus verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/von-blockchain-ueber-raumfahrt-bis-virtuellen>  
2 Ergebnisse des zweiten Zyklus verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/von-quantencomputing-ueber-die-zukunft-der>

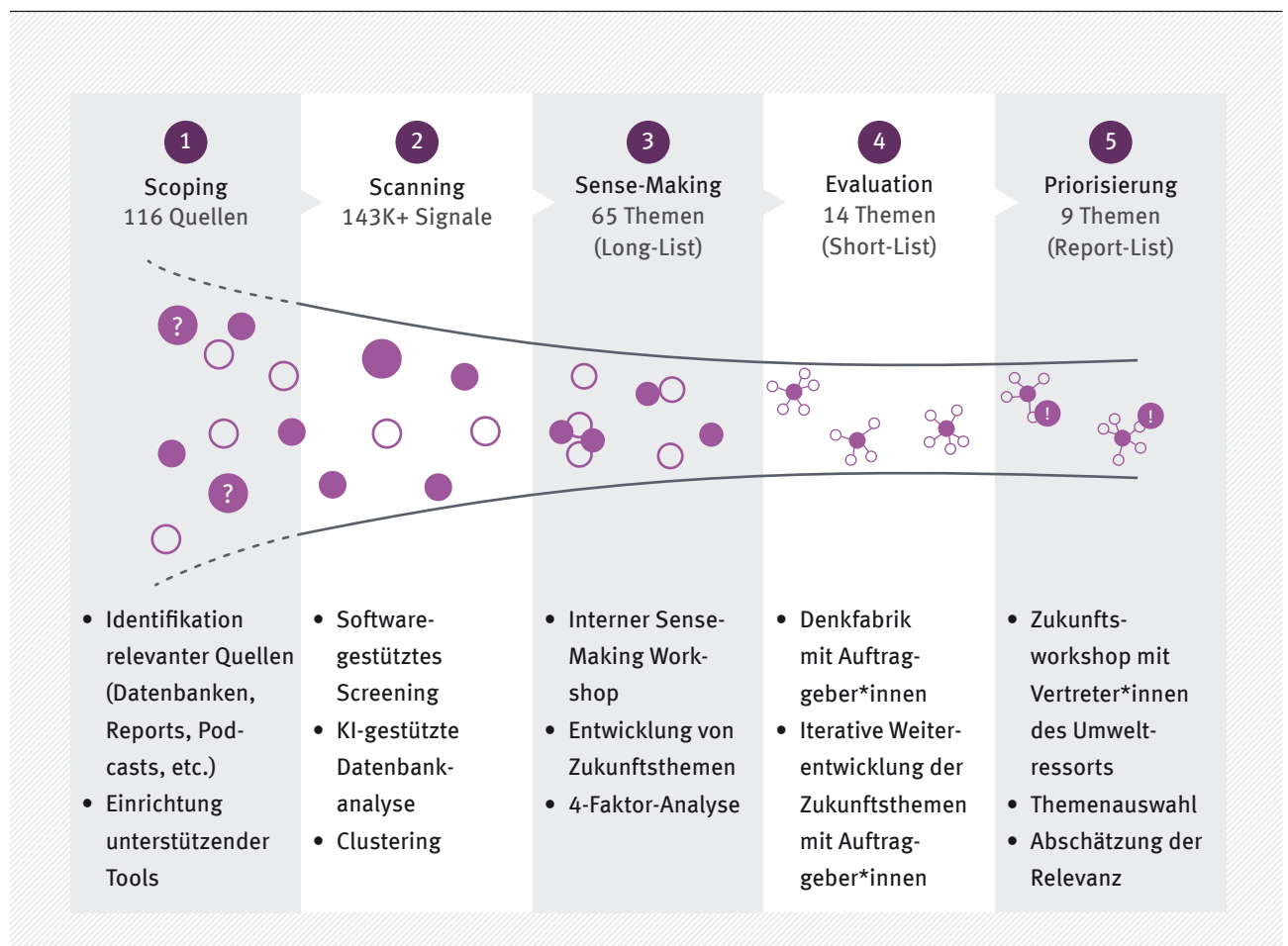
Mit dem nun vorliegenden Bericht werden nun die Ergebnisse des **dritten Horizon Scanning-Zyklus**, der von 2022 bis 2023 umgesetzt wurde, präsentiert. Der Bericht umfasst neun Zukunftsthemen. Ziel war es auch dieses Mal, systematisch den gesamten „Horizont“ zu scannen und potenziell hochgradig umweltrelevante neu auftkommende Themen für das Umweltressort zu identifizieren. Neben den üblichen Kriterien Neuheit und Relevanz für das Umweltressort wurden auch Themen identifiziert, die zwar bereits bekannt bzw. umweltrelevant waren, aber durch die Nachwirkungen der Covid-19-Pandemie und/oder den russischen (Angriffs-)Krieg in der Ukraine eine neue Dimension der Entwicklung mit Relevanz für das Umweltressort erfahren haben.

*Vom Signal zum Zukunftsthema*

Für die Identifizierung umweltrelevanter Zukunftsthemen wurde ein spezifisch für das Umweltressort ausgelegter und über die vergangenen zwei Zyklen weiterentwickelter Horizon Scanning-Prozess eingesetzt (Jetzke et al. 2021; S. 9ff.; Jetzke et al. 2023; S. 9ff.). Hierbei handelt es sich um ein themenoffenes Horizon Scanning. Das methodische Vorgehen gewährleistet die Früherkennung neuer, umweltrelevanter Entwicklungen auf der Basis sogenannter schwacher Signale<sup>3</sup>, also Phänomenen, die im Beobachtungsraum des Umweltressorts auftauchen, aber erst durch ihre Verdichtung als Emerging Issues eine strategische Relevanz erlangen. Emerging Issues lassen weiter konkretisieren und durch zusätzliche Informationen anreichern, sodass schließlich Zukunftsthemen beschrieben werden können. Unter einem

Abbildung 01

**Aktueller Horizon Scanning-Prozess**



Quelle: eigene Darstellung

<sup>3</sup> Für eine empirische Auseinandersetzung mit dem Konzept schwacher Signale siehe beispielsweise (van Veen und Ortt 2021).

Zukunftsthema versteht man einen „Sachverhalt, der seit einiger Zeit besteht, sich entwickelt, nicht zyklisch und (empirisch-statistisch) beschreibbar ist“ (Behrendt et al. 2015; S. 30).

Für die Identifizierung der vorliegenden Zukunftsthemen wurden im Rahmen des Horizon Scannings drei Phasen durchlaufen: das (i) Scoping, (ii) Scanning und (iii) Assessment. Das Assessment umfasst die Schritte Sense-Making, Evaluation und Priorisierung (siehe Abbildung 1).

Im Rahmen des **Scopings** wurden die Suchräume bzw. Scanfelder – dies sind thematische Schwerpunkte zur Strukturierung des Scans – festgelegt, zu jedem Suchraum bzw. Scanfeld passende zu analysierenden Quellen ausgewählt und unterstützende Software-Tools für das anschließende Scanning hinterlegt. Bei der Definition der Suchräume (siehe Abbildung 2) wurde besonders darauf geachtet, dass nicht nur Umweltkernthemen wie Wasser, Boden, Luft oder Biodiversität im Scanning berücksichtigt werden, sondern darüber hinaus auch Entwicklungen in all denjenigen Themenbereichen erfasst werden, die von außerhalb Auswirkungen auf die Umwelt haben können. Insgesamt wurden 116 Quellen für das Scanning genutzt: 73 RSS-Feeds (Blogs, Leitmedien, soziale Medien und statistische Erhebungen), 20 Technikfolgenabschätzung- (TA) und Foresight-Plattformen, 14

Podcasts, sechs Konferenzen und drei (wissenschaftliche) Datenbanken. Die Breite der Quellen ermöglichte eine Detektion von neuen (umwelt-)politischen, gesellschaftlichen sowie wirtschaftlichen Entwicklungen und schloss überdies auch soziale und technische Innovationen ein.

Im Rahmen des **Scannings** wurden die Quellen nach umweltrelevanten schwachen Signalen durchsucht, die Information vorbewertet und in Datenpools für eine weitere Analyse abgelegt. Insgesamt wurden mehr als 143.000 Signale detektiert. Die Suchstrategie basierte dabei auf den folgenden Schwerpunkten:

- ▶ Die RSS-Feeds wurden softwaregestützt, auf Basis der im zweiten Horizon Scanning etablierten Suchstrategie gescannt. Hierfür wurden mehr als 100.000 Artikel durch implementierte Regeln zur automatisierten Kategorisierung den Scanfeldern zugeordnet. Anschließend wurden die in den Scanfeldern hinterlegten RSS-Feed-Daten mithilfe eines KI-Tools auf Basis der Artikelinhalte thematischen Clustern zugeordnet. Aus den geclusterten Artikeln wurde eine von Foresight-Expert\*innen ausgewählte Teilmenge für die qualitative Inhaltsanalyse ausgewählt. Für die Auswahl waren ein erkennbarer Umweltbezug, die Neuigkeit der Information sowie eine erkennbare Häufung von Artikeln zu der etwaigen Information maßgeblich.

Abbildung 02

### Scanfelder des Horizon Scanning-Prozesses für das Umweltressort



Quelle: eigene Darstellung

- ▶ Quellen wie TA- und Foresight-Plattformen, Podcasts, Konferenzwebsites und -berichte wurden von Foresight-Expert\*innen gesichtet und nach relevanten Themen gescreent. Dabei wurden die gleichen Auswahlkriterien wie bei der Analyse der RSS-Feeds angewandt.
- ▶ Datenbanken und Foresight-Journals wurden auf Basis von deutschen und englischen Schlüsselwörtern wie trend\*, foresight\*, innovation\*, szenario\*, future\* etc. durchsucht und durch den Suchalgorithmus auf den Kontext sustainability\* weiter eingegrenzt. Die so gewonnenen Daten wurden in einem Datenpool gesammelt und KI-basiert geclustert. Die Cluster wurden anschließend von Foresight-Expert\*innen nach umweltrelevanten Trends und Entwicklungen durchsucht, wobei die oben genannten Auswahlkriterien genutzt wurden.

Im nächsten Projektschritt wurde ein **Assessment** durchgeführt, in dem die relevanten Informationen des Scannings ausgewertet und geclustert wurden. Die Generierung neuer Themen und Trends sowie deren Kategorisierung ist im Wesentlichen eine interpretative Leistung, die in einem Sense-Making-Prozess zwischen den Auftragnehmern und dem Umweltressort als Auftraggeber erbracht wurde. In einem ersten Schritt wurden Verfahren der qualitativen Inhaltsanalyse eingesetzt, um die gesammelten Informationen auszuwerten, d. h., eine Verdichtung der schwachen Signale zu Hinweisen auf konkrete Entwicklungen – bzw. Zukunftsthemen – zu erreichen. Darüber hinaus wurden mithilfe der Kookkurrenz-Analyse<sup>4</sup> Schwerpunktthemen und thematische Querbezüge identifiziert. Die Ergebnisse dieses Analyseschrittes mündeten in einer ersten Auswahl von 65 Zukunftsthemen (Longlist). Im Anschluss an die Themengenerierung wurden die Themen der Longlist auf Basis des signalspezifischen Wissens hinsichtlich folgender Faktoren bewertet:

- ▶ Themen-Status: Wie aktuell ist das Thema bzw. wie dynamisch entwickelt es sich?
- ▶ Themen-Horizont: In welchem Zeitraum etabliert bzw. festigt sich die Entwicklung voraussichtlich?

- ▶ Umweltressort-Relevanz: Hat die Entwicklung eine potenziell signifikante Umweltwirkung?
- ▶ Umweltressort-Readiness: Ist das Thema bereits auf der Agenda des Umweltressorts?

Die Ergebnisse dienten als Grundlage eines Denkfabrik-Workshops mit dem UBA und BMUV (Evaluations-Schritt). Im Rahmen des Workshops wurden die Longlist-Themen insbesondere hinsichtlich ihrer Umweltrelevanz und der Umweltressort-Readiness diskutiert, thematisch weiterentwickelt und ergänzt. Im Ergebnis wurden 14 Zukunftsthemen (Shortlist) identifiziert und weiterentwickelt, die im Vergleich zu den weiteren Themen besonders umweltrelevant sind und einen hohen Neuigkeitswert für das Umweltressort besitzen.

Die Themen der Shortlist wurden anschließend in einem iterativen Prozess geschärft und um Emerging Issues ergänzt. Anschließend wurden die Zukunftsthemen der qualifizierten Shortlist in einem Zukunftsthemen-Workshop mit 28 Vertreter\*innen des Umweltressorts diskutiert und weiter verdichtet (Priorisierungsschritt). Entscheidende Auswahlkriterien waren dabei die Fragen, ob die Themen aus Sicht des Umweltressorts ausreichend Relevanz besaßen, ob sie bereits auf der umweltpolitischen Agenda zu finden waren und ob es sich dabei um Querschnittsthemen handelte, die mehrere Fachbereiche des Umweltressorts betrafen.

Ergebnis des Assessments sind die neun in diesem Bericht vorgestellten Zukunftsthemen:

1. Lab-grown Future
2. Zukunft der Meerwasserentsalzung
3. Maritime Algenlandwirtschaft
4. Demokratie in Gefahr
5. Militär, Krieg und Kriegsfolgen
6. Die Krisengesellschaft
7. Transformation in wirtschaftlich unsicheren Zeiten
8. Internet der Zukunft
9. Cybersicherheit und Umweltschutz

Im Anschluss an den Horizon Scanning-Prozess wurden die ausgewählten Zukunftsthemen vertiefend ausgearbeitet. Zu jedem Thema wurden Literaturre-

<sup>4</sup> Die Kookkurrenz-Analyse ist eine Methode zur Untersuchung von Beziehungen zwischen Begriffen oder Konzepten in einem bestimmten Textkorpus oder Datensatz. Bei einer Kookkurrenz-Analyse werden Begriffe identifiziert, die häufig zusammen auftreten. Dies ermöglicht es, Muster und Beziehungen zwischen diesen Begriffen zu erkennen.

cherchen und Quellenanalysen durchgeführt, um die Themen sowie ihre einzelnen umweltrelevanten Aspekte fundiert darzustellen. Darüber hinaus flossen auch themenspezifische Beiträge der Referent\*innen sowie die Diskussionen mit den Konferenzteilnehmer\*innen der 2023 realisierten UBA-Konferenz „Die Zukunft im Blick. Konferenz für eine vorausschauende Umwelt- und Nachhaltigkeitspolitik“<sup>5</sup> in die Ausarbeitung der Zukunftsthemen ein.

Im Ergebnis bietet der Bericht einen Überblick über neun umweltpolitische Zukunftsthemen, eine erste Abschätzung möglicher Umweltauswirkungen sowie erste Empfehlungen für die weiterführende Bearbeitung im Umweltressort. Letztlich bietet der vorliegende Bericht auch der interessierten Öffentlichkeit Informationen und Anregungen zur weiteren Auseinandersetzung mit sich abzeichnenden umweltrelevanten Zukunftsthemen.

Die Ergebnisse des Horizon Scanning-Prozesses sind jedoch nur ein erster Schritt, um im Sinne einer vorausschauenden Politikgestaltung, die Chancen, die die Zukunftsthemen für die Umwelt bieten, zu nutzen und deren Herausforderungen und Risiken für die Umwelt so früh wie möglich zu adressieren. Das zentrale Ziel des Prozesses war die Identifizierung von Zukunftsthemen. Im Anschluss bietet es sich nun an, die hier vorgestellten Entwicklungen als Ausgangspunkt für weitere vertiefende wissenschaftliche Analysen zu nutzen, um beispielsweise die direkten und indirekten Umweltwirkungen systematisch zu erheben und damit umweltpolitische Gestaltungsspielräume und Handlungsoptionen ganzheitlich vorzubereiten. Dies kann auch durch den Einsatz von Methoden der strategischen Vorausschau geschehen (Keppner et al. 2020). Szenario-Studien können zudem helfen, alternative Entwicklungspfade in die Zukunft oder Bilder der Zukunft zu erarbeiten, um Entscheidungsprozesse zu unterstützen und langfristige Strategien an unterschiedliche mögliche Zukünfte anzupassen.

---

5 <https://blick-in-die-zukunft.net/>

# 2

## Zukunftsthemen



## 2 Zukunftsthemen des dritten Horizon Scanning-Zyklus

Die neun identifizierten Zukunftsthemen werden in einem einheitlichen Aufbau vorgestellt, um eine klare Strukturierung und Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

**Trend:** Jedes Zukunftsthema wird auf seine Kernaussagen und deren mögliche Entwicklungsrichtung reduziert. Zudem werden die Emerging Issues des Trends stichpunktartig eingeleitet.

### In Kürze

- ▶ Hier werden die wesentlichen Erkenntnisse in prägnanter Form zusammengefasst und bieten einen kompakten Überblick über die Hauptaspekte des jeweiligen Zukunftsthemas sowie deren zentrale Umweltwirkungen. Diese Zusammenfassung dient als Orientierungshilfe und bietet den Leser\*innen einen ersten Eindruck, bevor sie in die detaillierte Analyse eintauchen.

### Hintergrund

Der Abschnitt widmet sich dem Hintergrund des Zukunftsthemas und enthält zugleich einen Ausblick auf mögliche zukünftige Entwicklungen. Hier wird allgemeinverständlich aufgezeigt, wie das Thema entstanden ist, es sich entwickelt hat, welche Faktoren es beeinflussen und wie ein „Blick in die Zukunft“ aussehen könnte.

### Emerging Issues

Die Emerging Issues stellen prägende, sich abzeichnende Entwicklungen innerhalb der jeweiligen Zukunftsthemen dar und konzentrieren sich auf aufkommende Herausforderungen und Chancen, insbesondere im Hinblick auf das Umweltressort. An dieser Stelle werden explizit Umweltwirkungen dargestellt, um die Relevanz des Themas herauszuarbeiten. Ziel ist es, die potenziellen Risiken und Chancen zu identifizieren, die mit den Emerging Issues einhergehen, sowie neue Entwicklungen zu beleuchten, die in den kommenden Jahren erwartet werden können.

### Fazit

Abgerundet wird die Darstellung jedes Zukunftsthemas durch ein Fazit, das die gewonnenen Erkenntnisse zusammenfasst und den Bezug zu den umweltpolitischen Gestaltungsrahmen herstellt. Dieser Teil fokussiert sich darauf, welche politischen Maßnahmen und Handlungsoptionen in den kommenden Jahren erforderlich sein könnten, um den Herausforderungen und Chancen, die durch das jeweilige Thema aufgeworfen werden, gerecht zu werden.

### Literatur

Die in den jeweiligen Kapiteln verwendeten Quellen sind am Ende des Berichts aufgeführt. Sie belegen die getroffenen Aussagen und enthalten weiterführende Informationen.

Abbildung 03

**Aufbau der Beschreibung von Zukunftsthemen**



Quelle: eigene Darstellung



## 2.1 Lab-grown Future

**Trend:** In-vitro-Fleisch ist erst der Anfang: Immer mehr Lebensmittel wie Fisch, Eier, Milch, Käse, Eis und Schokolade, aber auch Materialien wie Leder, Holz oder Baumwolle können im Labor in Zellfabriken produziert werden. Darüber hinaus sollen Zellfabriken künftig auch zur Gewinnung von Energie und Kraftstoffen genutzt werden. Wie kann eine Zukunft aussehen, in der Ressourcen in Bioreaktoren gewonnen werden? Welche Risiken und Potenziale bergen die neuen Produktionsverfahren? Und welche Rolle können im Labor erzeugte Materialien, Lebensmittel und andere Produkte bei der Transformation zu einer nachhaltigen Gesellschaft spielen?

### Emerging Issues

- ▶ Lebensmittel aus der Zellfabrik
- ▶ Materialien aus der Zellfabrik
- ▶ (Zell-)Fabriken für die Lab-grown Future

### In Kürze

- ▶ Mikroorganismen werden seit Jahrtausenden vom Menschen genutzt. So wird die Herstellung von Brot, Käse, Milchprodukten, Wein, Essig und Bier erst durch den Einsatz von Bakterien, Hefen und Schimmelpilzen möglich. Die Mikroorganismen fungieren dabei als kleine Fabriken, die in der Lage sind, eine Vielzahl von Stoffen zu produzieren, wenn sie mit den richtigen Substraten (Äquivalent zu Rohstoffen) in einer geeigneten Umgebung (in der Regel ein Behälter, Bioreaktor) gefüttert werden.

- ▶ Die kommerzielle Nutzung solcher Zellfabriken zur industriellen Produktion von Biomolekülen wird als Biomanufacturing bezeichnet. Die Lab-grown Future setzt hier an und integriert die Herstellungsverfahren Präzisionsfermentation und Tissue Engineering, um komplexe Gewebe, Lebensmittel und Materialien zu produzieren. In individualisierbaren Zellfabriken könnten in Zukunft verschiedenste maßgeschneiderte Produkte für die Agrar-, Lebensmittel-, Material-, Energie- und Pharmaindustrie hergestellt werden.
- ▶ Biomanufacturing bietet Potenziale, negative Umweltwirkungen herkömmlicher Produktionsprozesse zu vermeiden, indem etwa Eingriffe in bestehende Ökosysteme reduziert werden und Tierleid vermieden wird. Gleichzeitig entstehen durch die technisierten Laborprozesse andere Probleme für die Umwelt, insbesondere mit Blick auf den Energie- und Ressourcenverbrauch. Eine vollständige Substitution konventioneller Produktion ist in der Lab-grown Future angesichts der energieintensiven, kostspieligen Produktionsprozesse allerdings nicht zu erwarten.

## Hintergrund

Während die frühen Anfänge der Nutzung von Mikroorganismen zur Herstellung von Lebensmitteln noch eher als „Feldversuche“ bezeichnet werden können – hierzu zählt z. B. die Herstellung von Wein aus einer Mischung aus Reis, Honig und Früchten in China vor 9.000 Jahren –, ist mit der Entwicklung und Durchsetzung biotechnologischer Innovationen in den vergangenen Jahrzehnten die Herstellung maßgeschneiderter Industrieprodukte wie Aminosäuren, Insulin, Enzyme oder Zitronensäure zur gängigen Praxis geworden (Graf und Lohmann 2021). Dabei hat sich die Produktion zunehmend ins Labor verlagert bzw. findet unter streng kontrollierten Laborbedingungen statt. Diese industrielle Anwendung von biologischen Systemen, z. B. Mikroorganismen, Zellen oder Enzymen, zur kommerziellen Herstellung von Biomolekülen für die Agrar-, Lebensmittel-, Werkstoff-, Energie- und Pharmaindustrie wird als Biomanufacturing bezeichnet. Biomanufacturing wird zur industriellen oder weißen Biotechnologie gezählt.

Historisch lassen sich vier Innovationszyklen im Biomanufacturing unterteilen, die sich bezüglich der Produkttypen und Produktionsplattformen sowie -prozesse unterscheiden (Zhang et al. 2017):

- ▶ **Biomanufacturing 1.0** – Zu Beginn des 20. Jahrhunderts werden erstmals Primärmetaboliten, z. B. Butanol, Aceton, Ethanol, Zitronensäure, durch Monokulturfermentation industriell produziert.
- ▶ **Biomanufacturing 2.0** – Ab den 1940er Jahren können auch komplexere Sekundärmetaboliten wie die Antibiotika Penicillin, Tetracycline und Streptomycin mithilfe von mutierten Pilzen und Bakterien produziert und aufgereinigt werden.
- ▶ **Biomanufacturing 3.0** – Größere Biomoleküle, Proteine und Enzyme wie Insulin, Wachstumshormone und DNA-Polymerase können ab den 1980er Jahren in genetisch modifizierten Zellkulturen sowie Mikroorganismen produziert werden.
- ▶ **Biomanufacturing 4.0** – Ab den 2000er Jahren können mithilfe von Präzisionsfermentation und Tissue Engineering zunehmend komplexe organi-

sche Gewebe, Lebensmittel(-Bestandteile) und Materialien, z. B. Vitamine, Häm- und Milchproteine sowie In-vitro-Fleisch, produziert werden<sup>6</sup>.

Die Lab-grown Future setzt hier an und nimmt die aktuellen Entwicklungen des vierten Biomanufacturing-Innovationszyklus auf. Ein wesentlicher Treiber dieser Entwicklung ist bis dato das von Start-ups dominierte Innovationsgeschehen rund um das sogenannte In-vitro-Fleisch und andere in Biofabriken hergestellte Lebensmittel wie Fisch sowie Milch- und Molkereiprodukte. Darüber hinaus profitierte der Biotechnologiesektor indirekt von der Covid-19-Pandemie: Erkenntnisse sowie Innovationen aus dem Bereich der Impfstoffentwicklung können mittelfristig auch im Kontext einer Lab-grown Future eine wichtige Rolle spielen.

### Produktionsverfahren der Lab-grown Future

Immer mehr Forscher\*innen sowie Start-ups erkunden neue Möglichkeiten, industrielle organische Produkte via Biomanufacturing zu erzeugen. Hierbei nutzen sie zwei unterschiedliche Herstellungsverfahren, die Präzisionsfermentation und das Tissue Engineering, und entwickeln diese stetig weiter.

Mithilfe von **Präzisionsfermentation** können Mikroorganismen im Labor gentechnisch so „programmiert“ werden, dass sie komplexe organische Moleküle herstellen (Tubb und Seba 2019). Auf diesem Weg können Nahrungsbestandteile wie Proteine, Lipide und Kohlenhydrate ebenso erzeugt werden wie biobasierte Grundchemikalien (Ewing et al. 2022; Augustin et al. 2023). Elementarer Bestandteil der Präzisionsfermentation ist die gentechnische Veränderung von Mikroorganismen. Bei der Präzisionsfermentation werden in einem ersten Schritt genetische Informationen der Wunschproteine aus einer Datenbank entnommen. Vereinfacht können diese als Bauanleitung verstanden werden, um Mikroorganismen oder andere Zellen zu befähigen, die entsprechenden Proteine herzustellen. Die Informationen werden mithilfe von Gentechnik in die Mikroorganismen oder Zellen eingeschleust. Unter den richtigen Bedingungen – hierzu zählen u. a. Temperatur, Sauerstoffgehalt, pH-Wert – werden die Mikroorganismen oder Zellen in Fermentern (Bioreaktoren) kultiviert und mit Nährstoffen versorgt. Bei optimaler Versorgung agieren

<sup>6</sup> Zu In-vitro-Fleisch siehe „Die Zukunft im Blick: Fleisch der Zukunft. Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen von pflanzlichen Fleischersatzprodukten, essbaren Insekten und In-vitro-Fleisch“, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/die-zukunft-im-blick-fleisch-der-zukunft>

diese dann als Mikrofabriken und synthetisieren die gewünschten Biomoleküle.

Neben dem Ressourcenaufwand für den Bau der Fermentationsanlagen entstehen Umweltwirkungen der Präzisionsfermentation vor allem durch den Betrieb der Bioreaktoren. Hierbei fällt vor allem der Energiebedarf für das Halten einer optimalen Prozesstemperatur ins Gewicht (Reketat 2022). Ein weiteres hypothetisches Risiko ist die Möglichkeit einer unbeabsichtigten Freisetzung gentechnisch modifizierter Mikroorganismen in die Umwelt. Dies ist ein hypothetischer Fall, da die Systeme (Bioreaktoren) normalerweise geschlossen sind und die verwendeten Organismen per se keinen Kontakt zur Umwelt haben. Zudem sterben die Mikroorganismen ohne die Umgebung der Bioreaktoren normalerweise schnell ab. Über mögliche Umweltwirkungen ist bisher jedoch wenig bekannt (Bundesvereinigung der Deutschen Ernährungsindustrie (BVE) 2023).

Bei den Produkten der Präzisionsfermentation handelt es sich in der Regel um Zwischenprodukte, die industriell weiterverarbeitet werden. Für die Herstellung von Leder werden Kollagenproteine, für die Herstellung von Käse werden Milchproteine genutzt. Die Endprodukte, im vorliegenden Beispiel Leder bzw. Käse, enthalten normalerweise keine lebensfähigen Organismen mehr, können aber gentechnisch veränderte DNA enthalten. Vor allem im Kontext von Lebensmitteln kann dies zur Ablehnung der Produkte durch potenzielle Konsument\*innen führen. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass der Konsum von Produkten, die mithilfe weißer Gentechnologie hergestellt werden – hierzu zählt die Präzisionsfermentation –, nicht per se Gesundheitsrisiken birgt (Hüsing et al. 2017).

Mit **Tissue Engineering** (tissue, engl. für „Gewebe“) können verschiedenste komplexe Gewebe auf Zellkulturbasis außerhalb des biologischen Organismus „in vitro“ gezüchtet werden. Hierzu zählen u. a. In-vitro-Fleisch und -Fisch (Jetzke et al. 2019b; S. 47ff.; Jetzke und Dassel 2023), aber auch Lederprodukte (Jakab et al. 2019) und Holz (Beckwith et al. 2022). Im Gegensatz zur Fermentation, bei der Mikroorganismen oder Zellen als chemische Fabriken zur Produktion von Proteinen und anderen Stoffen genutzt werden, werden beim Tissue Engineering die gewünschten biologischen Gewebe direkt in der Petrischale gezüchtet.

Hierfür werden Stammzellen vom Zielorganismus benötigt, beispielsweise einer Kuh, um In-vitro-Fleisch oder Leder herzustellen. Die Zellen werden typischerweise auf ein Trägergerüst aufgetragen, in einem Bioreaktor mit einem Nährmedium versorgt und ggf. stimuliert, sodass sie sich vermehren (Proliferation) und das gewünschte Gewebe ausbilden (Differenzierung) – z. B. Fleisch aus Muskelfasern oder Leder aus Kollagen.

Tissue Engineering erzeugt diverse Umweltwirkungen, die größtenteils auf den Betrieb und insbesondere den Energiebedarf der Bioreaktoren zurückzuführen sind. Der Großteil des Energiebedarfs wird im Kontext der Prozesssteuerung benötigt; hierzu zählen u. a. die Temperaturkontrolle sowie die Mischung und Belüftung der Zellkulturen (Treich 2021). Während in der Frühphase der Forschung zu In-vitro-Fleisch von starken Energieeinsparungen ausgegangen wurde, zeichnen gegenwärtige Studien ein anderes Bild und prognostizieren, dass je nach hergestellter Fleischsorte der Energiebedarf in der Herstellung ca. 35 bis 400 % höher liegt als in der konventionellen Erzeugung (Jetzke et al. 2019b). Auch für andere Erzeugnisse, die mittels Tissue Engineering hergestellt werden (könnten), ist mit verhältnismäßig hohem Energieaufwand zu rechnen. Bezüglich des Tierwohls und der Akzeptanz, aber auch im Kontext der Umweltwirkungen spielt zudem die Art des Nährmediums eine wesentliche Rolle. Aktuell ist das effizienteste Nährmedium für die Vermehrung von Zellen im Labor fetales Rinderserum, welches aus dem Blut von Kälberföten gewonnen wird (Jetzke et al. 2019b; Menhart 2023). Die Entnahme ist mit erheblichem Tierleid sowohl für das Muttertier als auch für den Kälberfötus verbunden. Dies kann zu einer Ablehnung von Tissue Engineering Produkten durch Teile der Verbraucher\*innen (etwa Vegetarier\*innen und Veganer\*innen) führen (Whiley 2023).

### *Die Lab-grown Future nimmt Fahrt auf*

Obwohl Fermentation kulturhistorisch schon lange genutzt wird, ist die Weiterentwicklung dieses Verfahrens und die Anwendung der **Präzisionsfermentation** zur Nachahmung oder Neuschaffung von Biomolekülen relativ neu. Die Entwicklungen in diesem Bereich sind jedoch dynamischer und weiter fortgeschritten als im Bereich des Tissue Engineering.



Im Bereich der Präzisionsfermentation standen vor allem die ersten „tierfrei“<sup>7</sup> Milchprodukte im Mittelpunkt des Medieninteresses, die seit Kurzem in einigen Regionen, darunter den USA und Israel, erhältlich sind (Smith et al. 2024). Im Jahr 2020 erfolgte die Zulassung von Milchproteinen aus Präzisionsfermentation durch die Food and Drug Administration (FDA) in den USA (Deutscher Bundestag 2020). Andere Proteine aus der Präzisionsfermentation, die z. B. für die Herstellung von Ei-, Fleisch- oder Fischprodukten verwendet werden könnten, sind noch nicht auf dem Markt. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Technologie hierfür bereits validiert ist und in Pilotprojekten eingesetzt wird (Smith et al. 2024).

Auch die Gründungsszene spiegelt die dynamische Lage wider: Weltweit waren im Jahr 2022 bereits 62 Unternehmen aktiv, die ihren Schwerpunkt auf die Präzisionsfermentation legen (Carter et al. 2022; S. 22f.). Mehr als die Hälfte der Unternehmen, die sich mit der Präzisionsfermentation alternativer Proteine befassen, wurden dabei zwischen 2020 und 2022 gegründet (Carter et al. 2022; S. 21). Zudem beteiligen sich zunehmend auch etablierte große Unternehmen der Fleisch-, Lebensmittel- und Biotechno-

logiebranche an der Entwicklung und Vermarktung von Lebensmitteln aus der Präzisionsfermentation, z. B. Nestlé (Hiessl und Rübberdt 2023; S. 12). Dies kann zu einer schnelleren Erschließung neuer internationaler Märkte außerhalb der USA und zu einer schnelleren Einführung von Lebensmittelinnovationen führen.

Auch wenn viele der neu gegründeten Unternehmen und Start-ups noch keine Produkte am Markt haben, werden die Voraussetzungen für die weitere Verbreitung von Fermentationsprodukten in Lebensmitteln und anderen industriellen Erzeugnissen als gut eingestuft (Tubb und Seba 2019). Die Kosten für die Herstellung eines spezifischen Proteins mittels Präzisionsfermentation sind seit 2000 von 1 Mio. US-Dollar/kg Protein auf etwa 100 US-Dollar/kg im Jahr 2018 gesunken. Es wird davon ausgegangen, dass die Kosten weiter sinken werden, auf unter 10 US-Dollar/kg Protein bis 2025 (Tubb und Seba 2019). Investitionen in Präzisionsfermentations-Unternehmen und -Technologien wachsen stark: In den vergangenen vier Jahren wurden jährlich zwischen 222 und 938 Mio. US-Dollar in den Sektor investiert (Hiessl und Rübberdt 2023). Diese wurden jedoch überwiegend

7 Inwieweit die Deklaration „tierfrei“ für (Lebensmittel-)Produkte der Präzisionsfermentation möglich ist, ist nicht abschließend geklärt.

in Nordamerika getätigt, während Europa weit abgeschlagen an zweiter Stelle liegt. Insgesamt wurden damit in Nordamerika zwischen 2013 und 2022 2,9 Mrd. US-Dollar investiert, während es in Europa im gleichen Zeitraum 0,4 Mrd. US-Dollar waren (Smith et al. 2024). Im Gegensatz dazu ist Europa führend bei der öffentlichen Finanzierung von Forschung und Kommerzialisierung der Innovationen im Bereich der Präzisionsfermentation (Smith et al. 2024). Zudem hat der Ausschuss für Landwirtschaft und ländliche Entwicklung (AGRI) des Europäischen Parlaments in einem Briefing zur EU-Protein-Strategie explizit Produkte aus der Präzisionsfermentation eingeschlossen, was Forschung und Innovation in diesem Bereich fördern und den Regulierungsaufwand für die Industrie verringern sollte (European Parliamentary Research Service (EPRS) 2023).

Der Weltmarkt für Präzisionsfermentation wird derzeit auf einen niedrigen einstelligen Milliardenbetrag geschätzt, wobei für die kommenden Jahre ein erhebliches Wachstum prognostiziert wird. Bis 2030 könnte der Markt ein Volumen von 36 Mrd. US-Dollar erreichen (Markets and Markets 2022). Werden diese Entwicklungen betrachtet, ist es nicht unwahrscheinlich, dass es in naher Zukunft auch in der EU und Deutschland vermehrt Produkte aus der Präzisionsfermentation in die Verkaufsregale schaffen.

Zellkulturbasierte Lebensmittel wie Fleisch oder Fisch und Materialien wie Holz oder Leder, die mittels **Tissue Engineering** hergestellt werden, sind bislang weder im Handel erhältlich noch werden sie im industriellen Maßstab produziert. Die Entwicklung steckt noch in den Anfängen und findet aktuell überwiegend in Start-ups, Forschungseinrichtungen und Universitäten statt. Ein wesentlicher Schritt zur Marktreife eines zellkulturbasierten Produkts war die positive „premarket consultation“ der Food and Drug Administration (FDA) in den USA für In-vitro-Hühnerfleisch des Unternehmens UPSIDE Foods<sup>8</sup> im Jahr 2022 (FDA 2022). Auf dieser Basis können zukünftig weitere zellbasierte Produkte bezüglich ihrer Sicherheit bewertet werden. Investigative Recherchen stellen jedoch weiter infrage, ob das Unternehmen in nächster Zeit in der Lage sein wird, ganze Fleischstücke zu produzieren (Reynolds und Fassler 2023).

Die ersten unternehmerischen Impulse einer zellulären Produktion wurden durch die Gründung des ersten Start-ups für In-vitro-Fleisch im Jahr 2011, vor etwas mehr als zehn Jahren, gegeben (Stephens et al. 2019). Seitdem sind zwar die Kosten für die Herstellung des ersten zellkulturbasierten Burgerpatties – ca. 300.000 US-Dollar – im Jahr 2013 durch das Start-up Mosa Meats deutlich gesunken. Bei einer zukünftigen industriellen Produktion von In-vitro-Fleisch werden die Kosten für einen Burgerpatty jedoch immer noch auf ca. 18 US-Dollar (63 US-Dollar/kg Fleisch) geschätzt (Garrison et al. 2022). Somit ist In-vitro-Fleisch im direkten Vergleich zu konventionell hergestelltem Fleisch nicht wettbewerbsfähig, könnte sich aber in Nischen durchsetzen. Preise für weitere zellkulturbasierte Produkte, z. B. Holz oder Leder, sind nicht bekannt.

### *Blick in die Zukunft*

In den vergangenen Jahren wurden mithilfe der Präzisionsfermentation (PF) und des Tissue Engineerings (TE) verschiedene **Materialien** erfolgreich, aber größtenteils noch experimentell hergestellt. Hierzu gehören u. a. pflanzliche Gewebe wie Holz (TE) (Beckwith et al. 2022) und Baumwollfasern (TE) (Varanasi 2023), tierische Fasern für „tierfreie“ Felle oder Wolle (PF) (Mundell 2022) und zellbasiertes (TE)<sup>9</sup> sowie kollagenbasiertes (PF)<sup>10</sup> Leder. Diese Produkte sind häufig noch (sehr) weit von einer Markteinführung entfernt, da sie sich in einem frühen Entwicklungsstadium befinden; dies gilt insbesondere für Materialien, die mittels TE hergestellt werden sollen. In experimentellen Kooperationen entstehen jedoch zunehmend Konzeptstudien, die zukünftige Nutzungsmöglichkeiten erforschen und aufzeigen, wohin die Reise gehen kann. Hierzu gehört auch Korvaa, eine transdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Industriedesign und Kunst, in deren Rahmen ein Kopfhörer entwickelt wurde, der ausschließlich aus mikrobiell hergestellten Materialien besteht, u. a. aus proteinbasierter Spinnenseide (PF) (MaterialDistrict 2019).

Im Bereich der **Lebensmittel**-Präzisionsfermentation liegt der Schwerpunkt derzeit auf der Entwicklung von Proteinen. In den USA sind bereits mehr als 30 „tierfreie“ Molkereiprodukte im Einzelhandel erhält-

<sup>8</sup> <https://www.upsidefoods.com>

<sup>9</sup> <https://www.vitrolabsinc.com>

<sup>10</sup> <https://www.modernmeadow.com>

lich, z. B. Eis, Milch und Käse (Hiessl und Rübberdt 2023; S. 19). Neben Molkereiprodukten werden in den kommenden Jahren auch Ei- und Hämoproteine (PF) an Bedeutung gewinnen. Lipide (Öle und Fette) und Kohlenhydrate (PF) befinden sich dagegen noch in einem frühen Entwicklungsstadium, und es dürfte noch einige Zeit dauern, bis solche Produkte auf den Markt kommen. Die Markteinführung zellkulturbasierter Produkte (TE), hier vor allem In-vitro-Fleisch, liegt voraussichtlich in fernerer Zukunft.

Die dynamischen Entwicklungen und Innovationen im Bereich der Biotechnologie und des Biomanufacturings könnten unsere Gesellschaft und Wirtschaft mittel- bis langfristig in eine Lab-grown Future führen, in der mithilfe individualisierbarer Zellfabriken bzw. Zelllinien beinahe jedes Produkt nach Maß hergestellt werden kann. Vor allem die Präzisionsfermentation ist ein vielversprechender Kandidat für wettbewerbsfähige Produktinnovationen. Schon heute wird an „**neuen Zellfabriken**“ geforscht, die die Möglichkeiten einer Lab-grown Future erweitern und zukünftig eine noch breitere Produktpalette ermöglichen könnten (Graf und Lohmann 2021): Von Lebensmitteln über Plattformchemikalien und neue Werkstoffe hin zu Energieträgern scheint alles möglich.

Mit Blick auf die Auswirkungen dieser Entwicklungen auf die Umweltpolitik widmet sich der folgende Emerging-Issues-Abschnitt den folgenden Fragen:

1. Welche Lebensmittel werden wir zukünftig aus dem Labor beziehen?
2. Welche Materialien können perspektivisch im Labor hergestellt werden?
3. Was werden zukünftige Biomanufacturing-Verfahren ermöglichen?
4. Welche Folgen für die Umwelt könnten sich aus diesen Entwicklungen ergeben?

### Emerging Issues

Die Entwicklung hin zu einer Lab-grown Future kann signifikante Veränderungen mit sich bringen, sei es in der Nachbildung natürlicher Materialien und Lebensmittel im Labor oder in der Verfügbarmachung verschiedenster weiterer Chemikalien und Stoffe durch Zellprozesse. Während eine Verlagerung der Produktion aus natürlichen Umgebungen ins Labor manche negativen Umweltwirkungen bestehender Technologien und Prozesse vermeiden könnte, bringen die la-



borbasierten Innovationen auch eigene Risiken und Nachteile für die Umwelt mit sich.

### 1. Lebensmittel aus der Zellfabrik

Mit dem fortschreitenden Anstieg der Weltbevölkerung (UN News 2024) steigt auch der Bedarf an Nahrungsmitteln. Die landwirtschaftliche Produktion von Lebensmitteln, insbesondere im Kontext der Viehwirtschaft/Fleischindustrie, hat eine Reihe negativer Umweltwirkungen. Bereits heute entfällt ca. ein Drittel der globalen Treibhausgasemissionen auf die Nahrungsproduktion (Dwyer 2023), und steigende Produktionsmengen bei gleichbleibenden Produktionsbedingungen würde die Klimakrise weiter verschärfen. Landwirtschaft ist ein bedeutender Grund dafür, dass sechs von neun planetaren Belastbarkeitsgrenzen (engl. planetary boundaries; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) o. J.) überschritten sind (Campbell et al. 2017). Gleichzeitig bedroht der Klimawandel die Ernährungssicherheit der Weltbevölkerung, sei es durch Ernteausfälle infolge von Dürren oder das vermehrte Auftreten von Parasi-

ten und Schädlingen in der Landwirtschaft, da steigende Temperaturen und veränderte Niederschlagsmuster ideale Bedingungen für deren Vermehrung und Ausbreitung schaffen (Maggiore et al. 2020).

Vor diesem Hintergrund bietet die Lab-grown Future verschiedene Potenziale, Nahrungsmittel im Labor zu produzieren und den wachsenden Nahrungsbedarf der Weltbevölkerung zu decken. In diesem Kapitel sollen mit Fisch und Milchproteinen aus dem Labor beispielhaft Entwicklungen jenseits von In-vitro-Fleisch aufgezeigt werden, welches bereits Gegenstand eines UBA-Trendberichtes<sup>11</sup> war (siehe Hintergrund).

Mittels Tissue Engineering plant das Hamburger Start-up BLUU, Fischarten wie Lachs, Regenbogenforelle und Karpfen im Labor zu erzeugen (BLUU GmbH 2023). Das kalifornische Start-up Finless produziert Blauflossen-Thunfisch im Labor, dessen Naturform insbesondere zur Verwendung in Sushi begehrt ist (Canon 2023). Beide Produkte befinden sich im Entwicklungsstadium und sind gegenwärtig nicht kommerziell verfügbar. Nach Angaben des Herstellers sollen Fischprodukte von BLUU 2024 eine Zulassung zur Markteinführung in Singapur und 2025 in den USA erhalten (BLUU GmbH 2023).

Fisch aus dem Labor bietet eine Reihe von Vorteilen sowohl gegenüber herkömmlicher Fischerei als auch gegenüber Fisch aus Aquakulturen. Im Gegensatz zu Fischfang auf dem Meer wird die häufig artbedrohende Überfischung von Wildbeständen der jeweiligen Fischarten vermieden. So war die Population des Blauflossen-Thunfisches 2010 wegen Überfischung auf 1,5 % der unbefischten Ursprungspopulation gefallen; die Bestände erholen sich dank mehrerer Schutzmaßnahmen und Fischereiauflagen bereits (Trinh 2023). Eine Erzeugung im Labor könnte weiteren Nutzungsdruck von den Wildbeständen nehmen und zur Erholung beitragen. Zudem verringert die Produktion im Labor das Tierleid, neben der nicht notwendigen Tötung der gewünschten Fische auch durch die Vermeidung von Beifang in der Fischerei (World Wide Fund for Nature (WWF) 2022), und könnte grundsätzlich zum Erhalt intakter mariner Ökosysteme beitragen.

Fischfang war im Jahr 2011 für etwa 4 % aller globalen Treibhausgasemissionen in der Lebensmittelproduktion verantwortlich, insbesondere durch die Verwendung fossiler Treibstoffe auf den Booten und Schiffen (Parker et al. 2018) – die ausgestoßenen 179 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente entsprechen in der Größenordnung den Gesamtemissionen Argentiniens im selben Jahr (173 t; International Energy Agency (IEA) 2024). Dieser Aspekt der Logistik, mitsamt seiner Umweltfolgen, entfällt für Laborprodukte. Fische aus natürlichen Lebensräumen sind außerdem vielfach mit Schadstoffen und Schwermetallen belastet (Lobitz und Rösch 2023). Unter Laborbedingungen könnten derartige Kontaminationen vermieden werden und würden damit ein für die Verbraucher\*innen weniger belastetes Endprodukt bieten.

Fischzucht in Aquakulturen ist zwar erheblich emissionsärmer als konventionelle Fischerei (MacLeod et al. 2020) und belastet die Biodiversität nicht, ist aber mit anderen Risiken behaftet: So vermehren sich manche natürlichen Parasiten in Aquakulturen besonders stark, was Risiken für Fischbestände inner- und außerhalb der Aquakulturen und für Verbraucher\*innen mit sich bringt. Weitere Belastungen entstehen durch die Antibiotika, mit denen die Fische behandelt werden (Buchmann 2022). Auch Ausbrüche von Zuchttieren aus Aquakulturen stellen eine Gefahr für umliegende marine Ökosysteme dar (Atalah und Sanchez-Jerez 2020). Die Produktion unter Laborbedingungen stellt im Vergleich dazu sicher, dass keine Kontamination des erzeugten Fisches mit Parasiten und Schadstoffen erfolgen kann, und die Interaktion mit natürlichen Fischbeständen wird verhindert.

Im Gegensatz zu In-vitro-Fleisch existieren für Fisch aus dem Labor noch keine Lebenszyklusanalysen der Umweltwirkungen; angesichts der nahezu identischen Produktionsweise ist aber von Gemeinsamkeiten auszugehen, womit auch hier vor allem der Energieaufwand und damit verbundene Emissionen zu nennen und in anderen Umweltwirkungsbereichen wie der Flächennutzung Vorteile des laborbasierten Produkts anzunehmen sind (Sinke et al. 2023).

Während sich Fisch aus dem Labor ähnlich wie In-vitro-Fleisch noch in der Forschungs- und Testphase befindet und bisher nicht für Endkund\*innen erwer-

<sup>11</sup> Zu In-vitro-Fleisch siehe „Die Zukunft im Blick: Fleisch der Zukunft. Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen von pflanzlichen Fleischersatzprodukten, essbaren Insekten und In-vitro-Fleisch“, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/die-zukunft-im-blick-fleisch-der-zukunft>

bbar ist, sind manche Anwendungen der Präzisionsfermentation der Markteinführung bereits deutlich näher. So testete Nestlé 2022 in Kooperation mit Perfect Day eine mittels Präzisionsfermentation erzeugte Milch aus „tierfreier“ Molke in einzelnen Orten in den USA (Hiessl und Rübberdt 2023).

Der globale Markt für Milchprodukte befindet sich kontinuierlich im Wachstum. Bis 2028 wird für den Milchsektor ein Wachstum des Bruttoerzeugnisses von mehr als 30 % gegenüber 2023 erwartet, auf dann 111,4 Mrd. US-Dollar (Statista GmbH 2024a). Der steigende Bedarf an Milchprodukten hat dabei negative Auswirkungen auf die Umwelt: Rinder emittieren Methan und tragen zum Klimawandel bei, hinzu kommen ein hoher Wasserverbrauch und hoher Flächenbedarf für den Anbau von Futter sowie Belastungen für Böden und Gewässer durch Dünger- und Pestizideinträge (Eberle und Mumm 2021). In einer durchschnittlichen europäischen Ernährung machen Milchprodukte etwa ein Viertel bis ein Drittel des gesamten ökologischen Fußabdrucks aus (Sandström et al. 2018).

Die relevanten Milchbestandteile im Labor zu erzeugen könnte, analog zu Entwicklungen im Bereich In-vitro-Fleisch und Leder aus dem Labor (siehe Emerging Issue 3), viele der mit Rinderzucht verbundenen negativen Umweltwirkungen aussparen oder zumindest reduzieren, da keine Nutztiere mehr benötigt würden, sofern kein fetales Rinderserum als Nährlösung verwendet wird. Der Einsatz von nachhaltigen, im Labor erzeugten Proteinen kann eine wichtige Rolle dabei spielen, dem globalen Problem der Unter- und Mangelernährung zu begegnen (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) et al.). Mikrobielle Proteine aus Präzisionsfermentation sind im Vergleich zu pflanzlich oder tierisch erzeugten Proteinen weniger anfällig für äußere Einflüsse wie Dürren oder Pandemien und nicht auf das Vorhandensein fruchtbaren Bodens oder gesunder Nutztiere angewiesen (Banks et al. 2022).

Der Zusatz von mikrobiell erzeugten Milchbestandteilen sorgt zudem dafür, dass „tierfreie“ Milchprodukte exakt identisch wie das tierische Vorbild schmecken, was die Akzeptanz bei Käufer\*innen deutlich vergrößern würde. Gegenwärtig erfüllen viele pflanzli-

che Milchprodukte (etwa aus Soja oder Hafer) nicht die Anforderungen an Milch: Beispielsweise sind sie nicht gleichermaßen lösungsfähig, schmecken bitter oder ihnen fehlen wichtige Aminosäuren und sie sind weniger leicht verdaulich (Boukid et al. 2023). Enzyme aus der Präzisionsfermentation können pflanzliche Milchprodukte zudem etwa viskoser und nahrhafter machen und dazu dienen, veganen Käse zu erzeugen, wie etwa durch das Berliner Start-up Formo<sup>12</sup> (Boukid et al. 2023).

Den genannten Chancen für die Umwelt stehen auch diverse Nachteile gegenüber. Grundlegend stellt die Erzeugung von Lebensmitteln im Labor eine hochtechnisierte Form der Nahrungsgewinnung dar, die erhebliche Mengen Energie benötigt, Emissionen verursacht und negative Umweltwirkungen mit sich bringt. Landwirtschaftliche Produktion ins Labor zu verlagern schafft Abhängigkeiten von hochspezialisierten Technologien mit hohem Energiebedarf, was etwa im Rahmen einer Energiekrise zu einer Versorgungskrise führen könnte. Auch gesellschaftliche Folgen können entstehen, beispielsweise durch eine perspektivisch reduzierte Nachfrage nach konventionellen Agrarprodukten, die stark agrarisch geprägte Regionen wirtschaftlich belasten und als Kulturlandschaft grundlegend verändern könnte. Auch indirekte Auswirkungen einer solchen Entwicklung, etwa auf Biodiversität und Naturschutz, müssen betrachtet werden, da beispielsweise existierende Monokulturen zum Futtermittelanbau ökologisch nachteilig sind (Haller et al. 2020). Zudem besteht die Gefahr, durch eine weitere Technisierung der Nahrungsmittelerzeugung die Entfremdung der Verbraucher\*innen von der Natur und dem Ursprung ihrer Nahrungsmittel weiter zu verstärken (Alvaro 2019).

Präzisionsfermentation hat sowohl hinsichtlich der möglichen Marktreife von Produkten als auch in Hinblick auf den ökologischen Fußabdruck einen elementaren Vorteil gegenüber dem Tissue Engineering: Während beim Tissue Engineering die gesamte Nutzmasse des Zielprodukts im Labor erzeugt werden muss, entstehen bei der Präzisionsfermentation einzelne Bestandteile von Lebensmitteln oder Chemikalien, die teilweise nur in kleinen Dosen dem Endprodukt zugegeben werden müssen, etwa Milchproteine für künstliche Milch. Für ein Kilogramm Endprodukt

<sup>12</sup> <https://formo.bio/>



liegt der benötigte Anteil des präzisionsfermentierten Zellprodukts bei 10 bis 70 Gramm (Good Food Institute (GFI) 2023). Dies ermöglicht es, Endprodukte mit präzisionsfermentierten Inhaltsstoffen zu konkurrenzfähigen Preisen auf den Markt zu bringen (Albert Schweitzer Stiftung 2019). Die „Verdünnung“ der Erzeugnisse der Präzisionsfermentation in Endprodukten sorgt zudem dafür, dass in Relation der ökologische Fußabdruck des Endprodukts geringer ausfällt als jener des erzeugten Materials. Bevor sich Präzisionsfermentation aber großflächig durchsetzen und die Lab-grown Future einläuten kann, müssen insbesondere Engpässe in der Produktionskapazität überwunden werden. Diese ist gegenwärtig deutlich zu klein, um die potenzielle Nachfrage nach den erzeugten Produkten zu bedienen.

Im Falle der Präzisionsfermentation ist zusätzlich noch zu klären, ob die erzeugten Lebensmittel als gentechnisch verändert zu betrachten sind. Diese Frage ist nicht zuletzt für den Zulassungsweg neuer Nahrungsmittel aus der Präzisionsfermentation in der EU ausschlaggebend: Entweder handelt es sich um „Novel Foods“<sup>13</sup> oder um „gentechnisch veränderte

Lebensmittel“ (Europäische Kommission (EK) 2003). Entscheidend ist, wie präzise die Abscheidung der erzeugten Grundstoffe von den erzeugenden Mikroorganismen gelingt und welcher Grenzwert für DNA-Rückstände angelegt wird. Diese Frage ist derzeit noch ungeklärt und ein Grund dafür, dass Start-ups aus dem Bereich Präzisionsfermentation häufig zunächst einen Markteintritt in anderen Regionen mit mutmaßlich innovationsfreundlicheren Richtlinien prüfen, etwa in Singapur oder den Vereinigten Staaten (Ronchetti et al. 2024).

Abseits von regulatorischen Aspekten wird der Einsatz von Gentechnik von vielen Menschen grundsätzlich als problematisch erachtet. Die Gründe der Ablehnung reichen hierbei von einer wahrgenommenen „Unnatürlichkeit“ über generelle Technologieskepsis bis hin zu eventuellen, unabsehbaren Langzeitfolgen für Gesundheit und Natur (Renn o.J.). Relevant ist hierbei allerdings, dass die Bewertung von Gentechnik sich je nach Einsatzgebiet durchaus unterscheidet: Während sogenannte „grüne“ Gentechnik die Verwendung in der Lebensmittelproduktion umfasst und mehrheitlich ablehnend betrachtet wird,

<sup>13</sup> Dabei handelt es sich laut EU-Verordnung 2015/2283 um Lebensmittel, die vor dem 15.05.1997 „in der Union nicht in nennenswertem Umfang für den menschlichen Verzehr verwendet wurden“ (Absatz 5) (Europäische Kommission (EK) 2015).

bezeichnet „weiße“ Gentechnik den Einsatz in speziellen Produktionsverfahren, etwa zur Herstellung von Enzymen für Waschmittel; dieses Einsatzgebiet erfährt in der Öffentlichkeit erheblich weniger Kritik (Renn o.J.). Somit spielt nicht zuletzt die Frage nach dem erzeugten Endprodukt eine entscheidende Rolle bei der gesellschaftlichen Akzeptanz von Gentechnik – und damit auch der Präzisionsfermentation.

## 2. Materialien aus der Zellfabrik

In der Lab-grown Future ist die Herstellung verschiedener Materialien im Labor möglich und keineswegs nur auf Lebensmittel beschränkt. Fortschritte insbesondere in der Präzisionsfermentation ermöglichen zumindest theoretisch die Produktion einer fast unbegrenzten Vielzahl von Materialien (siehe Hintergrund). Hier sollen beispielhaft die bereits in der Entwicklung befindlichen Labor-Materialien Holz und Leder betrachtet werden, um einen Überblick über die Umweltauswirkungen verschiedener Verfahren und beim Ersatz eines pflanzlichen und eines tierischen Materials zu illustrieren.

2022 gelang es einem Forschungsteam am Massachusetts Institute of Technology (MIT), Zellen der Zinnie, einer Blumenart (*Zinnia elegans*), im Labor zu erzeugen und durch 3D-Druck-Verfahren in verschiedene Formen zu bringen, um unterschiedliche Materialeigenschaften zu erreichen (Beckwith et al. 2022). Das angewandte Verfahren entspricht hierbei im Wesentlichen dem Tissue Engineering. Erklärtes Ziel ist es, das erfolgreich erprobte Verfahren zukünftig zur Laborproduktion von Holz einzusetzen (Berry o.J.). Der menschliche Bedarf nach und Umgang mit der Ressource Holz hatte und hat erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt: Seit Beginn der menschlichen Zivilisation hat die Erde etwa die Hälfte ihrer bewaldeten Fläche verloren (Crowther et al. 2015), und der überwiegende Teil der verbleibenden naturnahen Wälder ist geschädigt (Watson et al. 2018). Wälder sind ein unverzichtbarer Bestandteil der Ökosphäre und tragen wesentlich zur Regulierung des Erdklimas bei. Darüber hinaus bieten sie Lebensraum für eine Vielzahl von Arten und spielen eine zentrale Rolle im Wasserkreislauf (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2020a). Trotz ihrer wichtigen Rolle sind die Wälder weltweit durch eine wachsende Weltbevölkerung, effizientere Rodungsmethoden, den globalen Holzhandel und insbesonde-

re landwirtschaftlichen Flächenbedarf zunehmend in Gefahr (Crowther et al. 2015; López-Carr 2021). Zudem sind Wälder auch durch den menschengemachten Klimawandel erheblich bedroht (Hartmann et al. 2022). Ohne Änderungen im menschlichen Nutzungsverhalten könnten in 100 bis 200 Jahren sämtliche Wälder der Erde verschwunden sein (Bologna und Aquino 2020). Angesichts der Bedeutung von Wäldern für die Umwelt müssen daher Wege gefunden werden, Abholzung und Entwaldung global zu reduzieren.

Holz ist als Energieträger und Baustoff bisher nicht zuletzt wegen seiner weiträumigen Verfügbarkeit und niedrigen Kosten sehr attraktiv (Beckwith et al. 2022). Die Wertschöpfung im globalen Holzmarkt wird für 2023 auf 147,6 Mrd. Euro geschätzt, und es wird bis 2028 eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate von 3,69 % auf eine Wertschöpfung von 176,9 Mrd. Euro prognostiziert (Statista GmbH 2023a).

Angesichts steigender Nachfrage und gleichzeitig schwindender natürlicher Holzvorkommen kann das Verlagern der Produktion von Holz aus der natürlichen Umwelt ins Labor somit dazu beitragen, einerseits den globalen Holzbedarf zu bedienen und andererseits eine Alternative zur Extraktion von Holz aus Wäldern zu schaffen, Landnutzungsdruck von bedrohten Ökosystemen (z. B. Amazonas-Regenwald, sofern es um das Holz und nicht die Flächen geht) nehmen und zum Erhalt von Waldflächen beitragen. Zudem bietet die laborbasierte Erzeugung von Holz Chancen Abfallprodukte einzusparen, da das Material in der benötigten Menge und Form produziert werden kann und wenig bis kein Verschnitt in Abbau und Verarbeitung anfällt (Beckwith et al. 2022). Organische Emissionen und Belastungen wie Holzstaub würden wegfallen, und Holz aus dem Labor wäre – unabhängig von negativen Auswirkungen des Klimawandels auf bestehende Wälder – bei gleichbleibender Qualität nutz- und verfügbar (Müller-Dehgenhardt 2021).

Ein anderes Material, dessen laborbasierte Produktion sich abzeichnet, ist Leder. Im Gegensatz zu anderen Anwendungsbeispielen der Lab-grown Future gibt es in diesem Bereich Ansätze sowohl aus dem Tissue Engineering als auch aus der Präzisionsfer-

mentation: Das kalifornische Start-up VitroLabs<sup>14</sup> erzeugt Leder aus Rinder-Stammzellen, betreibt also Tissue Engineering. Firmen wie Le Quara<sup>15</sup> aus Peru oder Bucha Bio<sup>16</sup> aus New York nutzen hingegen Mikroorganismen, um Biopolymer bzw. Nanocellulose zu erzeugen, aus denen im nächsten Schritt synthetisches Leder produziert wird (Waltz und Nature Biotechnology 2022).

Natürliches Leder wird aus der Haut von Nutztieren hergestellt, vornehmlich von Kühen (Lau 2023). Die Gewinnung von Leder ist in der Regel ein Nebenprodukt der Fleischproduktion. Beides setzt die Schlachtung des Nutztiers voraus, somit hat unverarbeitetes Leder bereits Umweltwirkungen, die denen von (Rind-)Fleisch und Milchprodukten sehr ähnlich sind: Es hat einen hohen Flächenverbrauch, verbraucht viel Wasser und erzeugt wegen der Methanausscheidungen von Rindern eine große Menge Treibhausgase (Barrantes 2019). Neben den Umweltwirkungen der Tierzucht ist auch das anschließende Gerbverfahren hochgradig energieintensiv und verursacht bis zu 90 % der Gesamtemissionen in der Lederproduktion (Lau 2023). Zusätzlich zum hohen Energieverbrauch ist das industrielle Gerben von Leder auch deshalb problematisch, weil es eine Reihe negativer Umweltwirkungen mit sich bringt: Es verbraucht abiotische (nicht erneuerbare) Ressourcen, trägt zur Bildung von gesundheitsschädlichem bodennahen Ozon bei und ist potenziell schädlich für aquatische Ökosysteme – Abwässer der Gerbereien enthalten eine Mischung schädlicher organischer und anorganischer Chemikalien wie Chromsalz, Säuren, Basen, Fettungsmittel und organische Gerbstoffe (Notarnicola et al. 2011). Der ökologische Fußabdruck von einem kg mit Chrom gegerbtem Leder umfasst 60 bis 250 l verbrauchtes und zu reinigendes Wasser, 37,2 bis 210 Megajoule verbrauchte Energie, 2 bis 2,5 kg verwendete chemische Substanzen, die zu Abfällen transformiert werden müssen, und 4,3 bis 6,15 kg feste Abfälle (Corradini et al. 2016). Bei der Produktion von natürlichem Leder fallen zudem ca. 30 % sogenannter Verschnitt an, da etwa Narben aus dem Leder entfernt werden und das Leder zur weiteren Verarbeitung zugeschnitten wird (Barrantes 2019).

Künstliches Leder aus dem Labor könnte diesen Nachteilen an vielen Punkten begegnen. Durch den Verzicht auf die Tierhaltung werden erheblich weniger bzw. keine Fläche, Wasser und Futtermittel benötigt. Es entsteht bei der Entnahme von Stammzellen ein deutlich geringeres bzw. kein Tierleid. Es ist kein chemischer Gerbeprozess notwendig, die damit verbundenen Abfälle etc. entfallen. Und durch die Fähigkeit, das Zielprodukt in der gewünschten Menge und Form zu erzeugen, entfällt der Verschnitt von Lederresten. Allerdings muss für die verschiedenen Leder-Erzeugungsverfahren noch nachgewiesen werden, dass sie tatsächlich dem Original nahekommen, etwa im Hinblick auf Langlebigkeit und Robustheit (Lau 2023). Da es insbesondere mit Präzisionsfermentation aber auch möglich ist, Materialien über ihren natürlichen Zustand hinaus gentechnisch zu optimieren, ist dieses Ziel zumindest theoretisch erreichbar.

Gegen alle möglichen Vorteile des Biomanufacturings sind jedoch immer die im Hintergrundkapitel dargelegten Umweltwirkungen aufzuwiegen, die im Zuge hochtechnisierter Verfahren, wie sie im Biomanufacturing angewandt werden, zwangsläufig auftreten. Um diese Umweltfolgen im Kontext einzelner Produkte präziser erfassen zu können, ist eine umfassende Lebenszyklusanalyse der betreffenden Technologien notwendig, die auch Energiebilanzen, Verbrauch an Chemikalien und Wasser sowie das Abfallmanagement erfasst und den herkömmlichen Produkten gegenüberstellt. Nur so kann eine Abwägung darüber erfolgen, ob die Substitution von natürlichen Materialien durch Materialien aus dem Labor aus Umweltsicht überhaupt wünschenswert ist.

### 3. (Zell-)Fabriken für die Lab-grown Future

Fortschritte im Biomanufacturing ermöglichen künftig außerdem, neben den bereits genannten Lebensmitteln und Materialien, noch verschiedenste weitere Chemikalien im Labor zu produzieren. Steigender Bedarf an nachhaltig produzierten, kostengünstigen chemischen Grundstoffen begünstigt verschiedene Fortschritte in der Biotechnologie (Dudley et al. 2015): Lebende Zellen oder nachgebildete Zellprozesse bilden die Grundlage zur Herstellung der genannten Stoffe – die Zelle dient gewissermaßen als Fabrik,

<sup>14</sup> <https://www.vitrolabsinc.com/>

<sup>15</sup> <https://leqara.com/>

<sup>16</sup> <https://bucha.bio/>

in der gezielt verschiedene Chemikalien und Produkte erzeugt werden.

Obwohl die eingangs beschriebenen Prozesse in manchen Bereichen bereits sehr hoch entwickelt sind, existieren noch erhebliche, bisher ungenutzte Potenziale. Industrielles Biomanufacturing bietet die Chance, den umweltbezogenen, geopolitischen und wirtschaftlichen Herausforderungen zu begegnen, denen sich die herkömmliche, zentralisierte, industrielle Produktion von Chemikalien gegenüberstellt: Fortschritte im Biomanufacturing erlauben die kostengünstige, dezentrale Produktion in kleineren Anlagen (Clomburg et al. 2017), was unter anderem Emissionsersparungen im Transportbereich mit sich bringt sowie höhere Versorgungssicherheit mit pharmazeutischen Grundstoffen gewährleistet. Dezentralisierung ist etwa im Kontext von Cyberattacken (siehe Kapitel 2.9) oder von militärischen Konflikten (siehe Kapitel 2.5) nützlich, um den Ausfall wichtiger Versorgungsketten zu verhindern. Zudem bietet die Produktion im Labor die Möglichkeit, Energie- und Stoffströme präzise zu kontrollieren, was ein präzises Monitoring der Produktion und auch etwa das Recycling von Rohstoffen ermöglicht (Beckwith et al. 2021); zumindest bezüglich der konkreten Produktionsprozesse der Lab-grown Future wären Umweltfolgen somit deutlich genauer abschätzbar als in der herkömmlichen Produktion.

Entwicklungen im digitalen Bereich werden voraussichtlich erheblichen Einfluss auf die Lab-grown Future haben. Die Nutzung von KI, Machine Learning und digitalen Zwillingen ermöglicht es, Test- und Herstellungsprozesse weitgehend zu automatisieren und maschinell zu optimieren (Rathore et al. 2023), was sich positiv auf Effizienz und Ressourcennutzung auswirken kann (Udugama et al. 2021). Hierbei bleibt aber der große Energieverbrauch von KI-Technologien zu beachten (siehe Kapitel 2.8), der gegen die etwaigen Einsparungen aufzuwiegen ist. Zudem besteht die Gefahr, dass positive Umweltwirkungen, die aus Prozessoptimierungen etc. entstehen, durch Reboundeffekte konterkariert werden, wenn das Wachstum des Sektors dazu führt, dass die negativen Umweltwirkungen einer Steigerung der Gesamtproduktion die Einsparungen überwiegen.

Neben den genannten Optimierungen beschäftigt sich die Forschung auch mit neuen Verfahren des Biomanufacturings sowie mit neuen Plattformen für die Herstellung von chemischen Stoffen im Labor. So können etwa chemische Grund- und Biokraftstoffe aus Methan gewonnen werden – „Synthetische Methanotrophie“ (Nguyen und Lee 2021) – und damit das nach CO<sub>2</sub> zweitwichtigste Treibhausgas nutzbar machen, dessen Reduzierung einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz darstellen würde (Appelhans et al. 2022). Algen (siehe Kapitel 2.3) können als Plattform



zur Produktion von Enzymen, Proteinen, Hormonen, Antikörpern und weiteren Zielprodukten eingesetzt werden (Rasala und Mayfield 2015), und auch Insektenzellen sind als Plattformen nutzbar, etwa in der Pestizidproduktion (Drugmand et al. 2012). Ebenso können Schalen von Eiern und Meereslebewesen als Trägergerüst („scaffolding“) im Tissue Engineering eingesetzt werden – ein Weg, Nahrungsreste zu recyceln und die Umweltbilanz der Technologie zu verbessern (Hembrick-Holloman et al. 2020).

Noch weitreichenderes Innovationspotenzial liegt im Bereich des zellfreien Biomanufacturings. Die Verwendung lebender Zellen in bisherigen Herstellungsverfahren bringt Einschränkungen mit sich, da die zellulären Überlebensziele häufig den Produktionszielen entgegenstehen und das Produktionspotenzial beschränken (Rasor et al. 2021). Nicht alle chemischen Grundstoffe lassen sich im Rahmen des Biomanufacturings zellbasiert in bedarfsdeckender Menge produzieren (Dudley et al. 2015); erst die Lösung von zellbasierten Produktionseinschränkungen könnte die kostengünstige Massenproduktion einer Vielzahl chemischer Grundstoffe im Labor ermöglichen (Rollin et al. 2013; Bowie et al. 2020).

### Fazit für Umweltpolitik und -forschung:

Um die etwaigen Folgen der skizzierten Entwicklungen für die Umwelt in ihrer Tragweite realistisch einschätzen zu können, ist ein kontinuierliches, detailliertes Monitoring der Produktionsprozesse und ihrer Umweltwirkungen notwendig, um problematischen Entwicklungen begegnen zu können und Potenziale nutzbar zu machen. Neben den konkreten Umweltfolgen der Laborprozesse (z. B. durch Energieverbrauch) ist auch eine umfassende Bilanzierung des Energie- und Rohstoffbedarfs der Zellkulturen und der verwendeten Nährstoffe wichtig. Zudem müssen indirekte Wirkungen, etwa auf die Kulturlandschaft und die gesamte Gesellschaft, ebenfalls betrachtet werden, um Anwendungsfelder zu identifizieren, in denen die Lab-grown Future einen Beitrag zu einer nachhaltigeren Gesellschaft leisten kann.

Grundsätzlich stehen Innovationen im Biomanufacturing aus Nachhaltigkeitsperspektive vor dem Problem, dass die erwähnten Technologien vor allem dazu dienen, klima- und umweltschädliche Rohstoffe, Nahrungsmittel und Konsumgüter möglichst passgenau zu substituieren, statt eine tiefergehen-

de Veränderung des Konsumverhaltens anzustreben – diese wäre für eine nachhaltige Transformation aber notwendig. Dies macht die Lab-grown Future ohne entsprechende Steuerung anfällig für vielfältige Reboundeffekte: Die neuen Technologien tragen zu einer Erhöhung der verfügbaren Gesamtmenge des Rohstoffs bei, ohne Einsparungen in der konventionellen Erzeugung zu bewirken. Zwar scheint es gegenwärtig, als könnten die neuen Produkte einer Lab-grown Future möglicherweise eine Rolle bei der Abwendung der Dreifachkrise, bestehend aus Klimakatastrophe, Verschmutzungskrise und Artensterben, spielen; sie müssen hierfür aber in einen größeren Rahmen der Suffizienz eingebettet werden und dürfen nicht als scheinbarer „green fix“ eine Fortführung bisheriger Konsummuster unterstützen.

Die Chancen einer Lab-grown Future für die Umwelt bestehen daher weniger im vollständigen Ersetzen von Produkten aus konventioneller Erzeugung, was angesichts des hohen Produktionsaufwands zudem in absehbarer Zukunft kaum flächendeckend möglich sein wird – eine vollständige Substitution bis 2050 würde 33 % der weltweit insgesamt verfügbaren erneuerbaren Energie (EE) beanspruchen (El Wali et al. 2024). Vielmehr bietet die Kombination verschiedener Verfahren, z. B. Biomanufacturing, pflanzliche Alternativen und ökologischen Land-, Fisch- und Forstwirtschaft, Potenziale zum Erreichen von Nachhaltigkeits- und Klimazielen. Hierbei ist vor allem die intelligente Verschränkung verschiedener Maßnahmen relevant. So kann etwa Holz aus dem Labor allein nicht den Erhalt bedrohter Waldflächen gewährleisten. In Kombination mit einem reduzierten Landnutzungsdruck durch Viehzucht, etwa in Form eines insgesamt verringerten Fleischkonsums, einer teilweisen Substitution des Lederbedarfs mittels Biomanufacturing, nachhaltigerer Agrarmethoden z. B. im Anbau von Soja auf nicht gerodeten Flächen und umweltpolitischer Schutzmaßnahmen z. B. von Biodiversität, ist jedoch durchaus denkbar, dass bedrohte Waldflächen besser geschützt werden können. Die Umweltpolitik sollte daher die Entwicklung sektorenübergreifender Nachhaltigkeitsstrategien unter Berücksichtigung der möglichen Chancen und Risiken der Lab-grown Future in den Blick rücken.



## 2.2 Zukunft der Meerwasserentsalzung

**Trend:** Bereits heute ist Wasserknappheit in vielen Regionen weltweit ein Problem, das sich durch den Klimawandel und den steigenden Bedarf unserer Gesellschaft an Süßwasser weiter verschärfen wird. Die Entsalzung von Meerwasser stellt immer häufiger eine Lösung dar, um mehr Süßwasser zu erhalten. Eingesetzte Entsalzungsanlagen produzieren allerdings chemisch belastete Abfalllaugen und sind energieintensiv, entwickeln sich aber auch stetig weiter. Wird es künftig Meerwasserentsalzungsanlagen geben, die auch umweltfreundlich sind? Welche Chancen und Risiken ergeben sich durch den Einsatz von entsalztem Meerwasser für die Umwelt und die Gesellschaft?

### Emerging Issues

- ▶ Verfahren und Technologien für Meerwasserentsalzung auf dem Weg zur Umweltfreundlichkeit?
- ▶ Sole – Problemabfall oder zukünftiger Rohstoff?
- ▶ Süßwasser aus Meerwasserentsalzung: neu aufkommende Nutzungsmöglichkeiten

### In Kürze

- ▶ Dank der nahezu unerschöpflichen Ressource des Meerwassers bietet die Meerwasserentsalzung ein enormes Potenzial, um Süßwasserknappheit entgegenzuwirken. Weltweit gibt es mittlerweile etwa 22.000 Anlagen, die Wasser für den Trinkwassergebrauch, die Industrie und die Landwirtschaft entsalzen. Auch in anderen Sektoren, wie dem Energiesektor zur Wasserstoff-

produktion, gewinnt sie zunehmend an Bedeutung.

- ▶ Doch die herkömmliche Meerwasserentsalzung geht mit erheblichen Umweltauswirkungen einher. Trotz steigender Effizienz sind die traditionellen Verfahren sehr energieintensiv und nutzen zu 99 % fossile Brennstoffe, was zu erheblichen CO<sub>2</sub>-Emissionen führt. Die Kopplung von Entsalzungstechnologien mit erneuerbaren Energien sowie innovative Entsalzungsverfahren mit teils völlig anderen Wirkprinzipien bieten vielversprechendes Potenzial für eine emissionsarme Meerwasserentsalzung.
- ▶ Des Weiteren fallen bei der Meerwasserentsalzung große Mengen an hochkonzentrierter, teils giftiger Salzlake an, die derzeit meist ins Meer entsorgt wird, mit häufig erheblichen Umweltauswirkungen. Neueste Ansätze zur energetischen Nutzung der Sole, ihre Verwertung in der Fisch- und Algenzucht sowie zur Verwertung der in der Sole enthaltenen Rohstoffe sind vielversprechend.
- ▶ Viele Innovationen für eine nachhaltige Meerwasserentsalzung sind jedoch oft noch im Forschungsstadium und stehen vor wirtschaftlichen Herausforderungen. Weitere Forschungsinvestitionen,

Infrastrukturausbau sowie politische Unterstützung sind für eine umweltfreundlichere Meerwasserentsalzung entscheidend.

### Hintergrund

Zwei Entwicklungen stellen künftig die Sicherung der Süßwasserversorgung vor eine Herausforderung: Zum einen führen eine wachsende globale Bevölkerung und zunehmender Wohlstand zu steigenden Wasserbedarfen für die Energieversorgung, Industrie, Landwirtschaft und Gesellschaft (Kainrath 2023). Es wird prognostiziert, dass diese Nachfrage voraussichtlich nicht aus den Süßwasserressourcen gedeckt werden kann und mehr als 60 % der Weltbevölkerung bis zum Jahr 2030 unter Wasserknappheit leiden wird (Boretti und Rosa 2019).

Zum anderen wird die natürliche Versorgung mit Süßwasser durch ausbleibende Niederschläge und steigende Temperaturen immer schwieriger. Auch in Europa ist Wasserknappheit schon jetzt Realität: In einem durchschnittlichen Jahr sind ca. 30 % der Europäer\*innen bereits von Wasserknappheit betroffen. Während sich Wasserknappheit momentan noch auf Südeuropa konzentriert und Spanien und Portugal am stärksten betroffen sein werden, wird prognostiziert, dass bis 2050 ca. 98 % der europäischen Städte Rekorddürren erleben und auch in Deutschland regionale Wasserknappheit verstärkt auftreten wird (European Environment Agency 2021; Johnson 2021; Bundesregierung 2023a).

Die Entsalzung von Meerwasser wird immer häufiger als eine Lösungsmöglichkeit angesehen, um trotz der wachsenden globalen Wasserkrise den Süßwasserbedarf zu decken. Meerwasserentsalzung, auch als Desalination bezeichnet, ist ein technologisches Verfahren, um Trinkwasser aus Meerwasser zu gewinnen. Dieser Prozess der Entfernung von Salzen und anderen Verunreinigungen aus Meerwasser wird neben der Entnahme von Wasser aus dem Regen- und Grundwasser, Seen oder Bergen oder der Wiederaufbereitung von Wasser eine weitere Möglichkeit der Trinkwassergewinnung. Aus Umweltsicht haben Entsalzungstechnologien allerdings generell eine sehr schlechte CO<sub>2</sub>-Bilanz, erzeugen chemisch belas-

tete Salzlaugen und sind energie- sowie kostenintensiv (Lee und Jepson 2021).

Meerwasserentsalzung gibt es schon lange. Es wird überliefert, dass die Historie der Meerwasserentsalzung bis ins 4. Jahrhundert v. Chr. zurückreicht, als im antiken Griechenland ein erstes Verfahren zur Salz Entfernung aus Wasser dokumentiert wurde (Roser 1994), auch aus dem antiken Ägypten ist dies bekannt. Die solare Destillation war eine der frühesten Methoden zur Wasserentsalzung. Dabei wurde Meerwasser verdampft und das Kondensat wurde als Süßwasser gesammelt. Seitdem hat sich die Technologie kontinuierlich weiterentwickelt, wobei bedeutende Fortschritte im 20. Jahrhundert erzielt wurden: Zusätzlich zu einer Weiterentwicklung der Destillationsverfahren wurden neue Verfahren entwickelt, in denen Meerwasser durch eine semipermeable Membran gepresst wird, um Salze zu entfernen. Insbesondere die Einführung der sogenannten Umkehrosmose-Methode in den 1960er Jahren führte so zu einer weiteren Verbreitung von Meerwasserentsalzung.

### Einsatzgebiete und steigende Verbreitung und Nachfrage

Meerwasserentsalzung wird weltweit für verschiedene Zwecke eingesetzt, große Mengen an Süßwasser benötigen beispielsweise die **Trinkwasserversorgung** und **Industriezweige** wie die Chemie- und Lebensmittelproduktion (International Desalination Association 2011). In der **Landwirtschaft** wird entsalztes Meerwasser für die Bewässerung von landwirtschaftlich genutzten Flächen verwendet. Dies ermöglicht die Erhaltung von landwirtschaftlichen Aktivitäten in trockenen Regionen. Auch in der Öl- und Gasförderung werden erhebliche Mengen Wasser benötigt. Durch Entsalzung kann dieses Wasser in Bohrungen zur Förderung eingesetzt werden. Ein besonders großer Abnehmer von entsalztem Meerwasser ist der Tourismus, insbesondere auf Inseln und an Küsten, um den Wasserbedarf der Hotels und Resorts zu decken. Entsalztes Meerwasser wird auch in **Notfällen und Katastrophensituationen** eingesetzt, um Trinkwasser bereitzustellen, wenn herkömmliche Wasserquellen nicht verfügbar oder verunreinigt sind. Die Anwendungsbeispiele verdeutlichen die Vielseitigkeit und Bedeutung der Meerwasserentsalzung in verschiedenen Bereichen, um die Wasserbedürfnisse von Gemeinden, Industrien und anderen Einrichtungen zu decken.

Die Verbreitung und Nutzung von Anlagen zur Meerwasserentsalzung haben in den vergangenen Jahrzehnten weltweit zugenommen. Vor allem in ariden Regionen und Küstengebieten, die von Wasserknappheit betroffen sind, hat die Meerwasserentsalzung eine entscheidende Rolle bei der Sicherstellung einer zuverlässigen Trinkwasserversorgung gespielt. Bereits heute ist entsalztes Meerwasser für mehr als 300 Mio. Menschen weltweit die einzige Wasserquelle (Macher 2023). Mittlerweile ist die Zahl an operativen Entsalzungsanlagen auf knapp 22.000 weltweit gestiegen. Die größten stehen in Saudi-Arabien, Israel, den Vereinigten Arabischen Emiraten sowie den USA (Elsner 2023). Die Länder des Mittleren Ostens und Nordafrikas (MENA) haben mit 54,1 % anteilig die größten Entsalzungskapazitäten weltweit. Darauf folgt mit 19,1 % Amerika; 13,4 % der weltweiten Entsalzungskapazitäten entfallen auf Europa (Statista GmbH 2002; Johnson 2021). Während Spanien 65 % der europäischen Entsalzungskapazitäten hält und damit der größte Entsalzungsnutzer ist, hat die Methode auch im Norden Europas an Bedeutung gewonnen. So entfallen 4 % der europäischen Entsalzungskapazität auf Deutschland (Blue Economy Observatory 2021). Beispielsweise auf Helgoland wird seit 1990 Süßwasser und damit Trinkwasser durch Entsalzung gewonnen (Blue Economy Observatory 2021; Versorgungsbetriebe Helgoland 2023).

Die Entwicklung des Marktes für Meerwasserentsalzung zeigt eine steigende Tendenz, da die Nachfrage nach Süßwasser in vielen Regionen weltweit wächst. So ist prognostiziert, dass das globale Marktvolumen von 19,29 Mrd. US-Dollar im Jahr 2021 auf 32,02 Mrd. US-Dollar im Jahr 2027 ansteigen wird (Research and Markets 2022). Einige wichtige Trends und Entwicklungen auf dem Markt der Meerwasserentsalzung lassen sich beispielsweise durch das stetige globale Wachstum der Anzahl von Meerwasserentsalzanlagen beschreiben, die entstehen, um den steigenden Wasserbedarf zu decken. Seit 1980 ist die Kapazität der operativen Meerwasserentsalzanlagen exponentiell gestiegen, von einigen wenigen auf ca. 16.000 im Jahr 2019. Während dies 1980 noch bedeutete, dass nicht einmal knapp 5 Mio. m<sup>3</sup> Wasser pro Tag entsalzt wurden, stieg die Zahl auf ca. 95,37 Mio. m<sup>3</sup> pro Tag im Jahr 2019 an (Jones et al. 2019). Die steigenden Entsalzungskapazitäten sind in Abbildung 4 veranschaulicht. Besonders in wasserarmen Gebieten und Küstenregionen wird die Entsalzung weiter an Bedeutung gewinnen, nicht zuletzt bedingt

durch den Klimawandel. Großprojekte zur Meerwasserentsalzung werden vor allem in den ariden Regionen des Nahen Ostens werden durchgeführt, um den wachsenden Wasserbedarf zu decken, um Entwicklung überhaupt zu ermöglichen (Behrens 2017; Jones et al. 2019). Es gibt aber auch kleinere Projekte und dezentrale Meerwasserentsalzanlagen, um lokale Wasserversorgungsprobleme zu lösen. Dies kann auch in entlegenen oder ländlichen Gebieten sinnvoll sein.

### *Einsatz und Auswirkung verschiedener Entsalzungstechnologien*

Die Technologien zur Meerwasserentsalzung lassen sich in membrane Methoden und thermale Methoden unterscheiden (Paál 2020; Glade et al. 2022). Zu der am weitesten verbreiteten Technologie zählt die Umkehrosmose (engl. „Reverse Osmosis“, RO), eine membrane Methode: Hier wird das Meerwasser durch eine semipermeable Membran gepresst, die Salz und andere Mineralien zurückhält. Das Wasser, das durch die Membran fließt, ist entsalzt und kann als Trinkwasser verwendet werden. Als thermale Technologien sind die mehrstufige Entspannungsverdampfung (engl. „Multi-Stage Flash Distillation“, MSF) und die Multi-Effekt Destillation (MED) weit verbreitet. Bei diesen Verfahren wird das Meerwasser in mehreren Stufen verdampft und kondensiert, um das Salz zu entfernen. Es gibt auch andere Verfahren zur Meerwasserentsalzung, wie die Elektrodialyse (ein chemischer Prozess, durch den Ionen von ungeladenen Lösungsmitteln und Verunreinigungen getrennt werden und die Säure- und Basenkonzentration erhöht wird, während die Salzlösung sinkt), oder Gefrierprozesse (hier wird Meerwasser gefroren, um salzfreie Eiskristalle zu gewinnen); diese sind allerdings weniger verbreitet. Einen Überblick über die eingesetzten Technologien zeigt Abbildung 4 (Jones et al. 2019). Es lässt sich erkennen, dass die Umkehrosmose (RO) für 69 % des gesamten Entsalzungsaufkommens weltweit eingesetzt wird. Zusammen mit den zwei thermale Methoden der mehrstufigen Entspannungsverdampfung (MSF) (entsalzt 18 %) und der Multi-Effekt Destillation (MED) (entsalzt 7 %) werden die drei Methoden für 94 % des weltweiten Entsalzungsaufkommens eingesetzt. Weitere Methoden, hierzu zählen u. a. die Elektrodialyse (ED) und die Nanofiltration (NF), kommen nur selten zum Einsatz und werden zusammengefasst für 6 % des entsalzten Wassers weltweit genutzt.

Abbildung 4 (Jones et al. 2019) zeigt außerdem die Entwicklung der einzelnen Entsalzungstechnologien. Seit dem Jahr 2000 sind insbesondere Anzahl und Kapazität derjenigen Anlagen, die die Umkehrosmose nutzen, exponentiell gestiegen, während die mehrstufige Entspannungsverdampfung auf einem gleichbleibenden Niveau verharrt. Die Wahl der Technologie hängt neben unterschiedlichen Energie- und Kosteneffizienzen auch von dem Salzgehalt der Frischwasserarten ab. So wird neben Meerwasser auch Brackwasser entsalzt, dieses hat einen geringeren Salzgehalt und Anlagen operieren effizienter, wenn die Technologie und die Frischwasserressourcen zusammenpassen. Große Anlagen, die die thermalen Methoden nutzen, befinden sich hauptsächlich im Mittleren Osten, da sich diese am besten für Wasser mit sehr hohem Salzgehalt eignen, während Technologien wie Umkehrosmose gut für verschiedene Arten von Salzgehalt sind. Grund für den vermehrten Einsatz des Umkehrosmoseverfahrens ist ebenfalls die bessere Energie- und Kosteneffizienz, vor allem im Vergleich zur mehrstufigen Verdampfung.

Weltweit fallen bei der Entsalzung von Meerwasser ca. 141,5 Mio. m<sup>3</sup> Salzlake pro Tag an, das sind 50 % mehr Lake als entsalztes Wasser (Jones et al. 2019). Das ist so viel Lake pro Jahr, dass man die Hälfte Deutschlands ca. 30 cm hoch überfluten könnte (Mrasek 2019). Die meiste Lake (ca. 70,3 %) wird in MENA-Staaten produziert, wo Entsalzungsanlagen im Vergleich die niedrigste Entsalzungseffizienz auf-

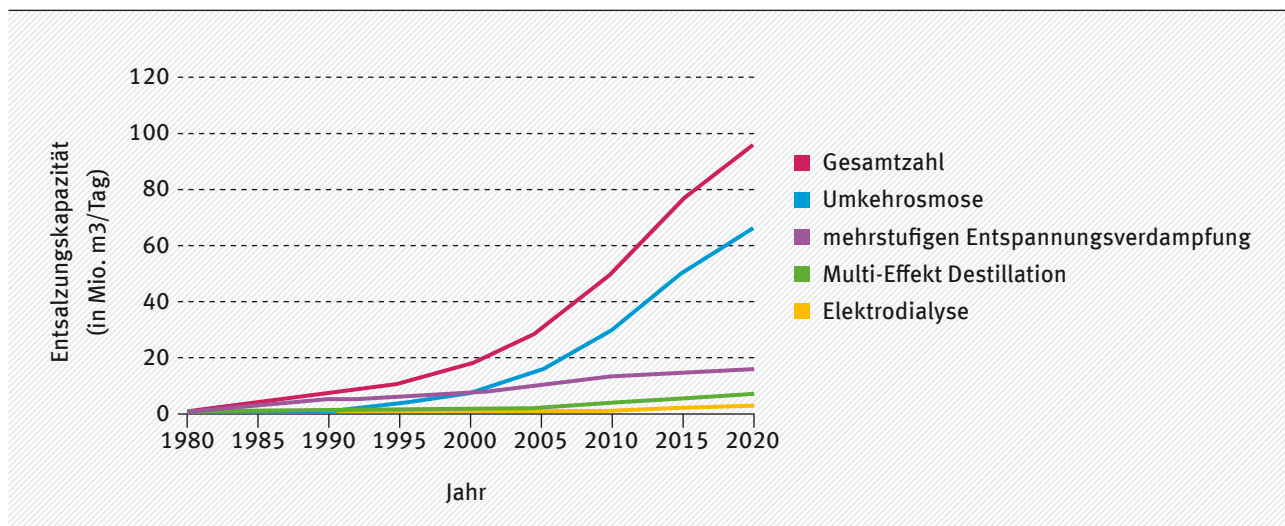
weisen, da häufig thermale Technologien (MFS; MED) verwendet werden. Sie sind weniger entsalzungseffizient als membrane Technologien (RO). Die Entsalzungseffizienz hängt neben der Methode auch von der Wasserqualität ab. (Jones et al. 2019). Die entstehende Lake ist insofern umweltschädlich, da sie neben dem Salz Chemikalien enthält, die in der Entsalzung anfallen (d. h., die eingesetzt werden müssen, um die Entsalzung überhaupt zu ermöglichen), und da die Lake häufig im Meer entsorgt wird, was die kostengünstigste Entsorgungsmöglichkeit darstellt. Für die Entsorgung von Lake gibt es bislang keine Regelungen. Der höhere Salzgehalt und Chemikalien an den fraglichen Eintragungsstellen tragen zu niedrigem Sauerstoffgehalt bei und Meeresorganismen werden in Mitleidenschaft gezogen.

*Blick in die Zukunft*

Meerwasserentsalzung erlaubt „business as usual“: Während der Klimawandel stetig voranschreitet und Süßwasserverfügbarkeit kritischer wird, werden neue Regionen mit Defiziten in der Wasserversorgung auch in Europa und Deutschland entstehen. Die zunehmende globale Wasserknappheit treibt die Entwicklung der Entsalzung als widerstandsfähige Alternative zu herkömmlichen Wasserquellen wie Seen und Flüssen voran. Der CEO von DME, einem deutschen Thinktank zu Entsalzung, Claus Mertes, bestätigt ein jährliches Wachstum des Entsalzungsmarktes um etwa 15 % (Goergen 2022). Was bereits heute für 300 Mio. Menschen unverzichtbar ist (Macher 2023),

Abbildung 04

**Wasserentsalzungskapazitäten der verschiedenen Technologien in operativen Anlagen**



Quelle: eigene Darstellung nach Jones et al. 2019; S. 1348

wird durch den Klimawandel und das Bevölkerungswachstum zukünftig in weiteren Regionen für die Wasserversorgung unverzichtbar sein, wenn es nicht bedeutende Änderungen in Bezug auf die Wassernutzung und den -verbrauch/die Wassereinsparungen geben wird. Schon bis 2030 wird weltweit eine 40%ige Diskrepanz zwischen Trinkwassernachfrage und -angebot erwartet (United Nations Environment Programme (UNEP) o.J.). Damit wird die Lösung umweltrelevanter Probleme der Meerwasserentsalzung noch mehr in den Fokus rücken.

Der Markt entwickelt sich kontinuierlich weiter, Technologien werden effizienter (Jones et al. 2019). In einem möglichen zukünftigen Entwicklungskorridor ist es denkbar, dass für Wasserentsalzungsanlagen statt fossiler Brennstoffe künftig mehr erneuerbare Energien wie Solarenergie genutzt werden. Auch könnten Forschungs- und Entwicklungsfortschritte es möglich machen, die Nachhaltigkeit der Prozesse zu verbessern und kostengünstiger zu gestalten. Auch bezogen auf die chemisch belasteten Abfalllaugen wird bereits daran geforscht, dass diese anderweitig genutzt werden, z. B. für die Fischzucht, oder dass für andere Produktionsbereiche wichtige Mineralien wie beispielsweise Natrium, Magnesium, Kalzium und Kalium aus der Lauge gewonnen werden können (Jones et al. 2019).

Mit Blick auf die Auswirkungen dieser Entwicklungen auf die Umweltpolitik widmet sich der folgende Emerging-Issues-Abschnitt den folgenden Fragen:

1. Wie können neue Verfahren und Technologien in Zukunft eine Meerwasserentsalzung ermöglichen, in der Kosten gesenkt, die Energieeffizienz gesteigert und umweltfreundliches Süßwasser produziert wird?
2. Welche Rolle spielt Sole zukünftig in der Entwicklung von Meerwasserentsalzung und gibt es zukünftig vielleicht weitere Nutzungsmöglichkeiten?
3. Welche künftigen Nutzungsmöglichkeiten wird es für entsalztes Wasser geben?

### Emerging Issues

Wie dargestellt, hat die Bedeutung von Meerwasserentsalzung, um den steigenden Bedarf an Süßwasser zu decken, stark zugenommen. Damit steigen auch die Notwendigkeit und Nachfrage nach einer umweltverträglichen und nachhaltigen Entsalzung. Die Sole

als Nebenprodukt der Meerwasserentsalzung stellt ein Risiko für die Umwelt dar, enthält jedoch auch wertvolle Ressourcen, die viel Potenzial zur Weiterverwertung bergen. Zudem eröffnen sich neue Anwendungsgebiete für entsalztes Wasser, durch die unter anderem die Auswirkungen des Klimawandels vermindert werden können.

### 1. Technologien für Meerwasserentsalzung auf dem Weg zur Umweltfreundlichkeit?

Die Meerwasserentsalzung zählt zu den energieintensivsten Methoden der Wasseraufbereitung, ihr jährlicher Energieverbrauch wird auf 75,2 Terawattstunden geschätzt (Nassrullah et al. 2020). Dies übertrifft den Jahresstromverbrauch Berlins im Jahr 2022 um das Sechsfache (dpa 2023). Dieser Energiebedarf wird zu über größtenteils aus fossilen Brennstoffen gedeckt (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) 2014), was einen hohen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck zur Folge hat. Neben den CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen die Entsorgung der Sole (siehe Emerging Issue 2), die Wasserentnahme und -einleitung sowie der Anlagenbau herkömmlicher Entsalzungsmethoden negative Umweltauswirkungen, die berücksichtigt werden müssen (Jones et al. 2019; Elsaid et al. 2020a; Elsaid et al. 2020b).

Ein zentraler Aspekt in der Diskussion um umweltfreundlichere Meerwasserentsalzung ist die Nutzung **erneuerbarer Energien**. Ökobilanzstudien haben gezeigt, dass ein Wechsel von fossilen zu erneuerbaren Energieformen bei Umkehrosmoseanlagen das Potenzial hat, die negativen Auswirkungen auf Indikatoren wie Klimawandel, Ökosystemqualität, Ressourcen und menschliche Gesundheit um bis zu 91 % zu reduzieren (Nasrollahi et al. 2023). Besonders erfolgreich ist dabei die Kombination von Photovoltaik (PV) und Umkehrosmose (RO). Erste großangelegte Solarentsalzungsanlagen wurden bereits errichtet, beispielsweise in Saudi-Arabien. In Westaustralien ist die Nutzung von erneuerbaren Energien für neue Entsalzungsanlagen sogar verpflichtend (Hernandez und West 2022) und die Kopplung wird allgemein zunehmend erschwinglicher, da die Kosten für erneuerbare Energien künftig weiterhin sinken werden und schon heute meist günstiger als bei fossilen Energien sind (Pistocchi et al. 2020). Nach einem Bericht der Global Clean Water Desalination Alliance aus dem Jahr 2015 könnte die Nutzung von erneuerbaren Energien zur Meerwasserentsalzung im Jahr 2040 ca. 83 t CO<sub>2</sub> jährlich einsparen (gegenüber Emissionen

von 218 t CO<sub>2</sub> in 2040 bei Beibehaltung fossiler Energiequellen; Global Water Desalination Alliance 2015). Bis zu einer umweltverträglichen, erschwinglichen und energieeffizienten Meerwasserentsalzung ist der Weg jedoch noch weit.

Gleichzeitig kommen aus der Forschungswelt eine Vielzahl umweltfreundlicherer Entsalzungsansätze auf: Zu diesen Ansätzen gehören Verfahren, die das elektrische Potenzial von Ionen im Salzwasser nutzen, wie beispielsweise die Elektrodialyse (ED) und die kapazitive Deionisation (CDI). Beide Techniken sind allgemein energieeffizienter, da sie keine druckbasierten Verfahren nutzen, wie die Umkehrosmose. Außerdem ist eine geringere chemische Vorbehandlung zur Entfernung von Partikeln und Schadstoffen erforderlich, was einerseits die Kosten senkt und andererseits die Umweltbelastung reduziert. Andere Techniken berücksichtigen die unterschiedliche Löslichkeit von Salzen und Verunreinigungen in Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur, wie die Temperature Swing Solvent Extraction (TSSE), oder nutzen den natürlichen osmotischen Druck von Salzwasser, wie die Vorwärtsosmose (FO). Zusätzlich zu diesen Innovationen werden bestehende Verfahren optimiert: zum Beispiel durch den Einsatz funktionaler Membranmaterialien, darunter magnetische und antibakterielle Membranen, sowie durch den Einsatz biologisch abbaubarer „Green Chemicals“ (Pervov et al. 2018). Eine interessante Alternative zu den herkömmlichen Verfahren bietet außerdem die Microbial Desalination Cell (MDC). Dieses bioelektrochemisch basierte Entsalzungssystem könnte eine energieeffiziente Technologie darstellen, die mithilfe von Mikroorganismen (z. B. Algen) nicht nur Wasser entsalzt, sondern gleichzeitig elektrische Energie und im Wasser enthaltene Rohstoffe extrahiert. Interessant sind dabei auch die Nebenprodukte Wasserstoff und Biomasse (Al-Mamun et al. 2018; Ewusi-Mensah et al. 2021; Imoro et al. 2021; Gujjala et al. 2022; Rossignolo et al. 2022). Claus Mertes von DME, einer zentralen Kontaktstelle für nationale und internationale Interessen bzgl. der Meerwasserentsalzung, zeigte sich auf der vom UBA organisierten Zukunftsthemenkonferenz optimistisch, dass umweltverträglichere Technologien wie die mikrobielle Entsalzung die etablierte Umkehrosmose zukünftig ersetzen könnten (Goergen 2022).

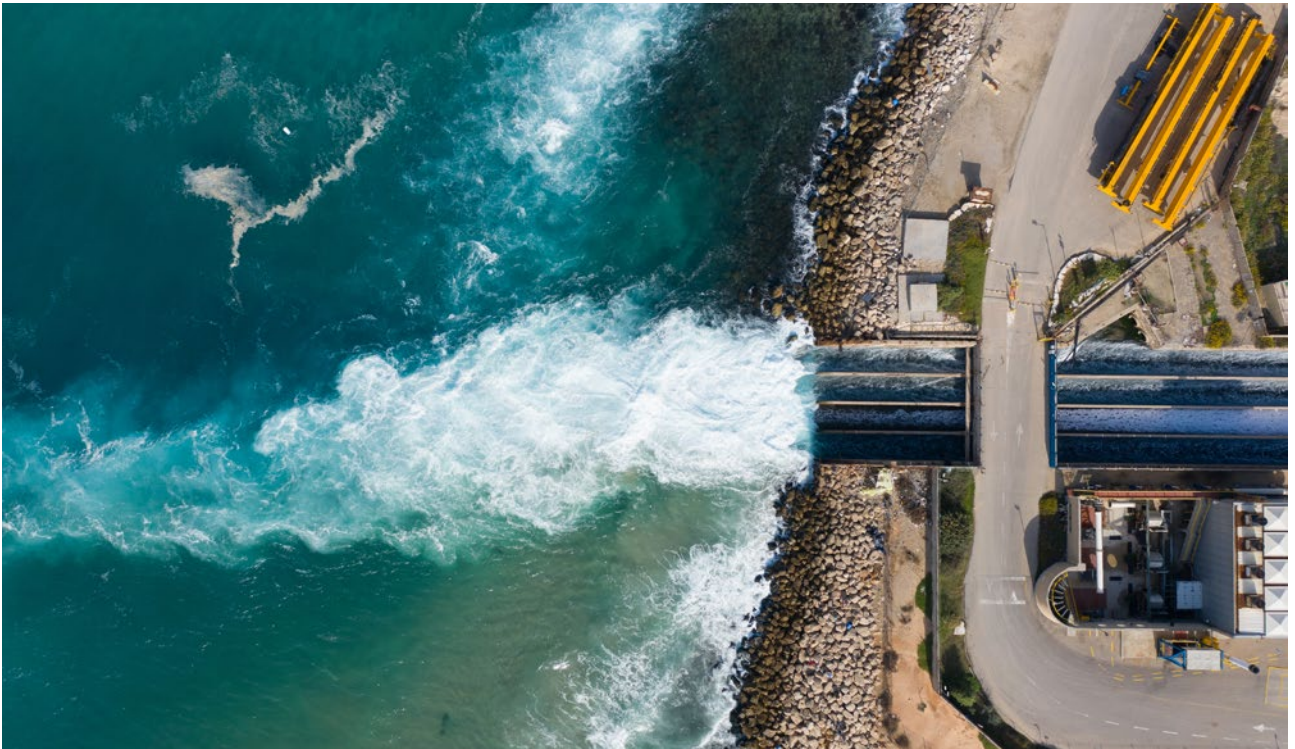
Aufkommende Innovationen offenbaren das Potenzial, die Umweltauswirkungen der Meerwasserentsal-

zung erheblich zu reduzieren. Diese Ansätze befinden sich jedoch häufig noch im Forschungsstadium und sind bisher nicht im großen Maßstab umsetzbar. Sie stehen zudem in direkter Konkurrenz zu herkömmlichen Verfahren, die oftmals – kurzfristig gerechnet und ohne Einrechnung externer Kosten – noch wirtschaftlicher sind (Lee und Jepson 2021). Die Implementierung dieser neuartigen Systeme erfordert intensive Forschung und Langzeitdemonstrationen, die durch politische Maßnahmen unterstützt werden sollten.

### *2. Sole – Problemabfall oder zukünftiger Rohstoff?*

Für jeden Liter Wasser, der aus der Entsalzung gewonnen wird, entstehen gegenwärtig ca. 1,6 l Sole – eine erhitzte, hochkonzentrierte Salzlösung, die häufig mit Schwermetallen und einer Vielzahl von Chemikalien belastet ist. Die Chemikalien in der Sole stammen meist aus dem Verfahren zur Wassergewinnung und sind je nach Methode mehr oder weniger stark vorhanden. In diesem giftigen Cocktail verbergen sich jedoch auch wertvolle Rohstoffe, z. B. Lithium, die für eine nachhaltige Energiezukunft von zentraler Bedeutung sind. Die Gewinnung dieser Rohstoffe aus Meerwasser und Sole hat in den vergangenen Jahren aufgrund der im Vergleich zu Landreserven tausendfach höheren verfügbaren Menge verstärktes Interesse geweckt (Morillo et al. 2014; Lim et al. 2023).

Derzeit wird die Sole in der Regel in die Umwelt geleitet, darunter zu 80 % ins Meer – mit erheblichen Umweltrisiken. An den Einleitstellen führen der höhere Salzgehalt und die erhöhte Temperatur häufig zu einer Sauerstoffverarmung, die das marine Leben gefährdet (Jones et al. 2019; Hossein Davood Abadi Farahani, Mohammad et al. 2020). Besonders anfällig sind flache, geschlossene und semi-geschlossene Gebiete mit hoher Artenvielfalt (Shokri und Sanavi Fard 2023). Hinzu kommt die Akkumulation von Schadstoffen. So haben beispielsweise Alharbi et al. (2017) in einer Sedimentuntersuchung erhöhte Schwermetallkonzentrationen an einer Probenahmestelle bei der Entsalzungsanlage Al-Khafij am Persischen Golf nachweisen können. Diese Umweltrisiken treten zunehmend in den Fokus öffentlicher Debatten. So wurden, beispielsweise in Kalifornien, Meerwasserentsalzungsprojekte durch Proteste gesellschaftlicher Initiativen gestoppt (Haddad et al. 2018; Ibrahim et al. 2021; Goergen 2022).



Übliche Verfahren zur Bewältigung der Umweltproblematik umfassen die Verdünnung der Sole mit salzarmem Wasser, darunter Kühl-, Ab- oder Meerwasser, und die Einleitung in Regionen mit starken Meeresströmungen (Panagopoulos et al. 2019; Shokri und Sanavi Fard 2023). Allerdings ist bisher unklar, ob und inwiefern diese Methoden die Umweltrisiken der Soleeinleitung reduzieren können – zumal auch Chemikalien eingeleitet werden. In jedem Fall ergibt sich hier Regelungsbedarf.

Vielversprechender sind Ansätze zur Verwertung der Sole oder der darin enthaltenen Stoffe. Im Folgenden werden ausgewählte Beispiele aufstrebender Methoden der aktuellen Forschungslandschaft vorgestellt:

- ▶ **Landwirtschaftliche Nutzung der Sole:** Vielversprechend ist die Verwendung der (gereinigten) Sole, die nicht mit Schwermetallen belastet ist oder bereits behandelt wurde, in der Algen- und Fischzucht sowie in der Bewässerung von Futtermittelgewächsen und anderen Nutzpflanzen (Shokri und Sanavi Fard 2023). Algen wie Spirulina können in der Sole enthaltene Mineralien und Schwermetalle neutralisieren (Sánchez et al. 2015).
- ▶ **Energetische Nutzung der Sole in Salzgradientenkraftwerken,** auch bekannt als „Blue Energy“-An-

lagen, wobei entlang einer Ionenaustauschmembran durch den Salzgradienten zwischen Meerwasser und Sole elektrischer Strom entsteht, der beispielsweise für andere betriebliche Komponenten weiterverwendet werden kann. Durch diese Nutzung können die Anlagen nicht nur zu einer besseren Energieeffizienz beitragen, sondern gleichzeitig auch die Umweltbelastung erheblich reduzieren (Lanjewar et al. 2020).

- ▶ **Konzentrationsanierung („Brine Mining“):** Rohstoffe wie Schwermetalle, Mineralien und seltene Erden wie Uran und Lithium werden beispielsweise durch Zero Liquid Discharge (ZLD) aus der Sole gewonnen und wiederverwendet. Für die Aufkonzentrierung der Sole werden vor allem thermische Verdampfungs- und Kristallisationsprozesse angewandt. Als nachhaltige Variante eignet sich beispielsweise die Temperature Swing Solvent Extraction (TSSE), wobei das Wasser durch ein Lösungsmittel extrahiert und anschließend bei niedrigen Temperaturen verdunstet wird (Boo et al. 2020). Hohe Qualitätsanforderungen für gewonnene Rohstoffe und die damit verbundenen Kosten führen dazu, dass Brine Mining in erster Linie in unternehmensinternen Rückführungsprozessen Anwendung findet, so beispielsweise bei der Rückgewinnung von Natrium und Chlor als

Natriumhydroxid und Salzsäure (Chandler 2019; Pistocchi et al. 2020; Del Villar et al. 2023).

- ▶ Minimierung des Einsatzes schädlicher Chemikalien durch antibakterielle Membranen, zusätzliche Vorreinigungsstufen oder die Verwendung von umweltfreundlichen Chemikalien („Green Chemicals“), die durch ihre biologische Abbaubarkeit die Umweltauswirkungen der Sole verringern (Pervov et al. 2018).

Die vorgestellten Ansätze zur umweltfreundlicheren Behandlung von Sole sind vielversprechend, bringen jedoch in ihrem aktuellen Entwicklungsstand noch Herausforderungen und Abwägungen mit sich. Die Verwendung von Green Chemicals erfordert Kompromisse in der Effizienz (Pervov et al. 2018), während die Solenutzung in der Fischzucht strengere Überwachung und Kontrolle erfordert, um die Anreicherung giftiger Stoffe in den Fischen zu vermeiden. Bisherige ZLD-Verfahren sind energieintensiv und bergen somit wiederum potenzielle Umweltrisiken (Shokri und Sanavi Fard 2023). Die geringen Konzentrationen von Uran und Lithium in der Sole erschweren ihre kommerzielle Nutzung. Weitere Forschung ist notwendig, um diese neuen Ansätze gegenüber den herkömmlichen Methoden der Sole-Einleitung ins Meer wettbewerbsfähiger zu gestalten und eine nachhaltige Lösung weg von Sole-„Entsorgung“ hin zur Sole-„Ver-

wertung“ zu finden. Als Zwischenschritt ist die Regulierung der Entsorgung unbedingt zu adressieren.

### 3. Süßwasser aus Meerwasserentsalzung: neu aufkommende Nutzungsmöglichkeiten

In Regionen mit knappen alternativen Wasserquellen oder hohen Ansprüchen an die Wasserqualität gewinnt entsalztes Meerwasser zunehmend an Bedeutung für die Trinkwasserversorgung, Industrie und landwirtschaftliche Bewässerung. Wassereinsparungen stehen weniger im Fokus. Neue Nutzungsformen könnten den Beitrag der Meerwasserentsalzung zur Bewältigung der Herausforderungen des Klimawandels weiter erhöhen, beispielsweise bei der Produktion von „Grünem Wasserstoff“ mittels erneuerbarer Energien oder im Bereich des „Desert Greening“ (der Wiederbegrünung von Wüstengebieten). Im Folgenden werden beide Nutzungsbeispiele näher betrachtet:

- ▶ Wasserstoffproduktion aus Meerwasser: Er ist ungiftig, speicherbar und enthält fast dreimal so viel Energie wie Benzin (Asendorpf 2023). Jedoch weitaus wichtiger ist, dass er bei seiner Nutzung kein CO<sub>2</sub> emittiert: Wasserstoff (H<sub>2</sub>) gilt als ein vielversprechender erneuerbarer Energieträger und Schlüsselement für die Umsetzung der Pariser Klimaziele und der CO<sub>2</sub>-Neutralität in der EU und Deutschland (Bundesministerium für



Wirtschaft und Energie (BMWi) 2020; Europäische Kommission (EK) 2020a; Tak et al. 2022). Dies betrifft allerdings nur die Verwendung von „grünem“ Wasserstoff. Die Herstellung von grünem Wasserstoff erfordert jedoch derzeit hoch aufgereinigtes Wasser. Im Netto-Null-Szenario wären hierfür rund 8 Mrd. m<sup>3</sup> hochreines Wasser für die globale Wasserstoffherstellung bis 2050 notwendig (International Energy Agency (IEA) 2023; Ramirez et al. o.J.). Obwohl dies weniger als der Hälfte des derzeitigen Wasserbedarfs für die Öl- und Gasförderung entspricht, gilt die Nutzung der bestehenden Süßwasserressourcen zur Deckung dieses Bedarfs als weder nachhaltig noch ausreichend, insbesondere vor dem Hintergrund des Klimawandels (Stratmann 2021). Aus diesem Grund und insbesondere in wasserarmen Regionen empfiehlt die Internationale Energie Agentur (IEA) im Global Hydrogen Review 2022 die Entsalzung von Meerwasser zur Gewinnung des benötigten hochreinen Wassers (International Energy Agency (IEA) 2023). Allerdings kann der dadurch gewonnene Wasserstoff nur dann als „grün“ gelten, wenn die Meerwasserentsalzung ebenfalls „grün“ ist – ein relevanter Aspekt, der in der Debatte häufig übersehen wird. Meerwasserentsalzungsanlagen werden mehrheitlich mit fossilen Energieträgern betrieben (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) 2014). Eine technische Innovation, die direkte H<sub>2</sub>-Elektrolyse, birgt jedoch das Potenzial, Wasserstoff mit deutlich weniger Aufwand direkt aus Meer- oder Abwasser zu erzeugen (Tak et al. 2022; International Energy Agency (IEA) 2023). Der Schritt der Meerwasserentsalzung mit seinen Umweltauswirkungen wäre in diesem Fall übersprungen. Aktuelle Elektrolysemembranen zeigen sich jedoch als empfindlich, um mit Salzwasser wirtschaftlich betrieben werden zu können (Tak et al. 2022). Aus diesem Grund ist die Meerwasserentsalzung zur Bereitstellung von hochreinem Wasser aktuell die geeignetste Lösung.

- ▶ „Desert Greening“ mit Meerwasser: Meerwasserentsalzung kann genutzt werden, um wüstenähnliche in fruchtbare Regionen umzuwandeln und je nach Standort zur Förderung der Nahrungssicherheit, Artenvielfalt und wirtschaftlichen Entwicklung beizutragen. Eine Studie von Caldera und Breyer (2023) zeigt, dass Aufforstungsprojekte

in der MENA-Region das Potenzial haben, bis zum Jahr 2100 bis zu 730 Gigatonnen (Gt) CO<sub>2</sub> zu speichern. Dies entspricht in etwa 20 Mal dem weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Jahr 2023 (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) 2023). In einigen Inlandsregionen wird bereits entsalztes Wasser für die Bewässerung genutzt, zum Beispiel in Spanien, China und den USA. Allerdings stammt dieses Wasser in der Regel nicht aus dem Meer, sondern aus lokal verfügbaren salzhaltigen Wasserressourcen (Regional Program Energy Security and Climate Change Middle East and North Africa (KAS – REMENA) 2020). Das Konzept des „Desert Greening“ zielt darauf ab, vor allem wasserarme Regionen zu bewässern und neben der landwirtschaftlichen Nutzung CO<sub>2</sub>-Speicher aufzubauen. Laut UN Water Development Report 2014 ist die Entsalzung jedoch für die ärmsten, oft auch ariden Regionen trotz sinkender Preise nicht erschwinglich (Voutchkov 2020; Climate-ADAPT 2023). Die hohen Kosten für den Transport beschreibt der UN Water Development Report 2014 als einen der Gründe, weswegen Wasser derzeit nicht im großen Maßstab in Binnenregionen transportiert wird (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) 2014). Zudem stellen auch diesbezüglich die Entsorgung der Sole und die damit verbundene potenzielle Kontamination von Böden und Grundwässern wesentliche Herausforderungen dar (El Kharraz 2020; Oron et al. 2023).

Beide Ansätze – die Wasserstoffproduktion und das „Desert Greening“ – verdeutlichen, wie die Meerwasserentsalzung im Bereich der Klimaanpassung und für ein verbessertes Wasser- und Energiemanagement neue Wege im Kampf gegen den Klimawandel eröffnen könnte. Sie zeigen jedoch auch die Herausforderungen, die bis dahin überwunden werden müssen, insbesondere die Entsorgung der Sole, die Versorgung der Entsalzungsanlagen mit erneuerbaren Energien und die Wirtschaftlichkeit.

### Fazit für Umweltpolitik und -forschung

Um zukünftig die Vorteile der Entsalzung zu maximieren und gleichzeitig ihre Umwelt- und wirtschaftlichen Nachteile zu minimieren, sind umfassende Politik- und Forschungsmaßnahmen notwendig. Wichtig ist auch die Integration verschiedener Stakeholder in Planungsprozesse, um die gesellschaftliche Akzeptanz zu erhöhen. Im Folgenden werden ausge-

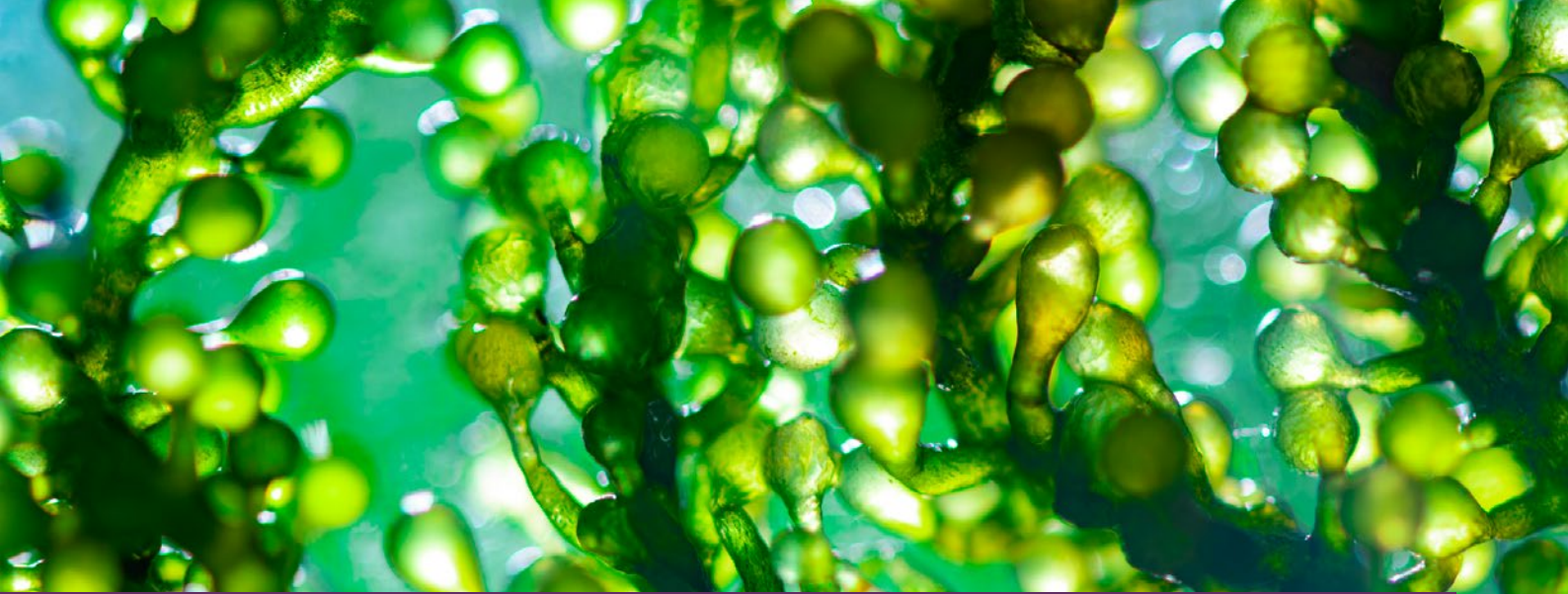
wählte Handlungsfelder beleuchtet, die sich aus dem Kontext der Emerging Issues ergeben:

- ▶ **Regulierung der Sole-Entsorgung und Förderung der Solerverwertung:** Innovationen in der Entsalzung müssen über Energie- und Effizienz-Diskussionen hinausgehen und wichtige Entwicklungen im Umgang mit der Sole und deren Umweltauswirkungen einschließen. Insbesondere bei der Entsorgung der Sole gibt es einen starken Regelungsbedarf, der auf unterschiedlichen Ebenen erfolgen sollte. Transparente Richtlinien und rechtliche Rahmenbedingungen zur Entsorgung und Weiterverwertung, beispielsweise durch internationale Abkommen und nationale Gesetze, sowie unter Einbezug von Konzepten der Kreislaufwirtschaft, sind dringend notwendig. Eine regelmäßige Überwachung und die Einhaltung strenger Umweltstandards spielen dabei eine wesentliche Rolle. Technologien wie die Konzentratsanierung, die einen Fokus auf die Sole als Rohstoff legt, sollten gefördert und in Pilotprojekten weiter erforscht werden. Das technische Upscaling könnte zudem durch finanzielle Anreize unterstützt werden, z. B. zur Realisierung von Langzeitdemonstrationen (Jones et al. 2019).
- ▶ **Förderung erneuerbarer Energien:** Der hohe Energiebedarf von Entsalzungsanlagen ist eine wesentliche Herausforderung. Gemäß der Global Clean Water Desalination Alliance (2015) würden bis 2040 insgesamt 218 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Jahr verursacht, wenn zur Entsalzung fossile Energieträger zum Einsatz kämen. Für eine nachhaltige Meerwasserentsalzung ist der Übergang zu erneuerbaren Energien deshalb essenziell. Dafür bedarf es weiterer politischer Anreize und Forschung, wie beispielsweise zur Steigerung des Einsatzes von Solarzellen, verbesserte Energiespeicherlösungen und Erweiterungen von netzunabhängigen Systemen (Bundschuh et al. 2021). Unter der Annahme, dass sich die Kosten für fossile Brennstoffe und CO<sub>2</sub>-Emissionen erhöhen, würde der Übergang zu erneuerbaren Energien außerdem eine Senkung der Kosten ermöglichen und auch die Problematik der Energieverfügbarkeit angehen.
- ▶ **Infrastrukturausbau:** Der großflächige Einsatz von Meerwasserentsalzung ist in erster Linie eine Frage der wirtschaftlichen Machbarkeit und

damit auch der weltweiten Verteilung. 90 % der Meerwasserentsalzung erfolgt in wohlhabenden Ländern (WeAreWater Foundation o.J.), wobei die Infrastruktur- und Energiekosten, vor allem für die ärmsten, oft ariden Regionen, die größte Herausforderung darstellen (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) 2014). Hier könnten lokale salzhaltige Wasserquellen wie Ab- oder Brackwasser genutzt werden, um Kosten zu senken. In Regionen ohne alternative Wasserquellen könnten Partnerschaften mit Küstengebieten und Investitionen in die Infrastruktur entscheidend sein. Dies ermöglicht eine Verteilung von Wasser für die Trinkwasserversorgung und Landwirtschaft. Zusätzlich könnte dies für zukünftige Anwendungen wie Wasserstoffproduktion oder das „Desert Greening“ von Bedeutung sein (Asendorpf 2023).

- ▶ **Integration und Anpassung:** Entscheidend für eine nachhaltige Wasserversorgung ist die standortspezifische Einbindung der Entsalzung in ein umfassendes Wassermanagement, das die Wasserhaltung, Wiederverwendung und Innovationen berücksichtigt. Dieser Ansatz sollte beispielsweise für die Wiederverwertung der Sole eine verbesserte Zusammenarbeit in Wasser-, Energie- und Landwirtschaftssektor sowie klare institutionelle Rahmenbedingungen enthalten (PRODES 2010).

Mit dem Blick in die Zukunft gerichtet, sollte Meerwasserentsalzung jedoch auch weiterhin eher als „Notmaßnahme“ bei Wasserknappheit in Betracht gezogen werden. In der Regel ist Meerwasserentsalzung nicht nur sehr kostspielig, sondern bringt auch starke negative Umweltwirkungen mit sich und mit Salzwasser eine zwar in großer Menge vorhandene, aber endliche Ressource verwendet. Meerwasserentsalzungsanlagen sollten demnach vor ihrer Installation umfassend gegenüber möglichen alternativen Maßnahmen abgewogen werden, wie der Abwasserwiederverwendung und Maßnahmen zur Wassereinsparung.



## 2.3 Maritime Algenlandwirtschaft

**Trend:** Die faszinierende Welt der Algen, uralte Organismen, die seit Milliarden von Jahren das Leben auf der Erde beeinflussen, erlebt eine bemerkenswerte Renaissance. Von den Anfängen als Sauerstoffproduzenten bis zu ihrer Vielseitigkeit in der modernen Gastronomie, Kosmetik und sogar als möglicher Ersatz für fossile Rohstoffe – Algen haben das Potenzial, eine Schlüsselrolle in unserer nachhaltigen Zukunft zu spielen. In diesem Kapitel werden in erster Linie Makroalgen betrachtet, da deren Nutzung zum größten Teil durch Aquakultur oder Sammlung in Küstennähe, also in Wechselwirkung mit den Meeresgebieten, erfolgt. Ergänzend werden Mikroalgen betrachtet, die in Meereswasser kultiviert werden können. Folgende Fragen stehen im Mittelpunkt: Wie unterscheiden sich Makroalgen von Mikroalgen? Wie werden sie gezüchtet und genutzt? Welche Chancen und Risiken sind mit dem Auf- und Ausbau einer maritimen Algenproduktion verbunden?

### Emerging Issues

- ▶ Makroalgen auf deutschen Tischen – Algen als Nahrungsmittel
- ▶ Gesundheitsinnovationen aus dem Meer – Makroalgen für den Gesundheitssektor
- ▶ Substitution fossiler Rohstoffe durch Makroalgen – Algen als Rohstoff

### In Kürze

- ▶ Algen sind hierzulande eher aus der japanischen Küche, als Nahrungsergänzungsmittel oder als Grundbestandteil naturbasierter Kosmetika bekannt. Die Bedeutung insbesondere von Makro-

algen könnte sich in den kommenden Jahren jedoch merklich ändern. Einige Arten sind nachweislich sehr gesund, verfügen über einen hohen Proteingehalt und können küstennah angebaut werden. Damit hat das Meeresgemüse Potenzial, mittel- und langfristig wesentlich zur globalen Ernährungssicherheit der Menschheit beizutragen. Insgesamt zeigen Forschungsergebnisse und Pionierunternehmen breite Anwendungsmöglichkeiten für Makroalgen, die über bereits erschlossene Märkte weit hinausgehen. Allerdings sind auch die natürlichen Algenbestände durch den Klimawandel bedroht. In einigen Regionen könnten bereits 2030 Kipppunkte erreicht werden, die zu einem dauerhaften Verlust entsprechender Ökosysteme führen. Darüber hinaus ist eine ganzheitliche Betrachtung notwendig, da auch weitere Verarbeitungsschritte (post harvest) mit Umweltnachteilen verbunden sein können, die die Gesamtbilanz negativ beeinflussen können.

- ▶ Die Substitution landwirtschaftlicher Güter durch Algen kann die Flächenkonkurrenz auf dem Land leicht entschärfen und die intensive Nutzung von Böden reduzieren. Dadurch können Treibhausgasemissionen und Wasserverbrauch verringert und Natur geschützt werden. Gleichzeitig können durch den Ausbau maritimer Algenlandwirtschaft relevan-

te Mengen CO<sub>2</sub> langfristig gebunden werden. Andererseits kann eine Nutzung zu einer Gefährdung natürlicher Algenbestände und der maritimen biologischen Vielfalt führen. Die Wildsammlung sollte daher nur begrenzt stattfinden und bei der Kultivierung vermieden werden, dass es zu negativen Auswirkungen auf die umliegenden Lebensräume kommt.

- ▶ Die Wechselwirkungen zwischen einer hochskalierten maritimen Algenlandwirtschaft und der Umwelt sind noch nicht absehbar und basieren bislang größtenteils auf Abschätzungen. Eine verbesserte Modellierung und der Aufbau eines begleitenden Monitorings sind daher notwendige Bedingungen. Eine Ausweitung der maritimen Algenlandwirtschaft muss darüber hinaus auch zu einer Verringerung der terrestrischen Landwirtschaft führen, sonst können die positiven Umweltpotenziale nicht realisiert werden. Am Ende müssen auch Verbraucher\*innen und Beschaffer\*innen aktiviert und durch entsprechende (Umwelt-)Produktkennzeichnungen unterstützt werden, um Vertrauen in die bislang noch wenig bekannten algenbasierten Produkte zu entwickeln und den Markt zu dynamisieren.

### Hintergrund

Algen kennt man heute vor allem vom Strand wie auch von der Sushi-Bar. Im Badeurlaub stören sie das Wunschbild von kristallklarem Wasser und unberührten Sandstränden. In der Gastronomie hingegen erfahren sie – ausgehend von der asiatischen Esskultur – immer mehr Wertschätzung (Costello et al. 2020; Schleuning 2023). Wegen ihrer Nährstoffe werden sie in Europa zunehmend als Superfood gehandelt. Insbesondere ihre Eigenschaft, große Mengen CO<sub>2</sub> binden zu können, lässt sie vor dem Hintergrund der nötigen Reduktion von Treibhausgas in der Öffentlichkeit nun zusätzlich an Bedeutung gewinnen (Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB (Fraunhofer IGB) o. J.; Faber 2019; Bundesinformationszentrum Landwirtschaft 2023; Bullen et al. 2024).

Algen sind sehr vielseitige Organismen. Biologisch gesehen sind sie keine Pflanzen. Sie betreiben zwar Photosynthese, sind jedoch viel einfacher aufgebaut. Sie können sowohl einzellig als auch mehrzellig vorkommen und haben weder Wurzeln noch Stämme oder Äste. Die Vielfalt der Algenarten ist enorm, aber weitgehend unbekannt. Sie wird auf etwa 400.000 geschätzt, davon sind derzeit allerdings erst 175.000 erfasst (Demmer und Paál 2023; Guiry und Guiry 2023).

Allgemein wird zwischen Makroalgen und Mikroalgen unterschieden. Makroalgen – umgangssprachlich auch Seetang genannt – sind mehrzellig und groß genug, um mit bloßem Auge erkannt zu werden. Sie können mehrere Meter lang werden, kommen häufig in Küstenregionen vor und können verschiedene Formen annehmen (blattartig, verzweigt, kugelförmig). Innerhalb der Gruppe der Makroalgen können verschiedene Braunalgen wie z. B. Kelp, Rotalgen und Grünalgen unterschieden werden. Makroalgen machen etwa 20 % aller Algenarten aus (Soler-Vila et al. 2022; Bundesinformationszentrum Landwirtschaft 2023).

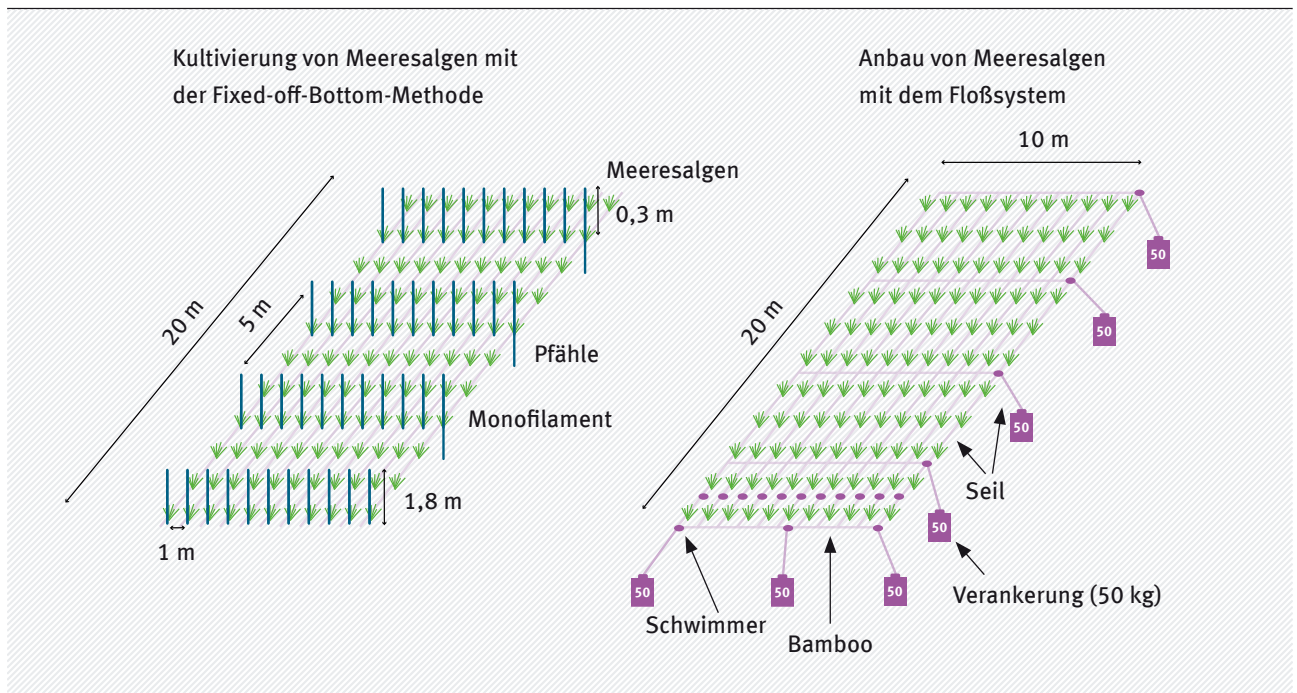
Mikroalgen sind eine breit gefächerte Gruppe von mikroskopisch kleinen Algen, die in verschiedenen aquatischen Umgebungen (Meeren, Seen, Flüssen) sowie in feuchten terrestrischen Umgebungen leben. Sie sind so winzig, dass ein Milliliter Wasser Abertausende enthalten kann, und bilden eine wichtige Nahrungsquelle etwa für Krebstiere, Fische und Korallen (Barsanti und Gualtieri 2018; Yaacob et al. 2022) (Alfred-Wegener-Institut 2024). Beispiele für Mikroalgen sind Spirulina und Chlorella. Mikroalgen machen mit rund 80 % den Großteil aller Algenarten aus (Icking et al. 2022; Bundesinformationszentrum Landwirtschaft 2023).

### *Überwiegend aus Aquakulturen in Asien gewonnen*

Von 1950 bis 2019 sind Anbau und Produktion von Algen von 0,5 Mio. t auf 36 Mio. t gestiegen. Mikroalgen fallen dabei bisher kaum ins Gewicht. Ihr Anteil lässt sich auf 0,16 % beziffern. Makroalgen werden weltweit zu 97 % in Aquakultursystemen auf See oder in künstlichen Tanks an Land erzeugt, wobei die Seeproduktion wegen ihrer Kosteneffizienz dominiert. Die Tankkultivierung ermöglicht eine bessere Kontrolle, ist jedoch teurer und wird daher tendenziell nur für hochwertige Algen genutzt. Nur 3 % werden wild geerntet (Bundesinformationszentrum Landwirtschaft 2023).

Abbildung 05

## Zwei Hauptmethoden für den Algenanbau: „fixed-off-bottom-method“ und „floating system“



Abmessungen, Tiefen, Materialien und Verankerungsgewichte können variieren.

Quelle: eigene Darstellung nach United Nations Environment Programme (UNEP) 2023; S. 5

Bei der traditionellen Wildernte von Makroalgen werden natürliche Vorkommen in küstennahen Gewässern oder auch am Strand in Handarbeit eingesammelt. In der Meereskultivierung sind die sogenannte „fixed-off-bottom“-Methode und das „floating system“ am weitesten verbreitet (siehe Abbildung 5; Abmessungen, Tiefen, Materialien und Verankerungsgewichte variieren) (United Nations Environment Programme (UNEP) 2023).

Bei der „fixed-off-bottom“-Methode werden Holzpfähle in regelmäßigen Abständen und geraden Reihen im Meeresboden befestigt. Zwischen den Pfählen sind Seile gespannt, wo Algensetzlinge – auch Thalli genannt – mit etwa 25 cm Abstand voneinander per Bindetechnik fixiert werden. Die Setzlinge wiegen zum Zeitpunkt der Pflanzung etwa 50 bis 100 g. Bei einer Seillänge von 20 m können mit diesem Verfahren pro Reihe etwa 80 Jungalgen bis zur Ernte kultiviert werden.

Floßsysteme („floating systems“) bestehen aus parallel angeordneten Bambuspfählen, die mit Seilen zu einem rechteckigen Rahmen verbunden werden (Floß). An den Rändern der Bambuskonstruktion werden Schwimmelemente in regelmäßigen Abständen

angebracht und sorgen für stetigen Auftrieb. Gleichzeitig wird der Rahmen mit Seilen und Gewichten am Meeresboden fixiert, sodass das Floßsystem kontinuierlich knapp unter der Wasseroberfläche treiben kann. Wie bei der „fixed-off-bottom“-Methode werden die 50 bis 100 g Algensetzlinge auch hier in regelmäßigen Abständen an gespannte Seile gebunden und können dort bis zur Ernte wachsen (Reef Resilience Network o. J.; Valderrama 2013; United Nations Environment Programme (UNEP) 2023).

Mikroalgen werden in künstlichen Anlagen gezüchtet, sogenannten Photobioreaktoren. Je nach Art benötigen sie spezifische Wassertemperaturen, Sonnenlicht, CO<sub>2</sub> und Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor, um zu wachsen. Gegebenenfalls ist eine künstliche Beleuchtung erforderlich und die Temperatur sowie der Sauerstoffgehalt des Wasser müssen reguliert werden (Enzing et al. 2014). Bei der Zucht in Reaktoren werden offene und geschlossene Systeme unterschieden. Offene Systeme sind günstiger, aber es besteht die Gefahr von Verunreinigungen. Empfindliche Algen werden oft in geschlossenen Systemen angebaut, wo die Bedingungen besser kontrolliert werden können. Der Zuchtprozess variiert je nach Algenart und Umgebung. Sind sie ausreichend gewachsen, so

werden sie geerntet, getrocknet und zu Pulver oder anderen Produkten verarbeitet (Enzing et al. 2014; Bundesinformationszentrum Landwirtschaft 2023).

85 % der Algenlandwirtschaft erfolgt derzeit in China (20 Mio. t), Indonesien (10 Mio. t), Südkorea (1,8 Mio. t) und den Philippinen (1,5 Mio. t). In Europa werden weniger als 1 % (290.000 t) der Algen erzeugt, vor allem in Norwegen, Frankreich und Irland. Im Gegensatz zum globalen Trend werden in Europa etwa 75 % der Makroalgen aus Wildbeständen und 25 % aus Aquakulturen gewonnen (Icking et al. 2022; Bundesinformationszentrum Landwirtschaft 2023).

### *Weitgehend unbekanntes Alleskönner?*

Als Nahrungsmittel sind Algen in Deutschland bisher vor allem aus der asiatischen Küche bekannt – z. B. die Rotalge Nori für Sushi und die Braunalge Wakame in der Miso-Suppe. Algen gelten als gesunde, fettarme Kost. Sie liefern hochwertige Proteine, Ballast- und Mineralstoffe und Vitamin B12, das sonst nur in tierischen Produkten und manchen Speisepilzen vorkommt (Uhrig 2020; Fraunhofer-Gesellschaft 2022). Allerdings gibt es auch Arten, die Stoffe speichern, die für den Menschen ab einer gewissen Konzentration unbedenklich bis giftig sind, beispielsweise Arsen. Alge ist nicht gleich Alge und nur ausgewählte Sorten sollten auf dem Speiseplan landen.

Im Gesundheitssektor werden insbesondere (Grundlagen-)Forschungen zu den Eigenschaften von Algen durchgeführt. Bestimmte Arten sind reich an wichtigen Inhaltsstoffen wie Omega-3-Fettsäuren, Mineralstoffen und Vitaminen (Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB (Fraunhofer IGB) o. J.). Spirulina und Chlorella werden zahlreiche gesundheitsfördernde Eigenschaften zugeschrieben, die teilweise jedoch auch umstritten sind. Forscher\*innen untersuchen, wie Algen bei Erkrankungen helfen können. Erste Studien der Universität Hohenheim zeigen beispielsweise, dass einzelne Arten möglicherweise bei der Wundheilung helfen, die Vermehrung von Viren hemmen und gegen Krebszellen wirksam sein könnten. Insgesamt hat die Forschung gezeigt, dass Proteine, Fettsäuren und Carotinoide aus aufgeschlossenen Mikroalgen gut vom Körper aufgenommen werden können. Außerdem haben Laboruntersuchungen ergeben, dass viele Extrakte aus diesen Mikroalgen antiproliferative (das Wachstum von Zellen hemmende), antientzündli-

che und antioxidative Effekte haben. Darüber hinaus konnten japanische Forscher\*innen in Tierexperimenten nachweisen, dass Braunalgenprodukte Brustkrebszellen zum Absterben bringen. Diese Ergebnisse sind noch kein Beleg, aber nähren die Hoffnung, dass Algen zukünftig zur Behandlung von Krebs und anderen Krankheiten eingesetzt werden könnten (Pejic-Pulkowski o. J.; Steiner 2020; Stuhlemmer 2023). Andere Fallstudien verweisen auf Erfolge bei der Behandlung von Asthma, Allergien, Diabetes und chronischen Schmerzen. Diese konnten in klinischen Studien bisher jedoch nicht bestätigt werden. Das tatsächliche gesundheitsfördernde Potenzial ist noch Gegenstand der Grundlagenforschung (Pejic-Pulkowski o. J.; Icking et al. 2022; Verbraucherzentrale 2023). Die hohen Kosten der klinischen Studien und damit einhergehende Risiken führen bislang dazu, dass die Vermarktung von algenbasierten Produkten nicht im pharmazeutischen Bereich stattfindet, sondern im Konsumgütersektor. Vor allem in Nahrungsergänzungsmitteln und Kosmetika kommen Algen bzw. Algenbestandteile zum Einsatz.

In der Landwirtschaft gelten Algen als wirksame und umweltfreundliche Alternative zu synthetischen Düngemitteln (Ammar et al. 2022; Karthik und Jayasri 2023). Das spanische Unternehmen AlgaEnergy stellt beispielsweise seit 2007 sogenannte Biostimulanzien aus Mikroalgen her. Das Produkt hilft Pflanzen, mehr Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor aufzunehmen und widerstandsfähiger gegenüber umweltbedingten Stressfaktoren wie Wetterextremen zu werden (AlgaEnergy o. J.).

Zunehmend werden Algen auch als nachhaltige Ressource für Fleischersatzprodukte entdeckt. Einige Arten haben einen Proteingehalt von bis zu 50 %, wachsen in warmen Gewässern sehr schnell und können dabei große Mengen CO<sub>2</sub> binden (1 t Mikroalgenbiomasse bindet etwa 1,8 t CO<sub>2</sub>). Außerdem wird keine Ackerfläche benötigt, um Mikroalgen wie Spirulina anzubauen (Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB (Fraunhofer IGB) o. J.; Faber 2019; Fraunhofer-Gesellschaft 2022). Schon heute werden Algen in Deutschland zur Herstellung veganer Lebensmittel verwendet. Die Universität Hohenheim forscht in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (Fraunhofer IGB) an weiteren Produktpotenzialen. Dabei besteht eine zentrale Herausforderung darin, den teils sehr intensiven und unangenehmen

Fischgeschmack zu entfernen, ohne dabei wertvolle Inhaltsstoffe zu beschädigen (Viva Maris o. J.; BetaFish 2022; Stuhlemmer 2023).

### *Makroalgenbasierte Produkte für wirksamen Umwelt- und Klimaschutz*

Die Fütterung von Nutztieren mit verschiedenen Makroalgen wurde in den vergangenen Jahren als Methode zur Reduzierung der Methanproduktion untersucht. Kinley et al. (2020) folgerten beispielsweise, dass der Methanausstoß von Kühen durch Fütterung mit der Rotalge „*Asparagopsis taxiformis*“ um bis zu 98 % reduziert werden kann.<sup>17</sup> Außerdem wurde deutlich, dass makroalgenbasierte Futtermittelzusätze gesundheitliche Vorteile für Nutztiere bieten können – einschließlich der Reduzierung von oxidativem Stress<sup>18</sup> und Ketose.<sup>19</sup> Es gibt jedoch auch Sicherheitsbedenken. So wurden in mit Algen gefütterten Milchkühen Inhaltsstoffe aus Makroalgen, wie Iod, Brom oder Arsen nachgewiesen, welche in hoher Konzentration giftig sind. Die Verbreitung von Algen als Futtermittel stellt auch aus einem weiteren Grund eine Herausforderung dar: So müssten – um den Bedarf an Seetang für die globale Viehwirtschaft zu decken – jährlich etwa 15 Mio. t der Rotalge bereitgestellt werden. Hierfür wäre ein enormer Zuwachs nötig, denn diese Menge entspricht in etwa der Hälfte des gesamten Anbaus aller Meeresalgenarten weltweit. Da die „Wunderalge“ *Asparagopsis taxiformis* allerdings nur in warmen Küstenregionen der Südhalbkugel heimisch ist und wächst, könnte dieser Bedarf derzeit bei Weitem nicht gedeckt werden. Deshalb suchen Forschungsteams auch in kühleren Regionen wie beispielsweise Irland nach Algensorten mit ähnlichen Eigenschaften (Vijn et al. 2020; Rauner 2022).

Algen werden auch zur Substitution fossiler Rohstoffe in Betracht gezogen (Rodionova et al. 2017). Das potenzielle Anwendungsfeld reicht hierbei von Ziegelsteinen über Blumentöpfe bis hin zu Handtaschen und Kerosin. Möglich wird dies, weil Algen im Wachstum CO<sub>2</sub> in Form von Glykolat (eine Vorstufe von Zucker) und Lipide (Algenöl) binden. Aus diesen Grundstoffen können durch chemische und biochemische Verfahren wiederum Ausgangsstoffe für biobasierte Kunststoffe, Carbonfasern oder Flugbenzin her-

gestellt werden (Li-Beisson et al. 2019; Stumberger 2020; Demmer und Paál 2023).

Im Sommer 2010 ist in Berlin erstmals ein Kleinflugzeug mit Algensprit erfolgreich gestartet. Die Weltpremiere ließ bereits damals erahnen, dass der Biokraftstoff perspektivisch erdölbasiertes Kerosin ersetzen könnte. 2019 gelang es Forschenden aus Leipzig, ein Verfahren zu entwickeln, das die Produktion von Algensprit ohne Algenwachstum ermöglicht. Unter Zuführung von Kohlendioxid und Licht bilden die Algen reines Glykolat, ohne an Biomasse zuzulegen. Dadurch wurde die Effizienz deutlich gesteigert. Das Ertragspotenzial von Biokraftstoff aus Algen ist seitdem etwa doppelt so hoch wie aus Mais und kann möglicherweise noch weiter optimiert werden. Dennoch ist algenbasiertes Kerosin deutlich teurer als herkömmliches (Faber 2019; Taubert et al. 2019). Für eine große Algenzucht-Anlage mit angeschlossener Raffinerie bräuchte es nach Prof. Dr. Brück von der TU München Investitionen in einem dreistelligen Millionenbetrag (Steiner 2020). Trotz der bestehenden Herausforderungen könnten Algen eine wichtige Rolle auf dem Weg zu einer klimaverträglicheren Luftfahrt spielen. Es wird intensiv an Lösungen geforscht und den Biokraftstoffen wird ein großes Potenzial zugeschrieben, einen wesentlichen Beitrag zu leisten (Hungerland et al. 2024).

### *Große Wachstumspotenziale in Europa*

Wie bereits erläutert, findet der überwiegende Teil der Algenlandwirtschaft derzeit in Asien statt. China, Indonesien, Südkorea und die Philippinen sind die Big Player mit einem starken Fokus auf Makroalgen in Aquakulturen. Asien deckt aktuell rund 99 % des Marktes ab (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2020b; Vincent et al. 2020). Nach Angaben der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen hat sich der Makroalgenmarkt zwischen 2000 und 2018 global mehr als verdreifacht. In den Folgejahren stieg die Kultivierung von Algen geringer, jedoch stetig weiter an. Im Jahr 2020 war global eine Wachstumsrate von 1,4 % zu verzeichnen, was einer halben Mio. t entspricht (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) o. J.; Food and Agriculture

<sup>17</sup> Die Rotalge enthält bioaktive Stoffe, die die Enzyme der Methanogenen blockieren. Bromoform, die Hauptschubstanz, unterbricht den Stoffwechselweg, der normalerweise zur Bildung von Methan führt. Dadurch wird die Verdauung der Kühe beruhigt (Machado et al. 2016).

<sup>18</sup> Oxidativer Stress beschreibt einen problematischen Stoffwechselzustand, bei dem der Organismus mehr schädliche freie Radikale produziert als er neutralisieren kann.

<sup>19</sup> Ketose beschreibt einen Stoffwechselzustand, bei dem der Körper hauptsächlich auf Fett statt auf Zucker als Energiequelle zurückgreift. Bei Kühen kann Ketose vor allem nach der Kalbung kritisch werden, wenn die Milchproduktion steigt und besonders viel Energie gebraucht wird.

Organization of the United Nations (FAO) 2020b). Insgesamt herrscht Konsens darüber, dass die Branche global weiterhin wachsen wird (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) o. J.; Ferdouse et al. 2018; Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2020b; Fortune Business Insights 2021; Grand View Research 2021).

Die Vereinigung Seaweed for Europe schätzt das Wachstumspotenzial maritimer Algenlandwirtschaft in Europa bis 2030 auf 9,3 Mrd. Euro, wobei 30 % dieses Marktes von Unternehmen innerhalb der Europäischen Union gedeckt werden könnte. Hierdurch könnten zwischen 85.000 und 115.000 Arbeitsplätze geschaffen und durch die Bindung von CO<sub>2</sub> in Algen Treibhausgasemissionen jährlich um bis zu 5,4 Mio. t reduziert werden (Norwegian Seaweed Association o. J.; Vincent et al. 2020). Derzeit rangieren Meeresalgen in Deutschland auf Rang 6 der bevorzugten pflanzenbasierten Fleischersatzprodukte (Statista GmbH 2022). Das zunehmende Aufkommen von Start-ups zeigt, dass die Algenindustrie in Deutschland und Europa an Fahrt aufnimmt (The Seaweed Company o. J.; Viva Maris o. J.; BettaFish 2022; Alfred-Wegener-Institut (AWI) 2023).

Speziell in Norwegen hat der Meeresalgensektor in den vergangenen Jahren einen großen politischen und unternehmerischen Hype erlebt. Mit seinen zahlreichen Fjorden verfügt das Land über optimale natürliche Bedingungen für den Algenanbau im Meer. Regierung und Industrie haben das Potenzial maritimer Algenlandwirtschaft für Norwegen frühzeitig erkannt, die Branche im Rahmen ihrer Nachhaltigkeitsstrategie (Blue-Growth-Strategie) als Zukunftsfeld identifiziert und strategisch gefördert. 2014 wurde die erste Anbaulizenz erteilt und seitdem wichtiges Know-how in der Algenkultivierung aufgebaut. Bis 2022 stiegen die Lizenzen auf 511, verteilt auf über 100 Produktionsorte (BusinessPortal Norwegen 2020; Albrecht 2023a). Bereits 23 Unternehmen sind in der norwegischen Algenproduktion aktiv. Diese rapide Entwicklung, kombiniert mit geschätzten Wachstumspotenzialen von 4 Megatonnen bis 2030 und 20 Megatonnen bis 2050, haben eine Goldgräberstimmung geweckt: Meeresalgen gelten als Grünes Gold und Algenfarmer\*innen werden als Schlüsselakteure eines Multi-Milliarden-Markts betrachtet (Albrecht 2023a).

Auch namhafte deutsche Organisationen gestalten die expandierende Branche mit: So wurde beispiels-

weise im Frühjahr 2023 die Firma MACROCARBON SL auf den Kanarischen Inseln ins Leben gerufen. Das Start-up entstand als Ausgründung des Helmholtz-Zentrums für Ozeanforschung Kiel sowie des jungen Unternehmens Carbonwave, mit Unterstützung des Chemiekonzerns BASF. MACROCARBON SL setzt darauf, aus freischwimmenden Makroalgen biologische Kohlenstoff-Rohstoffe für die chemische Industrie zu produzieren (Alfred-Wegener-Institut (AWI) 2023).

Kritische Beobachter\*innen der sich formierenden Algenlandwirtschaftsindustrie in Europa mahnen, dass die maritimen Ökosysteme nicht überstrapaziert werden dürfen. Mit der Mitteilung der EU-Kommission „Für einen starken und nachhaltigen Algensektor in der EU“ (Europäische Kommission (EK) 2022) und den darin referenzierten Strategischen Leitlinien für eine nachhaltigere Aquakultur existieren auf EU-Ebene Orientierungspunkte. Auf nationaler Ebene fehlen bisher überzeugende Nachhaltigkeitsstrategien für einen zukunftsfähigen Umgang mit der wertvollen Meeresressource. Stefan Kraan, Meeresbiologe und ehemaliger Präsident der International Seaweed Association, empfahl aus diesem Grund, die Ernte wilder Algenbestände im großen Stil streng zu regulieren. Wilde Algen sind nicht nur ein CO<sub>2</sub>-Speicher, sondern auch ein wichtiger Lebensraum und Pfeiler für Biodiversität. Eine stärkere Konzentration auf Aquakulturen nach dem asiatischen Vorbild könnte eine Lösung darstellen. Weltweite Algenbestände blieben gesichert, während der kontrollierte Anbau von Makroalgen die Nachfrage am Markt decken würde (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) o. J.; Vincent et al. 2020; Rauner 2022).

Mit Blick auf die umweltpolitischen Auswirkungen dieser Entwicklungen widmet sich der folgende Emerging Issues-Teil folgenden Fragen:

1. Führt die Algenlandwirtschaft tatsächlich zu einer Entlastung der Umwelt und der Biodiversität oder verlagern sie lediglich die negativen Auswirkungen vom terrestrischen in den marinen aquatischen Bereich?
2. Welcher offene Forschungsbedarf besteht und welche Steuerungsmöglichkeiten sind bereits vorhanden oder müssen weiterentwickelt werden?
3. Ist eine Ausweitung der marinen Algenproduktion eher zu befürworten oder eher skeptisch zu beurteilen?

## Emerging Issues

Treiber für eine Entwicklung der maritimen Algenlandwirtschaft sind ausreichend vorhanden: Der Ressourcenkonsum generell wird durch ökonomisches und demografisches Wachstum weiter massiv steigen (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) 2019). Um den damit einhergehenden wachsenden Flächenverbrauch und die Intensivierung an Land zu bremsen, der durch die erhöhte Nachfrage nach landwirtschaftlich produzierten Gütern entsteht, und um das Klima zu schonen, bieten Algen und dabei insbesondere die Makroalgen große Potenziale (Spillias et al. 2023; United Nations Environment Programme (UNEP) 2023). Sie können Lebensmittel aus der klassischen Landwirtschaft substituieren (siehe Emerging Issue 1), Produkte für die medizinisch-kosmetische Nutzung liefern (siehe Emerging Issue 2) sowie fossile und regenerative, aus der Landwirtschaft stammende Rohstoffe ersetzen (siehe Emerging Issue 3).

Makroalgen besitzen einerseits großes Mitigationspotenzial zur Bekämpfung des Klimawandels (United Nations Environment Programme (UNEP) 2023), andererseits sind ihre natürlichen Vorkommen in Form von Kelpwäldern<sup>20</sup> selbst stark durch den globalen Klimawandel bedroht: In einigen Regionen könnten Kippunkte in den 2030er Jahren erreicht werden, die zu einem dauerhaften Verlust dieser Ökosysteme führen können (Lenton et al. 2023). Neben abiotischen Faktoren, wie maritimen Hitzewellen, sind insbesondere Seeigel Treiber dieser Veränderung und können auch den Wiederbewuchs dauerhaft verhindern – das Ergebnis ist ein verödeter Zustand.

Spillias et al. (2023) haben die Verfügbarkeit von maritimen Anbauflächen für Seetang kalkuliert (für verschiedene Seetangarten mit verschiedenen Nutzungszwecken) und dafür verschiedene Szenariotypen bis 2050 entwickelt, die eine größere Nachfrage voraussetzen, um dann daraus Umweltwirkungen abzuleiten. Die Szenarien betrachten Lebensmittel, Futtermittel und Treibstoffe<sup>21</sup> sowie ein übergreifendes Szenario und ein spezifisches Futtermittel-Szenario mit der Rotalge *Asparagopsis* als Zugabe für Wiederkäuerfuttermittel. Häufig ist eine strenge Trennung der Umweltwirkungen nach verschiedenen

Anwendungsfeldern – bzw. hier: Emerging Issues – nicht möglich, da die Produktionsweisen und die dabei verwendeten Algenarten die gleichen sind. Quer über die verschiedenen Anwendungsfelder sind demnach global gesehen signifikante Minderungen von Treibhausgasemissionen möglich. Ebenfalls könnten sich Einsparungen im Stickstoffdüngereinsatz in der Landwirtschaft sowie bezüglich des Wasserverbrauchs ergeben. Allerdings besteht auch hier die Gefahr von Reboundeffekten durch das größere Angebot, da landwirtschaftliche Flächen zwar renaturiert bzw. weniger intensiv genutzt werden könnten, dies aber ohne Steuerung nicht unbedingt erwartet werden kann.

Auch in europäischen Gewässern gibt es grundsätzlich geeignete Flächen und, wie oben beschrieben, werden diese insbesondere in Nordeuropa aktuell stärker erschlossen. Doch es kommt dabei immer wieder zu Nutzungskonflikten mit anderen Bewirtschaftungsformen, wie beispielsweise die Energiegewinnung in Offshore-Windparks. Zwar eignen sich diese grundsätzlich gut für Multi-Use-Anwendungen mit Makroalgenkultivierung, allerdings ergeben sich hierbei verschiedene Konfliktlinien. Dazu gehören ungeklärte Fragen bei Haftung und Verantwortung oder bei der Übernahme der höheren Versicherungsprämien. Auch die Auswirkungen auf die Biodiversität sind ungeklärt. So sind beide Bewirtschaftungsformen ein Eingriff in die Natur und können sowohl einzeln als auch in Kombination zur Verbreitung invasiver Arten beitragen, indem sie durch ihre festen Oberflächen als Trittsteine für diese Arten dienen. Es stellt sich dabei also die Frage, welcher Akteur Gegen- oder Ausgleichsmaßnahmen ergreifen muss. An solchen offenen Fragen der Risk Governance scheitern diese Projekte letztlich in ihrer Umsetzung (van den Burg et al. 2020). Doch es gibt auch Beispiele, die eindeutiger in die positive Richtung zeigen. So haben sich gerade in Gewässern der gemäßigten Klimazone angelegte Kelpfarmen als positiv für die biologische Vielfalt erwiesen (United Nations Environment Programme (UNEP) 2023). Doch im Vergleich zu unbewirtschafteten Kelpwäldern ist die Artenvielfalt hier geringer. Auch wurde für Makroalgen eine wasserqualitätsverbessernde Wirkung nachgewiesen (Sudhakar et al. 2018; van den Burg et al. 2020; United

<sup>20</sup> Kelpwälder sind meist küstennahe natürliche Ökosysteme, die häufig durch einen dichten Bewuchs der Braunalge charakterisiert sind. Sie kommen sowohl im Pazifik als auch im Atlantik und dem Indischen Ozean vor. In Europa sind sie in der Nordsee und in Teilen der Ostsee vorzufinden.

<sup>21</sup> In dem Szenario werden 10 % der menschlichen Ernährung, 10 % der tierischen Ernährung und 50 % der Biomasseenergie durch Seetang ersetzt.



Nations Environment Programme (UNEP) 2023), wie beispielsweise eine bessere Belüftung der Gewässer, Bindung von Schwermetallen oder eine geringere Acidität. Darüber hinaus tragen Makroalgen zum Küstenschutz bei.

Dies ist eine wichtige Qualität, die den Anbau von Makroalgen weiter dynamisieren könnte. Die Ökosystemleistung der CO<sub>2</sub>-Sequestrierung oder der Verringerung der Eutrophierung, die als Kompensationsmaßnahme auch monetär vergütet werden könnte, könnte ein Zusatzgeschäft für die Akteure der maritimen Algenlandwirtschaft darstellen. Die Größenordnung dieses Effekts und die grundsätzlichen Umwelt Risiken sind jedoch noch nicht ausreichend erforscht (Ross et al. 2023). Es gibt auch Anzeichen, dass während der Kultivierungsphase und unabhängig von der späteren Verwendung der Makroalgen organischer Kohlenstoff in gelöster oder sedimentierter Form langfristig dem Kohlenstoffkreislauf entzogen wird (Gao et al. 2022).

### 1. Makroalgen auf deutschen Tischen – Algen als Nahrungsmittel

Algen werden als Nahrungsmittel bereits seit tausenden von Jahren kultiviert (Diaz et al. 2023). Der hohe Anteil wichtiger Nährstoffe bringt sie als mögliche Lösung ins Spiel, den stetig wachsenden globalen Bedarf an Nahrung zu decken (Diaz et al. 2023; Spillias et al. 2023). Während sie traditionell vor allem in asiatischen Ländern auf dem Speiseplan stehen, finden sie in den vergangenen Jahren auch zunehmend in Europa ihren Weg auf die Teller. Jedoch werden sie hier aktuell hauptsächlich als Superfoods und Nahrungsergänzungsmittel verwendet. Um als vollwertiges Nahrungsmittel in Europa und vielen anderen Ländern genutzt zu werden, müssen die Akzeptanz in der Bevölkerung und das Wissen rund um die Zubereitung von Algen als Grundnahrungsmittel erhöht werden (Kind 2022; Spillias et al. 2023). Sollte dieser Schritt erfolgreich sein, bieten Algen laut einer Studie von Spillias et al. (2023) ein ähnlich großes Potenzial wie einstmalig Mais oder Weizen, den Hunger der stetig wachsenden Weltbevölkerung zu stillen. Eine große Herausforderung stellt jedoch die Akzeptanz bei Verbraucher\*innen dar, die unter anderem durch den „fischigen“ Geschmack beeinträchtigt wird (Onwezen et al. 2021; Mellor et al. 2022).

6,5 Mio. km<sup>2</sup> Meeresfläche eignen sich global als Anbaugebiet für Makroalgen (Spillias et al. 2023) – eine riesige ungenutzte Fläche, deren Nutzung den Druck auf (potenziell) produktive Flächen an Land mindern könnte. Makroalgen können CO<sub>2</sub> speichern und ihr Anbau bedarf weniger treibhausgasrelevanten Inputs, da in der Regel auf Düngung verzichtet werden kann (Spillias et al. 2023). Die klassischen Probleme der terrestrischen Landwirtschaft, wie Erosion der oberen Bodenschichten, Verbrauch von Frischwasser und die Störung der Nährstoffkreisläufe und Verschmutzung von Oberflächen- und Grundwässern, können beim Algenanbau vermieden werden: Das stellt potenziell eine Entlastung der Umwelt dar.

Aktuelle Herausforderungen bestehen zurzeit bei der Erforschung der Auswirkungen von Algenmonokulturen auf maritime Ökosysteme. Relevante Faktoren sind u. a. Beschattung, Absorption von Nährstoffen, Verringerung der kinetischen Wellenenergie, neuer Lebensraum für Krankheiten, Parasiten und andere Organismen oder die Einführung invasiver Arten (Campbell et al. 2019). Insbesondere ist der Einfluss von Meeresalgenproduktionsstätten auf Meeressäu-

getiere zu untersuchen. Aktuell beschäftigen sich u. a. Forschungsgruppen in Norwegen und den USA mit den Nutzen und Risiken von Algenfarmen (Kind 2022). Wichtig dabei ist auch immer eine ganzheitliche Betrachtungsweise, die nicht nur die Produktion, sondern den gesamten Lebenszyklus in den Blick nimmt. So konnte eine Ökobilanz für in Norwegen angebautes Kelp als Proteinquelle für die Tierzucht in den meisten verwendeten Szenarien hinsichtlich der Klimawirkung mit Soja aus Brasilien keine Vorteile zeigen (Koesling et al. (2021). Ein wichtiger Grund dafür war der hohe Energieaufwand bei der Trocknung. Hingegen zeigen Wu et al. (2023) in ihrer vergleichenden Ökobilanz den Umweltvorteil von algenbasierten Produkten und ihren terrestrischen Pendanten von der Zucht über die Kultivierung bis hin zur Verarbeitung.

Unsicherheiten bestehen weiterhin im Bereich des Einsatzes von Nanotechnologie und der Modifizierung von Algen. So kann Nanotechnologie genutzt werden, um die Wachstumsbedingungen von Makroalgen zu verbessern und gegenüber Bakterienbefall und Biofilmbildung zu schützen. Allerdings sind die Risiken für Mensch und Umwelt nicht geklärt (Khan et al. 2023). Nur wenige akkreditierte Labore und Pilotanlage innerhalb der EU nutzen Gentechnik zur Veränderung von Algen. In den USA (Kalifornien) und Mexiko finden allerdings bereits Freiwasserexperimente mit genetisch veränderten Algen statt (Khan et al. 2023). Die potenzielle Wirkung dieser Technologie wird daher kaum thematisiert. Hingegen stellt die genetische Verarmung bei wilden Algenarten, induziert durch kultivierte Algen, ein dokumentiertes Risiko dar (Valero et al. 2017).

## 2. Gesundheitsinnovationen aus dem Meer – Algen für den Gesundheitssektor

Algen stellen einen für die pharmazeutische und kosmetische Industrie interessanten Ausgangsstoff dar. Grund dafür sind die hohe Bakteriendichte auf deren Oberflächen und die dadurch vielfältigen produzierten bioreaktiven Substanzen. Diese Algenwirkstoffe können das Wachstum humanpathogener Keime effektiv hemmen. Auch eine virale Hemmung wurde festgestellt sowie ein Schutz gegen UV-B-Strahlung. Ebenfalls konnten beim Blasentang Tannine identifiziert werden, die eine antikarzinogene Wirkung besitzen (Catarino et al. 2021). Für die pharmazeutische und kosmetische Industrie werden daher seit längerer Zeit in kleineren Mengen Makroalgen aus Wildbeständen geerntet. Um die Mengen zu skalieren, befinden

sich nun jedoch auch Produktionsketten im Aufbau, die auf die Kultivierung von Algen setzen. Dabei werden zunehmend maritime Regionen erschlossen, die sich in der gemäßigten Zone befinden (Chauton et al. 2021). Die Kultivierung von Algen für den Gesundheitsbereich verläuft erfolgreich, allerdings kann es dabei zu einer Verringerung der wirkaktiven Stoffe kommen (Vega et al. 2020).

Die Umweltfolgen der Wildsammlung für den kosmetischen und pharmazeutischen Bereich wird in der Literatur nur wenig behandelt. Grundsätzlich wird auf die Folgen und Gefahren einer Überbeanspruchung der Algenbestände durch bestimmte Ernte-techniken hingewiesen (Mac Monagail et al. 2017). Dabei handelt es sich besonders um mechanisierte „Rodungstechniken“ von stehenden Algenbeständen. Grundsätzlich wird empfohlen, nur bestimmte Arten, wie zum Beispiel die Rotalgen, abzubauen, die schnell nachwachsen und über stabile Bestände verfügen (Cotas et al. 2024). Die Sammlung an Stränden nach Sturmereignissen wird nicht als problematisch angesehen. In Asien ist die Algenkultivierung für die Pharmaindustrie die gängige Methode zur Gewinnung der Wirkstoffe (Mac Monagail et al. 2017), da hierbei eine hohe Selektivität wichtig ist, die bei der Wildsammlung nur eingeschränkt erreicht werden kann.

Für den pharmazeutischen und kosmetischen Bereich ergeben sich bei der Kultivierung ähnliche Umweltrisiken wie im Lebensmittelbereich, da es sich teilweise um dieselben Arten handelt. Es scheint jedoch, dass eine integrierte multitrophische Kultivierung trotz einiger Einschränkungen grundsätzlich geeignet ist (Vega et al. 2020). Im direkten Vergleich mit konventionellen pharmazeutischen Produkten weisen makroalgenbasierte Alternativen einen Umweltvorteil auf (Pereira und Cotas 2024). Auch bei der Extraktion der Wirkstoffe können Verfahren mit verminderter Umweltwirkung angewendet werden (Pereira und Cotas 2024).

Bei einer Skalierung der Kultivierung von Makroalgen steigen jedoch auch die Gefahren für die biologische Vielfalt und die Verbreitung invasiver Arten. Dabei spielt eine intakte Biodiversität eine entscheidende Rolle für den Emerging Issue Gesundheitsinnovationen aus dem Meer. Es herrscht noch ein großer Forschungsbedarf bei der Identifikation und Sicherung der potenziellen Wirkstoffe (Chauton et al.



2021). Bei dem voranschreitenden Artenverlust könnten die Potenziale deutlich verringert werden, ohne überhaupt genau bekannt zu sein.

### *3. Substitution fossiler Rohstoffe durch Makroalgen – Algen als Rohstoff*

Die weltweite Suche nach nachhaltigen Alternativen zu fossilen Rohstoffen hat in den vergangenen Jahren verstärkt das Augenmerk auf erneuerbare Ressourcen gelenkt. In diesem Kontext rücken Makroalgen als vielversprechende Alternative in den Fokus. Diese marinen Pflanzen bieten ein enormes Potenzial als Energielieferant und Quelle für chemische Rohstoffe.

Makroalgen lassen sich durch Fermentation oder thermochemische Prozesse in Biogas oder Biomethan umwandeln. Die dabei entstehenden Biogase können zur Stromerzeugung oder als Brennstoff für Fahrzeuge dienen, was theoretisch einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen leisten könnte (Zhao et al. 2022).

Die höhere Produktivität pro Flächeneinheit im Vergleich zur Gewinnung pflanzlicher Rohstoffe an Land und die Möglichkeit, auf Gebieten zu produzieren, die nicht mit der Nahrungsmittelherstellung oder dem Naturschutz an Land konkurrieren, tragen außer-

dem dazu bei, unerwünschte Nebeneffekte von Biokraftstoffen zu reduzieren (Schröter-Schlaack und Aicher 2019). Es bleibt allerdings zu berücksichtigen, dass Flächenkonkurrenzen zu unter Naturschutz stehenden Gebieten auch in Küsten-/Meeresgebieten bestehen.

Im Vergleich zu Kraftstoffen aus fossilen Rohstoffen ist eine vorteilhafte Treibhausgasbilanz zu erwarten, da es sich um einen geschlossenen CO<sub>2</sub>-Kreislauf handelt und klimaschädliche Landnutzungsänderungen nicht zu erwarten sind (Schröter-Schlaack und Aicher 2019). Ein problematischer Nebeneffekt beim Ersatz von an Land produzierter Biomasse kann jedoch sein, dass bestimmte Co-Produkte, beispielsweise Gärreste, nicht mehr anfallen und dann entsprechend durch Primärprodukte ersetzt werden müssen (Spillias et al. 2023).

Zudem bestehen bei der Biokraftstoff-Produktion durch Makroalgen Herausforderungen wie die Skalierbarkeit der Algenkultivierung, die Wassernutzung in Bioraffinerien, die Verfügbarkeit von Rohstoffen sowie die Regulierung und Lizenzierung von Bioraffinerie-Anlagen (V et al. 2021). Die biologische Diversität der Algen und saisonale Schwankungen in ihrer

Zusammensetzung müssen ebenfalls berücksichtigt werden (Zhang et al. 2022).

Auch für die chemische Industrie bieten sich große Makroalgen an, denn sie enthalten wertvolle chemische Bestandteile, die als Grundstoffe für die Chemikalienproduktion dienen können. Polysaccharide, Proteine und Lipide sind Hauptbestandteile von Makroalgen und können durch verschiedene Extraktions- und Aufbereitungsverfahren gewonnen werden. Makroalgen stellen daher einen vielversprechenden Rohstoff für die Herstellung von Biokunststoffen dar. Auch wenn die Herstellung algenbasierter Kunststoffe noch in den Kinderschuhen steckt (Mouritsen et al. 2021), gibt es bereits zahlreiche Untersuchungen in verschiedenen Anwendungsfeldern, die eine grundsätzliche werkstoffliche Eignung bestätigen. So sind sie beispielsweise besonders haltbar und hitzebeständig (Mouritsen et al. 2021). Die gewonnenen Biokunststoffe können in Bezug auf die Rohstoffgewinnung und Treibhausgasbilanz eine umweltfreundlichere Alternative zu petrobasierten oder aus Landbiomasse stammenden Kunststoffen darstellen (Sudhakar et al. 2024). Die weiteren, zum Beispiel entsorgungsbezogenen Umweltproblematiken oder die Bildung von Mikroplastik bleiben weiterhin bestehen.

### Fazit für Umweltpolitik und -forschung

Es ergeben sich drei größere Themenkomplexe, die potenziell forschend und steuernd begleitet werden müssen. Hierzu zählen die Reduktion direkter Auswirkungen, die Vermeidung von Reboundeffekten sowie die Stärkung der Nachfrage.

**Reduktion direkter Auswirkungen:** Ein Ausbau der Algenlandwirtschaft, insbesondere in Hinblick auf damit verbundene Zulassungsverfahren, muss von Modellierungen (im Vorfeld) und Monitoring (während des Betriebs) begleitet werden. Dies ist notwendig, um sowohl standortspezifische als auch weitreichende Auswirkungen von Makroalgenfarmen bewerten zu können und entsprechende Zulassungen einzuschränken. Konkret hieße das, die Veränderungen in der genetischen Zusammensetzung der angrenzenden natürlichen Algenpopulationen und weitere Veränderungen im Ökosystem auch bei der

Megafauna zu beobachten. Generell sind sämtliche Änderungen der Biodiversität zu betrachten. Insbesondere gilt dies beim Einsatz bestimmter ortsuntypischer Arten. Da die Anbaugelände durch verschiedene Akteure in unterschiedlicher Weise bewirtschaftet werden, gerade bei den potenziell empfehlenswerten Multi-Use-Formen, müssen von den jeweils zuständigen Behörden<sup>22</sup> akteursübergreifende Prozesse aufgesetzt werden, um dort Fragen der Übernahme von Verantwortung zu klären (van den Burg et al. 2020). So sollte am Anfang ein Risikobewertungsprozess aufgesetzt werden, der sämtliche Nutzungsformen integriert. Der sollte neben datenbasierten Analysen auch Stakeholder-Konsultationen der betroffenen Akteure enthalten. Ein Runder Tisch kann solche Prozesse auch längerfristig begleiten und für eine transparente Außenkommunikation sorgen. Auch eine Regulierung des Erntens von Wildbeständen der genutzten Algenarten sollte geprüft werden.

**Vermeidung von Reboundeffekten:** Reboundeffekte und Überangebote, resultierend aus dem gleichzeitigen Anbau mariner und terrestrischer landwirtschaftlicher Güter, müssen adressiert werden. Das größere Angebot kann zu niedrigeren Preisen und somit auch zu einer höheren Nachfrage führen. Der Einstieg in eine Algenlandwirtschaft muss auch de facto zu einer Entlastung terrestrischer Flächen führen. Da diese Effekte nicht klar sind, sollten diese mithilfe von Modellierungen, z. B. GLOBIOM<sup>23</sup>, substantiiert werden und dafür entsprechende Forschung durch das Umweltressort aufgesetzt werden. Diese stellen lediglich einen Baustein dar, um Gegenmaßnahmen anzustoßen. Gleichzeitig sollten daher entsprechende Anreize geschaffen werden, die eine Flächennutzungsreduktion an Land zur Folge haben. Damit das auch sozialverträglich gelingen kann, sollten Landwirt\*innen ebenfalls in diesen Transformationsprozess eingebunden und qualifiziert werden. Auch wenn – siehe Emerging Issue 1 – positive Klimawirkungen aktuell unsicher sind, wäre z. B. das Thema Futtermittlersatz durch algenbasierte Produkte naheliegend. Es sollte also eine integrierte ressortübergreifende Strategie entwickelt werden, die terrestrische und maritime Landwirtschaft betrachtet. Die Bioökonomiestrategie der Bundesregierung berücksichtigt zwar auch Algen, enthält jedoch nicht ausrei-

<sup>22</sup> Bei marinen Aquakulturen gehören zu den zuständigen Behörden: Wasser- und Schifffahrtsämter, Naturschutzbehörden und Fischereiamter.

<sup>23</sup> Global Biosphere Management Model – ein Modell zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen konkurrierenden Flächennutzungsformen (Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Biomasse-Anbau und Module für Fischerei und Aquakultur).

chende Ansätze zur Exnovation – also zur Verringerung der intensiven Landwirtschaft.

**Nachfragestärkung:** Wie in Bezug auf viele andere Substitutionsprodukte, so ist auch bei Produkten auf Basis von Makroalgen eine sichtbare Information der Verbraucher\*innen zentral. Es ist besonders wichtig, sowohl Konsument\*innen als auch Unternehmen darüber aufzuklären, wie makroalgenbasierte Produkte effektiv zum Umwelt- und Klimaschutz beitragen können. Diese Information sollte die Zusammenhänge zwischen eigenem Handeln und möglichen positiven Auswirkungen für die aquatische Biodiversität verdeutlichen. Dabei sollte auch das Thema (Umwelt)-Labeling adressiert werden, wie es algenbasierte Produkte entsprechend ihrer zu klärenden Umweltvorteilhaftigkeit besser erfasst und umweltschädliche Produktionsweisen ausschließt. Eine eindeutige Kennzeichnung ist ebenso notwendig, um algenbasierte Produkte in die nachhaltige (öffentliche) Beschaffung einbeziehen zu können. Entsprechend muss dafür auch das Angebot am Markt bestehen und ausgebaut werden. Die Produktion der Rohstoffe und deren Weiterverarbeitung sollte durch Incentivierungsmaßnahmen, wie steuerliche Vergünstigungen, gesteigert werden, um damit die bereits bestehende Nachfrage innerhalb der EU zu stillen. Wie in der EU-Mitteilung „Für einen starken und nachhaltigen Algensektor in der EU“ (Europäische Kommission (EK) 2022) angeführt, sollte insbesondere den kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) der Markteintritt erleichtert werden, gleichsam sollten auch Hersteller von Nahrungsmitteln, Kosmetika etc. auf die mögliche Substituierung bzw. Nutzung von Algen aufmerksam gemacht werden. Gemeinwohlorientierte Modelle wie solidarische Landwirtschaft sollten ebenfalls für die maritime Algenwirtschaft eine Geschäftsform darstellen und entsprechend gefördert werden. Auch steuerliche Vergünstigungen auf Algenprodukte können diese am Markt konkurrenzfähiger machen (Duarde et al. 2022).



## 2.4 Demokratie in Gefahr?

**Trend:** Antidemokratische Entwicklungen gefährden demokratische Systeme im nationalen wie internationalen Kontext. Die politische Entwicklung von Gesellschaften ist in Bewegung und steht in starkem Zusammenhang mit den vergangenen, gegenwärtigen und zukünftigen Krisen. Vor dem Hintergrund dieses Trends und der insgesamt volatilen und von Polykrisen geprägten globalen politischen Situation ist das Superwahljahr 2024 von besonderer Bedeutung. In 76 Ländern haben insgesamt etwa 4 Mrd. Menschen gewählt. Welche Auswirkungen haben antidemokratische Entwicklungen, und insbesondere die Verbreitung von Desinformation, auf die Umwelt-, Natur- und Klimaschutzanstrengungen sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene?

### Emerging Issues

- ▶ Demokratien in der Vertrauenskrise
- ▶ Zunahme antidemokratischer Tendenzen innerhalb Deutschlands
- ▶ Zunehmendes Erstarken von Autokratien international

### In Kürze

- ▶ Weltweit sind gesellschaftliche Entwicklungen zu beobachten, die demokratische Systeme gefährden. Während die Zahl der autokratischen Regime zunimmt, geraten demokratische Werte und Institutionen zunehmend unter Druck. Dieser Trend hat Auswirkungen auf die Umwelt- und Transformationspolitik, da die Tendenz zur Autokrati-

sierung ideologische Konflikte verstärkt und die internationale Zusammenarbeit zur Bewältigung multipler Krisen, einschließlich der Transformation hin zur Klimaneutralität, erschwert.

- ▶ Das Erstarken antidemokratischer Kräfte in Deutschland und der zunehmende Einfluss auf kommunaler und Länderebene gefährden weitere Fortschritte in der nationalen Umweltpolitik.
- ▶ Die gezielte Verbreitung von Desinformationen in Bezug auf den Klimawandel stellt eine ernste Bedrohung dar, die die öffentliche Unterstützung für Umwelt-schutzmaßnahmen unterminiert, ebenso wie auch das Vertrauen in Demokratien generell. Eine beträchtliche Anzahl rechtspopulistischer Parteien in Europa steht dem wissenschaftlichen Konsens über den vom Menschen verursachten Klimawandel skeptisch gegenüber. Parteien wie die deutsche AfD, die britische UKIP, die niederländische „Partei für die Freiheit“ und die dänische Volkspartei stellen die wissenschaftlichen Erkenntnisse aktiv infrage und verbreiten Desinformationen.
- ▶ Umweltpolitik muss angesichts der Gefährdung wichtiger Nachhaltigkeitsziele durch autokratische Regime und Akteure in der Lage sein, Desinformationen gezielt und effektiv vorzubeugen

und zu begegnen, sei es durch Regulierung entsprechender Plattformen oder die Förderung von Informationskampagnen und Factchecking-Angeboten. Im Inland bzw. direkten Einflussbereich der Europäischen Union (EU) können zudem Modelle bürgerlicher Teilhabe und Einbeziehung bei Projekten mit Bezug zu Nachhaltigkeit und Naturschutz dazu beitragen, das demokratische Fundament des Umweltschutzes zu stärken.

**Hintergrund**

Im Zeitraum von 2017 bis 2023 nahm sowohl der Anteil der Autokratien als auch der Anteil der vollständigen Demokratien zu. Dies resultierte daraus, dass unvollständige Demokratien demokratischer und hybride Regime autoritärer geworden sind. In der Summe ist der Anteil der demokratischen Staaten jedoch deutlich geringer. Im Jahr 2023 waren 74 Staaten der Weltgemeinschaft Demokratien mit einem Anteil der Weltbevölkerung von 45,4 %. Demgegenüber standen 93 Staaten mit einem Weltbevölkerungsanteil von 54,6 %, die nach dem Democracy Index der Econo-

mist Intelligence Unit (EIU) für das Jahr 2023 als hybride oder autoritäre Regime eingestuft wurden.

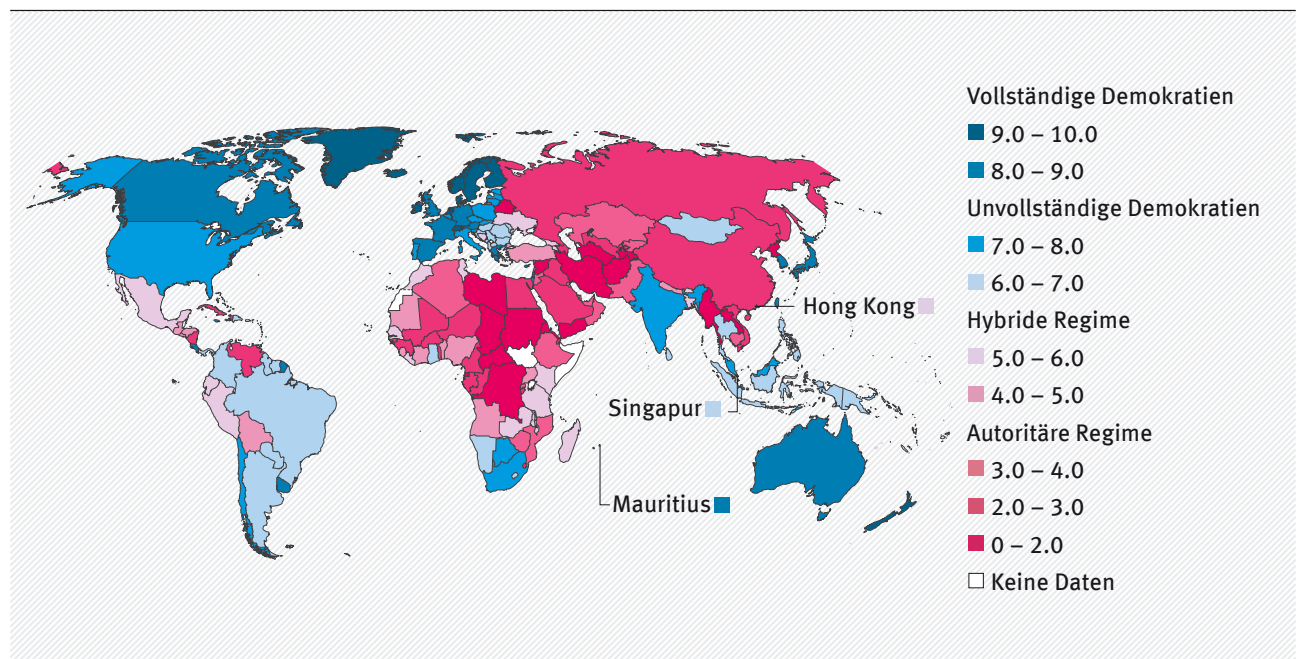
In Zeiten globaler Krisen versprechen autoritäre Akteure scheinbar einfache Antworten auf die komplizierten Fragen der Gegenwart. Der systemische Abbau demokratischer Strukturen wird von autoritären Machthabern kontinuierlich vorangetrieben. Wenngleich einige wenige Länder, wie beispielsweise Polen im Jahr 2023, durch Wahlen einen Machtwechsel hin zu liberalen Parteien verzeichnen konnten, ist mit Blick auf die Entwicklungen der vergangenen Jahre (siehe Abbildung 7) nicht zu erwarten, dass demokratische Grundwerte in den kommenden Jahrzehnten weltweit gestärkt werden.

Der Aufstieg von antiglobalistischem Populismus und klimaskeptischen Politiker\*innen wird als erhebliche Bedrohung für die Klimapolitik gesehen, da er die multilaterale Zusammenarbeit schwächt und die Umweltschutzbemühungen untergräbt. Mit der steigenden Notwendigkeit breiter themenbezogener Koalitionen im Europäischen Parlament wachsen auch die Bedenken hinsichtlich der Legitimierung rechtspopulistischer Positionen (Schaller und Carius 2019). Die zunehmende Präsenz klimaskeptischer Parteien in den europäischen Regierungen erschwert ehrgeizi-

Abbildung 06

**Weltkarte nach Regimetypen**

Stand 2023



Quelle: eigene Darstellung nach (Economist Intelligence Unit (EIU) 2024)

ge klimapolitische Vorschläge und stellt die internationale Staatengemeinschaft vor die Herausforderung, weiterhin verlässliche Kooperation zu organisieren.

### *Ausprägungen der demokratischen Strukturen weltweit*

Auf Basis des Demokratieindex der Economist Intelligence Unit (EIU) werden seit dem Jahr 2006 Staaten nach der Funktionsfähigkeit ihrer demokratischen Strukturen bewertet (siehe Abbildung 6). Der Grad der Demokratie wird auf Basis von Einschätzungen von Expert\*innen und weiteren Datenquellen, wie beispielsweise öffentlicher Meinungsumfragen (World Values Survey und Eurobarometer), in den Kategorien Wahlverfahren, Pluralismus, Funktionsweise der Regierung, politische Teilhabe, politische Kultur und bürgerliche Freiheiten bewertet. Hierbei ist anzumerken, dass als Maßstab für die Bewertung ein westlich geprägtes Idealmodell von Demokratie zugrunde gelegt wird. Nach einem Punktesystem mit einer Skala von 0 bis 10 werden die Länder wie folgt eingeteilt (Kekic 2007):

**Vollständige Demokratien** (8 – 10 Punkte) sind Staaten, in denen bürgerliche Freiheiten und politische Grundrechte geachtet und durch eine integrative politische Kultur gestärkt werden. Sie zeichnen sich durch wirksame Regierungskontrolle, unabhängige Justiz, funktionierende Regierungen und eine vielfältige und unabhängige Medienlandschaft aus.

**Unvollständige Demokratien** (6 – 7,99) weisen einzelne demokratische Mängel beispielsweise im Rahmen einer unterentwickelten politischen Kultur oder geringer politischer Partizipation auf. Obwohl Wahlen fair und frei sind und grundlegende bürgerliche Freiheiten gewährt werden, können Verletzungen der Pressefreiheit, geringfügige Unterdrückung der politischen Opposition oder Probleme mit der Regierungsführung auftreten.

**Hybride Regime** (4 – 5,99) sind Staaten, die ausgeprägte Mängel aufweisen, wie unterentwickelte politische Kultur, geringe politische Teilhabe und Defizite in der Staatsführung und Rechtsstaatlichkeit. In diesen Ländern übt die Regierung oft Druck auf die politische Opposition aus, Wahlfälschungen verhindern

faire und freie Wahlen, die Justiz ist nicht unabhängig, Korruption ist weit verbreitet, die Pressefreiheit ist nicht gewährleistet.

**Autoritäre Regime** (0 – 3,99) sind oft absolute Monarchien oder Diktaturen ohne jeden politischen Pluralismus. Ihre Institutionen haben nur begrenzte demokratische Bedeutung und die Justiz ist nicht unabhängig. Verstöße gegen bürgerliche Freiheiten sind üblich, Wahlen finden entweder gar nicht statt oder sind manipuliert, die Medien stehen unter staatlicher Kontrolle und es herrscht eine Kultur der Unterdrückung und strafrechtlicher Verfolgung von Regierungskritik.

Im Verlauf der vergangenen Dekade lässt sich der weltweite Trend zur Autokratisierung anhand der Analyseergebnisse der EIU nachvollziehen: Die Veränderungen sind nominell gering, aber über die Jahre stetig zu Ungunsten der demokratischen Regierungsformen (Abbildung 7).

### *Schleichende Autokratisierung*

In der Gesamtbetrachtung der Veränderung der demokratischen Systeme in den weltweit untersuchten Staaten muss der Schluss gezogen werden, dass sich Regimetransformationsprozesse hin zu autokratischeren Systemen beobachten lassen. Die Entwicklungen in Ländern wie Russland, Türkei, Ungarn und Polen sind von anhaltenden und wesentlichen Rückgängen demokratischer Eigenschaften geprägt (Maerz 2023). Mit dem Blick auf die vergangenen zehn Jahre wird deutlich, dass sich Autokratien zunehmend festigen. Von dem Rückgang demokratischer Grundpfeiler sind dabei insbesondere das Durchsetzen bürgerlicher Freiheiten – wie beispielsweise der Pressefreiheit – und die Rechtsstaatlichkeitsprinzipien betroffen. Das Jahr 2024, das als Superwahljahr bezeichnet wird, weil weltweit so viele Wahlen wie nie zuvor innerhalb eines Jahres stattfinden,<sup>24</sup> gilt als eine besondere Herausforderung für die Weiterentwicklung des gesellschaftlichen Zusammenhalts und der politischen Kultur (Shafy 2024).

<sup>24</sup> Etwa die Hälfte der Weltbevölkerung ist in 70 Wahlen zur Stimmenabgabe aufgerufen: Darunter sind die Wahlen des Europäischen Parlaments im Juni 2024, die Landtags- und Kommunalwahlen in den ostdeutschen Bundesländern im Herbst 2024 sowie auf internationaler Ebene die nationalen Wahlen in Russland (März 2024) und den Vereinigten Staaten (November 2024) (Bundesregierung 2024).

Abbildung 07

**Globale Verteilung der Regimetypen nach Staaten und Weltbevölkerung**



Anmerkung. Die „Weltbevölkerung“ bezieht sich auf die Population der 167 Länder, die der Index erfasst. Da hier nur Kleinststaaten ausgeschlossen sind, entspricht dies fast der gesamten geschätzten Weltbevölkerung.

Quelle: eigene Darstellung nach (Economist Intelligence Unit (EIU) 2014; Economist Intelligence Unit (EIU) 2015; Economist Intelligence Unit (EIU) 2016; Economist Intelligence Unit (EIU) 2017; Economist Intelligence Unit (EIU) 2018; Economist Intelligence Unit (EIU) 2019; Economist Intelligence Unit (EIU) 2020; Economist Intelligence Unit (EIU) 2021; Economist Intelligence Unit (EIU) 2022; Economist Intelligence Unit (EIU) 2023; Economist Intelligence Unit (EIU) 2024)

**Klima- und Umweltschutzpolitik im Kontext von Demokratien und autoritären Systemen**

Weder etablierte Demokratien noch autoritär regierte Staaten erreichen ihre nationalen Klimaschutzziele. Die Regierungsform ist dabei nicht per se ein Indiz für eine ausreichende Klimaschutzpolitik, wie der Vergleich der Abbildungen zum Demokratieindex der EIU (siehe Abbildung 6) und des Climate Action Trackers (siehe Abbildung 8) zeigt. Nichtsdestotrotz sind gute und von Verlässlichkeit geprägte internationale Beziehungen genauso bedeutsam wie das Vertrauen der Bevölkerung in die Regierung, damit eine nachhaltige Umsetzung von Klima- und Umweltschutzmaßnahmen erreicht werden kann. Seit jeher ist die

Umweltbewegung vom Protest der Zivilbevölkerung geprägt. Das Demonstrationsrecht, das Recht auf freie Meinungsäußerung und Pressevielfalt haben wesentliche Bedeutung für die Klima- und Umweltpolitik. In Autokratien sind diese Rechte eingeschränkt. Dadurch fehlt den Gesellschaften ein wichtiger Hebel für wirksame Klima- und Umweltschutzpolitik (Eitze et al. 2020).

Während Aktivist\*innen in demokratischen Ländern in den vergangenen Jahren erfolgreiche Klima- und Umweltschutzklagen vor nationalen Gerichten und zuletzt vor dem Europäischen Menschenrechtsgericht bestritten haben, werden Klima- und Umwelt-

schutzaktivist\*innen in hybriden und autoritären Regimen teilweise nicht nur strafrechtlich verfolgt, sondern auch getötet. Dass Klimaschutzaktivist\*innen in westlichen Demokratien strafrechtlich verfolgt werden, ist eine neue Entwicklung (Climate Rights International (CRI) 2024). Die Möglichkeit, sich als Gruppe oder Individuum rechtlich gegen den Staat durchzusetzen, ist ein essenzieller Vorteil von Demokratien gegenüber Autokratien (Nitsche 2024). Überdies werden in Demokratien auf diversen Entscheidungsebenen im Rahmen des jeweiligen politischen Systems Umwelt- und Klimaschutzmaßnahmen veranlasst. Aus dieser Politik der Ebenen ergibt sich eine Vielfalt von Maßnahmen und Vorhaben, die – beeinflusst von der Innovationskraft demokratischer Gesellschaften – zu einer fundierteren Klima- und Umweltschutzpolitik führen (Gross 2023).

#### *Blick in die Zukunft:*

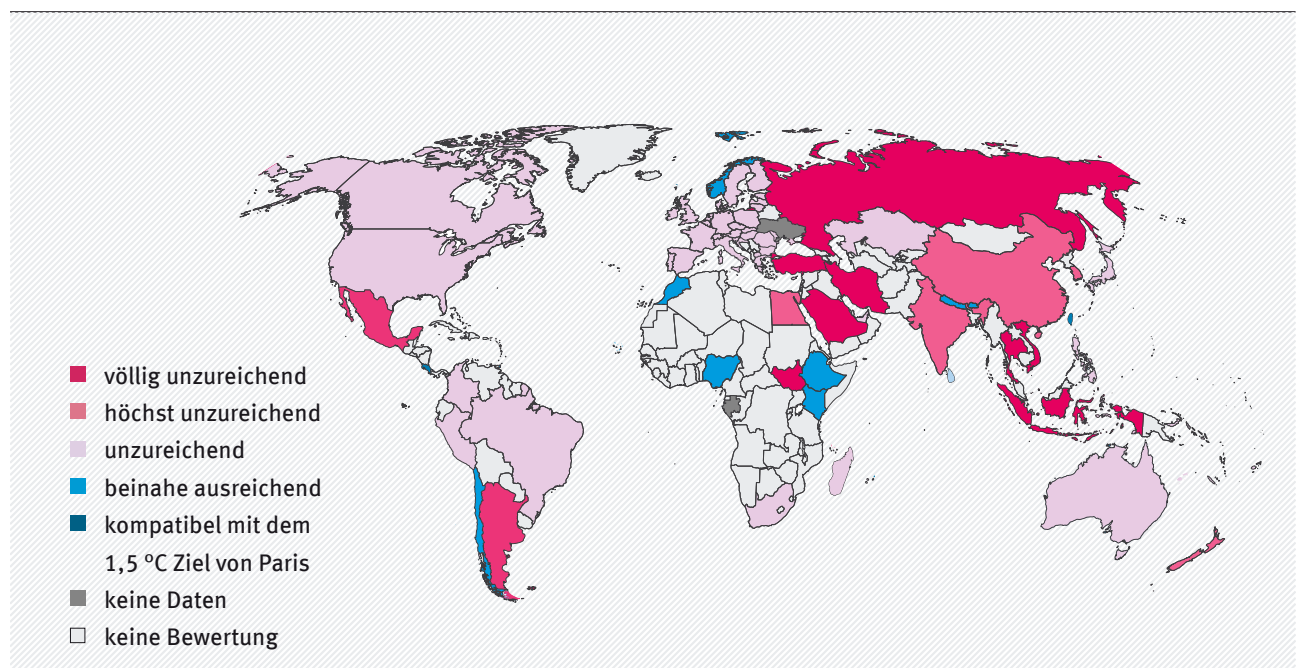
Souveränität, Wettbewerb und Wirtschaftswachstum – all das gerät durch den Klimawandel unter Druck. Ob und wie es gelingt, neue Formen des politischen Handelns zu finden, die den Herausforderungen gewachsen sind, bleibt offen. Klar ist aber, dass der Klimawandel politische Entscheidungsträger\*innen vor enorme Aufgaben stellt (Wainwright und Mann

2020). Mit Blick auf die Entwicklung der politischen Systeme und Gesellschaften, die den Antidemokratisierungstrend der Weltgemeinschaft unterstreicht, wurden die folgenden Zukünfte abgeleitet. Vor dem Hintergrund der unbekanntenen politischen Landschaft nach den Wahlen 2024 und 2025 beschreiben sie mögliche Entwicklungspfade, die politischen Entscheidungsträger\*innen Orientierung bieten sollen.

- ▶ Demokratische Staaten verstärken ihre Zusammenarbeit zum Schutz der Umwelt und Natur, zur Verteidigung der Menschenrechte und konsequenten Umsetzung der nachhaltigen Transformation. Die Regierungen der demokratischen Staaten kämpfen Seite an Seite gegen politische Polarisierung, Fragmentierung, Desinformationen und Angriffe auf nationale Souveränitäten. Ihre gemeinsamen Bemühungen sind auf die Stärkung der demokratischen Resilienz, den Schutz der Menschenrechte sowie die CO<sub>2</sub>-Reduktion ausgerichtet.
- ▶ Antidemokratische Kräfte verzeichnen Zuwächse bei den Wahlen im Jahr 2024. Demokratien werden durch Desinformation, Populismus, politische Polarisierung und soziale Unruhen be-

Abbildung 08

#### **Darstellung der Auswirkungen von Klimamaßnahmen durch verschiedene Regierungen zur Erreichung des Pariser Abkommens mittels Climate Action Tracker (CAT)**



Quelle: eigene Darstellung nach Climate Action Tracker (2024)



droht. Die nationalen Regierungen konzentrieren sich auf wirtschaftliches Wachstum des eigenen Landes und missachten sowohl internationale Klimaschutzabkommen als auch die Menschenrechtscharta. In den Folgejahren werden weitere unvollständige Demokratien zu hybriden Regimen. Bürger\*innen verlieren das Vertrauen in demokratische Institutionen und Prozesse.

- ▶ Die internationale Zusammenarbeit ist von Misstrauen und Unzuverlässigkeit geprägt. Die Anzahl der Autokratien nimmt weltweit weiterhin zu. Die zwischenstaatliche Kooperation verfolgt keine solidarischen Ziele, sondern nationale wirtschaftliche Interessen. Die Vision einer auf gemeinsamen Grundwerten kooperierenden Weltgemeinschaft ist bei den starken Demokratien weiterhin vorhanden. Zur wirksamen Verfolgung gemeinsamer Ziele zum Erhalt der Lebensgrundlagen bedarf es der Bereitschaft zu einer internationalen Annäherung sowie der kritischen Auseinandersetzung mit den diversen Interessenlagen.

Der folgende Emerging Issues-Abschnitt widmet sich neben der Frage, wie (Umwelt-)Politik auf die oben dargestellten möglichen Entwicklungen reagieren sollte, auch der Beantwortung der folgenden Fragen:

1. Wie wirken sich Desinformationskampagnen auf das Vertrauen in demokratische Prozesse aus und welche Maßnahmen können ergriffen werden, um das Vertrauen in Demokratien wieder zu stärken?
2. Wie beeinflusst das Erstarken populistischer Parteien, insbesondere der AfD, Veränderungen

der Entscheidungsstrukturen der Umwelt- und Klimapolitik in Deutschland?

3. Wie beeinflusst das weltweite Erstarken von Autokratien die internationale Staatengemeinschaft darin, effektiv auf globale Umwelt- und Klimaherausforderungen zu reagieren?

### Emerging Issues

Der Rückgang des Vertrauens in politische Institutionen und öffentliche Einrichtungen in westlichen Gesellschaften, die zunehmende Autokratisierung und der Aufstieg populistischer Bewegungen markieren signifikante Trends, die demokratisch regierte Staaten unter Druck setzen und die Stabilität demokratischer Institutionen gefährden. Die Tragweite dieser Veränderungen ist besonders relevant, wenn es um die Bewältigung globaler und überregionaler Herausforderungen geht, wie etwa im Bereich der Klimapolitik oder bei überregionalen umweltpolitischen Fragen. Die Effektivität der Implementierung umweltpolitischer Maßnahmen steht in direktem Zusammenhang mit der politischen Stabilität und der Qualität demokratischer Prozesse (Cohen 2021).

#### 1. Demokratien in der Vertrauenskrise

Studien der Friedrich-Ebert-Stiftung (2019), der Körber-Stiftung (2023) und des Eurobarometers (2023) belegen einen deutlichen Rückgang des Vertrauens in politische Entscheidungsträger\*innen, Regierungen und Parteien, verstärkt durch sozioökonomische Spannungen und den Aufstieg populistischer Bewegungen. Besonders in Deutschland zeigt die Körber-Stiftung (2023) auf, dass 54 % der Befragten demokratischen Institutionen mit Skepsis begegnen

– eine Tendenz, die sich auch auf europäischer Ebene in Misstrauensbekundungen gegenüber Parlamenten, Parteien und dem Justizsystem widerspiegelt (European Commission 2023).

Die „Bürgerbefragung Öffentlicher Dienste“ (2023) stellt dar, dass lediglich 27 % der Teilnehmenden dem Staat aktuell zutrauen, seine vielfältigen Aufgaben effektiv zu bewältigen – ein signifikanter Rückgang seit 2020. Die Mehrheit der Befragten empfindet den Staat als überfordert, mit Herausforderungen in den Bereichen Asyl, Bildung, Umwelt- und Klimaschutz sowie Gesundheitsversorgung und soziale Gerechtigkeit. Zusätzlich wünschen sich 56 % entschlosseneren Führungskräfte für die Politik, während 71 % eine Entfremdung der Politik von den Alltagsrealitäten der Bevölkerung verspüren (Körper-Stiftung 2023). Diese wahrgenommene Distanz mindert auch das Vertrauen in die Fähigkeit politischer Entscheidungsträger\*innen, effektive Umweltschutzmaßnahmen zu implementieren, und schwächt die Motivation zum Engagement für den Klima- und Umweltschutz, insbesondere unter jenen, die sich ungehört fühlen (Kulin und Sevä 2020).

Parallel dazu manipulieren Desinformationskampagnen, teils gesteuert von Autokratien aus dem Ausland, teils gesteuert von inländischen antidemokratischen Kräften, den öffentlichen Diskurs, treiben den geschilderten Vertrauensverlust voran und beeinflussen politische Entscheidungen (CAAD 2023). Ereignisse wie der Brexit und die US-Präsidentenwahlen 2016 veranschaulichen, wie durch die Verbreitung falscher Informationen über soziale Medien das Vertrauen in demokratische Prozesse untergraben und politische Ergebnisse gezielt beeinflusst werden (Wolling et al. 2023). Diese Kampagnen, die bewusst Fehlinformationen streuen, unterscheiden sich von unbeabsichtigten Falschinformationen durch die klare Zielsetzung zu täuschen und zu manipulieren sowie den Informationsfluss zu kontrollieren, um Einfluss auf die öffentliche Meinung zu nehmen und politische Gegner zu diskreditieren (Ruttloff et al. 2023).

Die Climate Action Against Desinformation (CAAD) und das Institut für strategischen Dialog (ISD) haben dokumentiert, wie Klimadesinformation gezielt genutzt wird, um Umwelt- und Klimapolitiken zu schwächen. Rechtspopulistische Gruppen und Parteien leugnen den anthropogenen Klimawandel,

stellen wissenschaftliche Erkenntnisse infrage und betonen ökonomische Nachteile von Klima- und Umweltschutzmaßnahmen. Darüber hinaus lehnen sie internationale Kooperationen im Klima- und Umweltschutzbereich ab (Schaller und Carius 2019; Matlach und Janulewicz 2021).

Während der Bundestagswahl 2021 in Deutschland betonte besonders die AfD ihre Skepsis gegenüber dem menschengemachten Klimawandel und gegenüber Klimaschutzmaßnahmen. Im Wahlkampf, der sich zunehmend in den digitalen Raum verlagerte, war der Klimawandel ein zentrales Thema. Rechtsextreme und rechtspopulistische Gruppen, die Klimaschutz nur als Instrument der ideologischen Gegner sehen, nutzten soziale Medien, um mit emotionalen und polarisierenden Inhalten Aufmerksamkeit und Unterstützung zu gewinnen. So konnte im Rahmen der Forschung zum Bundestagswahlkampf 2021 aufgezeigt werden, dass Gegner\*innen von Klimaschutzmaßnahmen häufig Informationen aus dem Kontext rissen. Zugespitzte Schlagzeilen etablierter Medien wurden genutzt, um irreführenden Inhalten eine höhere Glaubwürdigkeit zu verleihen. Auch gab es eine Stilisierung der Klimadebatte von Rechts zum „Kulturkampf“, etwa indem häufig Feindbilder heraufbeschworen wurden („Klima-Hysteriker“, „Klima-Terroristen“, „Die Grünen“). Und es wurden verschiedene Desinformationsnarrative eingesetzt, so etwa das Narrativ „Verleugnung und Verzögerung“, das den Klimawandel verleugnete oder beschönigte (Matlach und Janulewicz 2021; Umweltbundesamt (UBA) 2023).

Die Algorithmen sozialer Medien verstärken solche rechtspopulistischen Kampagnen, indem sie Beiträge mit hoher Engagement-Rate bevorzugen, was häufig Desinformationen einschließt. Dies führt zu einer verzerrten Wahrnehmung öffentlicher Meinungen und erschwert eine sachliche Diskussion gerade auch über Klimaschutz (Klee und Midulla 2023).

Desinformationen untergraben nicht nur die Akzeptanz wissenschaftlicher Erkenntnisse zum Klimawandel, sondern verzögern auch dringend benötigte Klimaschutzmaßnahmen (Kaiser und Rhomberg 2016). Um diese destruktiven Einflüsse zu bekämpfen, ist es entscheidend, verlässliche Informationen bereitzustellen und politische Inhalte kritisch auf Falschinformationen zu prüfen (CAAD 2023). Fact-checking-Organisationen leisten bedeutsame Aufklärungsarbeit, indem sie manipulierte Beweise entkräf-

ten, die den anthropogenen Klimawandel leugnen oder beschönigen (Klee und Midulla 2023).

Erfolgreiche Klima- und Umweltpolitik setzt auf Transparenz, Bildung und die Verbreitung von wissenschaftlich fundierten Fakten, um Desinformationskampagnen effektiv zu begegnen. Gezielte Aufklärungskampagnen, die sachlich informieren und zum Handeln motivieren, sind wesentlich, um das Bewusstsein für umweltpolitische Anliegen und die Notwendigkeit umweltfreundlicher Maßnahmen zu schärfen. Die entschiedene Bekämpfung von Desinformationen durch evidenzbasierte Informationsverbreitung und die Unterstützung eines auf Fakten basierenden Journalismus (evtl. mit speziellen Journalisten-Briefings zu Themen, Fakten-Check u. ä.) sind sehr wichtig, um das Engagement für den Klima- und Umweltschutz zu fördern (Maurer et al. 2023). Gleichzeitig erfordert die zunehmende Bedeutung von Social Media und digitalen Technologien neue Ansätze in der politischen Kommunikation, um den Herausforderungen durch Desinformationen wirksam zu begegnen und eine fundierte öffentliche Diskussion über Umweltthemen zu fördern. Denkbar wäre auch, die Unternehmen, die von der Verbreitung von Desinformationen profitieren und dies durch entsprechende Algorithmen unterstützen, nicht nur zu einer stärkeren Kontrolle ihrer Inhalte zu verpflichten, sondern auch zur Finanzierung von Maßnahmen, um Bürger\*innen zu einer kritischen Nutzung von Social Media zu schulen. Ebenso wäre denkbar, sie zur Finanzierung der Entwicklung und Implementierung von Strategien zur Identifikation und Bekämpfung von Desinformationskampagnen, die auf Umwelt- und Klimafragen abzielen, zu verpflichten.

## 2. Zunahme antidemokratischer Tendenzen innerhalb Deutschlands

In Deutschland führt das Erstarken populistischer Parteien, insbesondere der AfD, sowie weiterer nicht demokratischer Bewegungen zu stärkeren antidemokratischen und gleichzeitig umweltschutzfeindlichen Tendenzen. Die AfD bezweifelt den anthropogenen Klimawandel und kritisiert Klimaschutz als gegen „einfache Leute“ gerichtetes, ideologisches Vorhaben.<sup>25</sup> Diese Positionen, geäußert als Kritik an

der „Klimahysterie“, können die Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen verzögern oder abschwächen. Die Partei lehnt die Energiewende ab und bevorzugt traditionelle Energiequellen, was den langfristigen Zielen der energiepolitischen Transformation in Deutschland entgegensteht (Jacob et al. 2020). Trotz unterschiedlicher Ansichten innerhalb der Landesverbände, wie der Pro-Kohle-Haltung in Sachsen und Brandenburg im Gegensatz zu der Bremer AfD, die sich gegen Kohlekraftwerke ausspricht, nimmt die AfD insgesamt eine einheitliche Position gegen Klimapolitiken ein, was die politische Spaltung in Deutschland vertieft (Götz und Kirchner 2016).

Die zunehmende Präsenz der AfD in den Bundesländern und auf kommunaler Ebene, einschließlich der Übernahme von Landrats- und Bürgermeisterämtern, erschwert die Gestaltung und Implementierung bundesweit einheitlicher, fortschrittlicher Umweltpolitiken. Die bislang definierten, festen eigenen Zuständigkeiten der Länder und Kommunen werden es antidemokratischen Kräften prinzipiell in der Zukunft ermöglichen, in verschiedenen Bereichen umwelt-, klima- und naturschutzpolitische Ziele zu unterlaufen und politische Maßnahmen zu initiieren, die nationalen oder internationalen Umweltschutzziele entgegenstehen. Dadurch steigt auch das Potenzial für direkte Konflikte zwischen Bund und Ländern.

Der Einfluss rechtspopulistischer Parteien reicht weit in die politischen Debatten und Entscheidungsprozesse auf Bundes- und Landesebene, wo ihre Blockadehaltung gegenüber umweltpolitischen Initiativen das öffentliche Vertrauen in die Wissenschaft untergräbt und nachhaltige Entwicklungsziele gefährdet. Auch dort, wo Rechtspopulisten nicht an der Regierung sind, dominieren sie teilweise den politischen Diskurs und engen die Spielräume der anderen, demokratischen Parteien ein (Töller 2022).

Der Stellenabbau und die Kommunalisierung von Umweltschutzaufgaben, also die Abschaffung von Fachbehörden und die Zuordnung von Aufgaben an Kommunen, haben den Umwelt- und Naturschutz bereits geschwächt. Reformen in einzelnen Bundesländern führten zur Repolitisierung umweltrechtli-

<sup>25</sup> Interessanterweise zeigt die Forschung, dass die Politik der AfD gerade die eigenen Anhänger\*innen am ehesten belastet (Fratzscher 2023). Da Personen, die sich als Modernisierungsverlierer sehen, besonders für Rechtspopulisten und rechtsextreme Parteien empfänglich sind, sind Narrative, dass bestimmte Politiken gegen die Interessen einfacher Leute gerichtet sind, hilfreich für Parteien wie die AfD (Gidron und Hall 2017). Eine soziale Abfederung des wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Umbaus ist deshalb wichtig.

cher Genehmigungen und zur Marginalisierung der Umweltverwaltung (Schulze et al. 2008). Diese Entwicklungen bedrohen schon jetzt den Umweltschutzvollzug. Um künftig ein weiteres, deutliches Aufweichen des Umweltschutzes in Deutschland im Zuge des Erstarkens antidemokratischer Kräfte zu verhindern, wird es bei einer Fortentwicklung der aktuellen Trends möglicherweise schon bald erforderlich sein, weitere umweltpolitische (Mindest-)Vorgaben auf Bundesebene zu erwägen, zusätzliche Regeln der Zusammenarbeit auf den unteren staatlichen Ebenen zu etablieren und im Extremfall auch die Kompetenzzuweisungen an Bund, Länder und Kommunen in den verschiedenen umweltpolitischen Bereichen neu zu regeln (Götz und Kirchner 2016). Ferner könnte das zivilgesellschaftliche Engagement gerade im Umweltbereich gezielt gestärkt werden durch Programme zur Unterstützung von NGOs und Bürgerinitiativen. Diese könnten als Gegengewicht zu rechtspopulistischen und -extremen Einflüssen der Politik wirken.

### 3. Zunehmendes Erstarken von Autokratien weltweit

Der weltweite Trend der Zunahme und des Machtzuwachses autokratischer Regime stellt eine signifikante Hürde für die politische Ordnung dar und hat weitreichende Auswirkungen auf die internationale Umwelt- und Klimapolitik.

In autokratischen Systemen wird der Klima- und Umweltschutz oft zugunsten politischer, ökonomischer und sozialer Ziele vernachlässigt, insbesondere wenn die Wirtschaftsleistung durch Umweltregulierungen kurzfristig beeinträchtigt zu werden scheint oder wenn Regierungen von Energieexporten abhängig sind (Melton und Marktanner 2021; Bauer 2023; Sinha et al. 2023). Die tendenziell höhere Bedeutung von Klima- und Umweltschutz in Demokratien spiegelt sich in einer höheren Emissionsbelastung in Autokratien gegenüber Demokratien wider bzw. in einer gesteigerten Emissionsintensität pro Einheit des Einkommenswachstums. Eine Analyse der Umwelt-Kuznets-Kurve für 150 Länder von 1790 bis 2010 zeigt, dass Autokratien bei steigendem Pro-Kopf-Einkommen höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweisen als Demokratien. Demokratien implementieren effektivere Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen und setzen sich ambitioniertere nationale Klimaschutzziele. Ihre Effizienz bei der CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion unterstreicht die Bedeutung des politischen Systems für erfolgreiche Klimaschutzstrategien (Sinha et al. 2023).

Neben der geringen Priorisierung von Umweltaspekten in autoritären Regimen führen in diesen Ländern mangelnde Transparenz und Rechenschaftspflicht zu einem erhöhten Risiko von Korruption (Hartmann 2022), was Klima- und Umweltschutzinitiativen sowie eine nachhaltige Gesamtentwicklung behindert. Die in der Regel deutlich höhere Transparenz und die höhere Rechenschaftspflicht in demokratischen Staaten ermöglichen es, negative Umweltauswirkungen leichter aufzudecken und publik zu machen sowie die Einhaltung von Umweltschutzgesetzen effektiver zu kontrollieren (Fuhr und Taylor 2017; Transparency International Deutschland e.V. 2021). Für den europäischen und internationalen Klima- und Umweltschutz ist das Anwachsen der Zahl der Autokratien also unmittelbar relevant.

Auf europäischer Ebene stellt das Erstarken rechtspopulistischer und autokratischer Tendenzen eine erhebliche Herausforderung für die gemeinsame Umweltpolitik der Europäischen Union dar. Diese politischen Kräfte neigen dazu, nationale Interessen über gemeinsame europäische Ziele zu stellen, was die Umsetzung von EU-weiter Umweltgesetzgebung erschwert und zu einer Fragmentierung der Umweltpolitik innerhalb der EU führen kann. Darüber hinaus besteht die Gefahr, dass durch den Einfluss dieser Parteien wichtige Umweltinitiativen auf EU-Ebene blockiert oder abgeschwächt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Verzögerung der Umsetzung des Green Deals, bei dem einige Mitgliedsstaaten, die von rechtspopulistischen Regierungen geführt werden, Widerstand gegen strengere Umweltauflagen leisten. Auch haben rechtspopulistische Parteien in Ländern wie Polen und Ungarn wiederholt Maßnahmen blockiert, die der Erreichung der EU-Klimaziele dienen sollten. Die Ergebnisse der Europawahl 2024, welche eine Stärkung rechtspopulistischer Kräfte im Europäischen Parlament zur Folge hatten, lassen erwarten, dass sich die politische Einigung auf zukünftige Umwelt- und Klimaschutzmaßnahmen deutlich komplexer gestalten dürfte (Kielon 2024).

Eine uneinige EU hat gleichzeitig weniger Einfluss auf internationale Verhandlungen und Vereinbarungen, was die globale Führungsrolle der EU im Umwelt- und Klimaschutz schwächen kann. Die internationale Umweltpolitik hat in den vergangenen Jahrzehnten erheblich an Bedeutung gewonnen. Inzwischen gibt es ein komplexes System von autonomen internationalen Regimen, Übereinkommen und

Konventionen. Hinzu kommt eine sehr ausdifferenzierte institutionelle Architektur mit jeweils spezialisierten und dezentral angesiedelten Sekretariaten sowie einer Vielzahl zwischenstaatlicher Ausschüsse und Arbeitsgruppen wie auch verschiedenen Abteilungen des Sekretariats der Vereinten Nationen (UN), dem Umweltprogramm UNEP sowie Zuständigkeiten und Kapazitäten bei Sonderorganisationen wie dem United Nations Development Programme (UNDP), der Food and Agriculture Organisation (FAO), World Health Organisation (WHO) etc. In keinem anderen Politikfeld hat es seit 1972 eine vergleichbar große Zahl an internationalen Konferenzen, Vertragsstaaten- und Folgeprozess-Treffen gegeben wie im Bereich der Umweltpolitik (Rechkemmer 2007).

Diese intensiven politischen Aktivitäten sind Folge des Umstandes, dass viele umweltbezogene Problemstellungen sich nur noch im Rahmen internationaler Zusammenarbeit lösen lassen. Sofern diese Zusammenarbeit künftig nicht mehr gewährleistet ist, wird es schwer, auf essenzielle umweltpolitische Herausforderung noch adäquat zu reagieren.

Es gibt zurzeit und auch für die mittelbare Zukunft keine Anzeichen für eine gemeinsame, umweltfeindliche Agenda von Autokratien weltweit, ebenso wenig wie es Anzeichen für eine „autokratische Internationale“ gibt. Autokratien orientieren sich in ihrer Außenpolitik vor allem an ihren unmittelbaren innerstaatlichen Interessen und nicht an gemeinsamen übergreifenden Wertvorstellungen. Die Zusammenarbeit ist eher auf einzelne Themen und kurzfristige Fragen ausgerichtet. „In autoritär dominierten Organisationen scheuen sich Mitgliedsstaaten oftmals davor, nennenswerte Kompetenzen abzugeben. Der Begriff der ‚Kollaboration‘ zwischen autoritären Regimen spiegelt das hier sichtbare Misstrauen und vermeidet die normativ konnotierte Bezeichnung der Kooperation.“ (Bank und Josua 2017; S. 6)

Wenngleich ein breiter Angriff auf umweltpolitische internationale Abkommen damit auch mittelfristig nicht zu erwarten ist, führt das Erstarken autoritärer Regime gleichwohl absehbar zu einer Schwächung der internationalen umweltpolitischen Zusammenarbeit. Autokratische Regime halten internationale Vereinbarungen seltener ein und sind bei der regionalen Zusammenarbeit weniger zuverlässig (Hartmann 2022). Für die Erhaltung oder den Ausbau der internationalen Zusammenarbeit in umweltpolitischen Fragen ist dies sehr problematisch.

### Fazit für Umweltpolitik und -forschung

Der weltweite Rückgang demokratischer Stabilität mindert die Fähigkeit von Staaten, effektiv auf globale Umwelt- und Klimaherausforderungen zu reagieren. Die notwendigen Transformationen in Richtung Nachhaltigkeit auf gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Ebene, wie auch andere Veränderungsprozesse und Krisen, führen zu Sorgen und Ängsten in der Bevölkerung. Diese Sorgen und Ängste muss die Politik adäquat adressieren, da ansonsten die Gefahr besteht, dass autokratische Tendenzen weiter zunehmen. Schon jetzt gewinnen populistische Parteien und Bewegungen an Einfluss, die Umweltschutzmaßnahmen kritisch hinterfragen oder blockieren. Die gezielte Verbreitung von Desinformationen durch autoritär orientierte Akteure, insbesondere in Bezug auf den Klimawandel, stellt eine ernste Bedrohung dar, die die öffentliche Unterstützung für Klima- und Umweltschutzmaßnahmen unterminieren kann.

Autokratische Staaten, deren Wirtschaftswachstum stark von fossilen Energieträgern abhängt, positionieren sich häufig gegen verstärkte internationale Klimaschutzmaßnahmen. Demgegenüber unterstützen tendenziell Demokratien durch zumeist transparentere Institutionen und Verantwortlichkeitsmechanismen sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene den Klima- und Umweltschutz. Um die globalen Umwelt- und Klimaschutzbemühungen voranzutreiben, ist es wichtig, demokratische Prinzipien zu stärken und gegen autoritäre Tendenzen sowie Desinformation vorzugehen. Die Förderung von Bürgerbeteiligung, eine zivilgesellschaftliche Mobilisierung, Angebote der Politik, gemeinsam eine nachhaltige Zukunft zu schaffen – dies alles hilft, eine positive Sicht auf den aktuellen Transformationsprozess zu erreichen. Hier kann sich die deutsche Umweltpolitik an vielen Stellen aktiv einbringen.

Aufgabe der Umweltpolitik kann es zudem sein, stärker die Zusammenhänge zwischen Autokratien und einem Rückfall in Umweltschutzfragen deutlich zu machen. So wie die deutsche Umweltpolitik sich aktiv der Desinformation autokratischer Staaten entgegenstellen muss, so sollte sie auch umgekehrt aktiver darauf hinweisen, wo Autokratien bzw. sich in eine autokratische Richtung bewegende Regierungen gravierende Umwelt- bzw. Klimaschäden verantworten.



## 2.5 Militär, Krieg und Kriegsfolgen

**Trend:** Durch den russischen Angriffskrieg auf die Ukraine sind militärische Auseinandersetzungen in der Wahrnehmung der europäischen Öffentlichkeit sehr präsent geworden. Neben den verheerenden Auswirkungen auf Bevölkerung und Infrastruktur leiden auch Umwelt und Natur enorm unter militärischen Konflikten – sei es infolge von Kampfhandlungen oder auch durch gezielte Zerstörung. Gleichzeitig gibt es auch im militärischen Bereich zunehmend Bemühungen um mehr Nachhaltigkeit. Wie kann eine vorausschauende Umweltpolitik diesen Herausforderungen begegnen bzw. dieses Engagement unterstützen?

### Emerging Issues

- ▶ Umweltschäden und -folgen von Krieg
- ▶ Umweltzerstörung als Kriegsstrategie
- ▶ Nachhaltiges Militär

### In Kürze

- ▶ Bewaffnete Konflikte und Kriege bringen nicht nur Leid und Tod mit sich, sondern haben auch vielfältige negative Auswirkungen auf die Umwelt, die teilweise noch Jahrzehnte nach Kriegsende bestehen bleiben. Infolge des russischen Angriffskrieges auf die Ukraine erlebt Europa aktuell im Rahmen der „Zeitenwende“ einen Paradigmenwechsel in der Verteidigungs- und Sicherheitspolitik von einer Friedens- hin zu einer Konfliktordnung. Die Anzahl bewaffneter Konflikte sowie die weltweiten Militärausgaben steigen und demokratische Gesellschaften sehen sich zunehmend

durch hybride Kriegsführung herausgefordert.

- ▶ Umweltrelevante Aspekte betreffen vor allem drei Bereiche: erstens die direkten und unmittelbaren Folgen der Kriegshandlungen für Umwelt und Menschen vor Ort, zweitens das Militär selbst sowie dessen eingesetzte Technologien und benötigte Ressourcen, und drittens längerfristige Folgen und Auswirkungen im Zuge von Entsorgung des Kriegsmaterials oder Wiederaufbau. Zusätzlich gibt es Ansatzpunkte zum Schließen von Regulierungslücken, die alle drei Bereiche betreffen.

### Hintergrund

In den vergangenen zehn Jahren hat sich die globale Sicherheit deutlich verschlechtert: Im Jahr 2022 gab es weltweit mehr Kriege als jemals zuvor sowie deutlich höhere Militärausgaben (Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI) 2023). Daher steigt die Notwendigkeit, die ökologischen Auswirkungen von Kriegen und bewaffneten Konflikten zu verstehen und in sicherheitspolitische Überlegungen, Konfliktpräventionsstrategien und Friedensförderung einzubeziehen.

Bewaffnete Konflikte sind inhärent destruktiv. Sie führen nicht nur unmittelbar zu Leid und Tod, sondern überdies zu Umweltschäden, die verheerende Auswirkungen für Flora, Fauna und Menschen haben. Dabei überschreiten die Umweltwirkungen die

Dauer des Konflikts meistens bei Weitem und prägen die Ökosysteme auch noch Jahrzehnte nach Kriegsende. Dies umfasst u. a. die Zerstörung von Lebensräumen durch Bombardierungen und Infrastrukturschäden, die Freisetzung von Schadstoffen und giftigen Substanzen aus Waffen und Munition, die Boden-, Wasser-, und Luftverschmutzung verursachen, sowie die massive Abholzung und den Verlust von Biodiversität durch Kriegsaktivitäten. Dabei sind die Beziehungen zwischen Konflikten und Umwelt vielfältig. Einerseits können Kriege zu Konflikten um natürliche Ressourcen wie Wasser und Land führen. Andererseits kann die (Über-)Nutzung von natürlichen Ressourcen Konflikte als Folge haben. Darüber hinaus können die Auswirkungen des Krieges auf die Umwelt (Verschmutzung, Wassermangel etc.) ein Treiber für umweltbedingte Migration sein. Zu den langfristigen Auswirkungen gehören auch die vielen Ressourcen, die nach Kriegsende für den Wiederaufbau nötig sind.

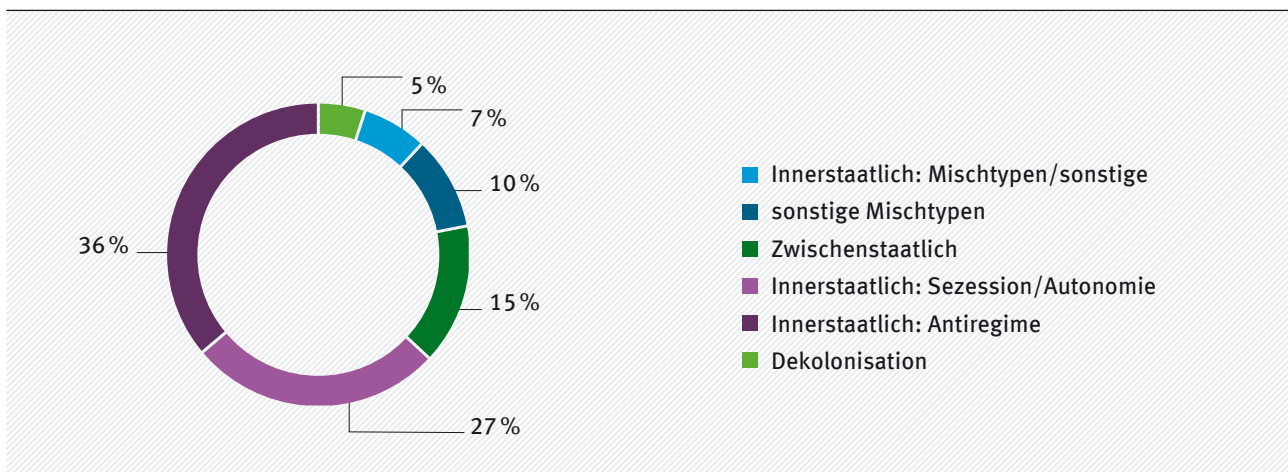
*Europas neue (Un-)Sicherheit: von der Friedens- zur Konfliktordnung*

In der Wahrnehmung vieler Westeuropäer\*innen kehrte erst mit dem russischen Angriff auf die Ukraine der Krieg nach Europa zurück. Vielmehr markiert die Invasion regulärer russischer Truppen am 24. Februar 2022 jedoch tatsächlich eine weitere Eskalationsstufe in einer Reihe von Auseinandersetzungen nach Ende des Kalten Krieges (Bundeszentrale für politische Bildung (bpb) 2022b). Nach Ende des Zweiten Weltkrieges gab es zahlreiche bewaffnete Konflikte

und Kriege in Europa, bei denen Hunderttausende ihr Leben verloren – darunter in Zypern, Berg-Karabach, auf dem Balkan, in Tschetschenien und Georgien (Redaktionsnetzwerk Deutschland 2022). Dennoch setzte man im Westen lange auf enge Handelsbeziehungen zu Russland, auch in der jüngsten Vergangenheit unter Putin. Auch die anderen Kriege, die Russland nach dem Zerfall der Sowjetunion geführt hatte, um seinen Einflussbereich zu sichern, wirkten sich eher regional als international aus (Bundeszentrale für politische Bildung (bpb) 2022b). Selbst die rechtswidrige Besetzung der Krim 2014 änderte die westliche Haltung nicht. Die jüngste russische Invasion in der Ukraine hat jedoch zur Folge, dass die europäische Sicherheitsordnung, die sich seit dem Ende des Kalten Krieges etabliert hatte, um dauerhaften Frieden, Stabilität und wirtschaftliche Zusammenarbeit in der Region sicherzustellen, zerstört worden ist. Folglich verkündete Bundeskanzler Olaf Scholz im Februar 2022 in einer Regierungserklärung die sogenannte „Zeitenwende“ für die Bundeswehr und läutete einen Paradigmenwechsel in der Verteidigungs- und Sicherheitspolitik Deutschlands und Neugestaltung der europäischen Sicherheitsordnung ein. Deren Kern ist, dauerhaft Sicherheit und Demokratie in Europa zu gewährleisten, den Angriffskrieg Russlands nicht nur als Bruch des Völkerrechts zu benennen und das Land zu sanktionieren, sondern die Ukraine auch aktiv zu unterstützen (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2022).

Abbildung 09

**Kriegstypen seit 1945**



Quelle: eigene Darstellung nach Schreiber 2021

Die liberale Weltordnung, die sich seit der Wende und der Öffnung des sogenannten Eisernen Vorhangs in den Jahren 1989/90 herausbildete, gilt insbesondere in demokratischen Staaten als wesentlicher politischer und wirtschaftlicher Motor für Fortschritt, Frieden und Wohlstand. Aktuell erleben wir allerdings, wie diese unipolare Weltordnung unter der Vormachtstellung der USA durch geopolitische Rivalen wie China, Russland, aber auch die Türkei konfrontativ herausgefordert wird. Die nach dem Kalten Krieg geprägte internationale Ordnung ist derzeit im Begriff, sich zugunsten einer neuartigen bi- oder multipolaren Weltordnung zu verändern, und es ist aktuell unklar, wie viel vom regelbasierten Multilateralismus übrigbleiben wird. Insbesondere Russlands Angriff auf die Ukraine und die kriegerische Eskalation des Nahostkonfliktes 2023 könnten zukünftig als Kristallisationspunkte für die Zeitenwende in den internationalen Beziehungen gelten (Friedrich-Ebert-Stiftung 2023a).

Deutschland ist in eine Vielzahl von internationalen Organisationen eingebunden, die unterschiedlichen Zwecken dienen. Die bekanntesten und wichtigsten sind neben der EU die Vereinten Nationen und das Verteidigungsbündnis NATO (engl. North Atlantic Treaty Organization) (Bundeszentrale für politische Bildung (bpb) o.J.). Mit der erneut auftretenden Ost-West-Konfrontation seit dem russischen Angriff auf die Ukraine ist insbesondere die Bedeutung der NATO als Verteidigungsbündnis politisch wieder stärker in den Fokus gerückt und hat in vielen europäischen Ländern zur Neuausrichtung der Sicherheitspolitik geführt. So haben beispielsweise Finnland und Schweden ihre militärische Bündnisneutralität aufgegeben und sind der NATO beigetreten (Bundeszentrale für politische Bildung (bpb) o.J.).

### Wann spricht man von einem Krieg?

Die Arbeitsgemeinschaft für Kriegsursachenforschung (AKUF) definiert **Krieg** als einen gewaltsamen Massenkonflikt, der alle der folgenden Merkmale aufweist:

- ▶ an den Kämpfen sind zwei oder mehr bewaffnete Streitkräfte beteiligt, bei denen es sich mindestens auf einer Seite um reguläre Streitkräfte (Militär,

paramilitärische Verbände, Polizeieinheiten) der Regierung handelt;

- ▶ auf beiden Seiten muss ein Mindestmaß an zentral gelenkter Organisation der Kriegführenden und des Kampfes gegeben sein, selbst wenn dies nicht mehr bedeutet als organisierte bewaffnete Verteidigung oder planmäßige Überfälle (Guerillaoperationen, Partisanenkrieg usw.);
- ▶ die bewaffneten Operationen ereignen sich mit einer gewissen Kontinuität und nicht nur als gelegentliche, spontane Zusammenstöße, d. h., beide Seiten operieren nach einer planmäßigen Strategie – gleichgültig, ob die Kämpfe auf dem Gebiet einer oder mehrerer Gesellschaften stattfinden und wie lange sie dauern (Universität Hamburg 2016).

Gewaltsame Auseinandersetzungen, bei denen nicht alle Kriterien in vollem Umfang erfüllt sind, werden als **bewaffnete Konflikte** bezeichnet (Universität Hamburg 2016).<sup>26</sup> Des Weiteren unterscheidet die AKUF zwischen den folgenden fünf Kriegstypen: Antiregime-Kriege, Autonomie- und Sezessionskriege, zwischenstaatliche Kriege, Dekolonisationskriege sowie sonstige Kriege. Dabei lassen sich zahlreiche Kriege nicht eindeutig zuordnen, weil sich verschiedene Typen überlagern oder sich der Kriegscharakter im Lauf der Auseinandersetzung verändert, sodass sich Mischtypen bilden (Universität Hamburg 2016). Die beiden häufigsten Kriegstypen seit 1945 sind innerstaatliche Antiregime-Kriege mit 36 % und innerstaatliche Autonomie-Kriege mit 27 % (siehe Abbildung 9).

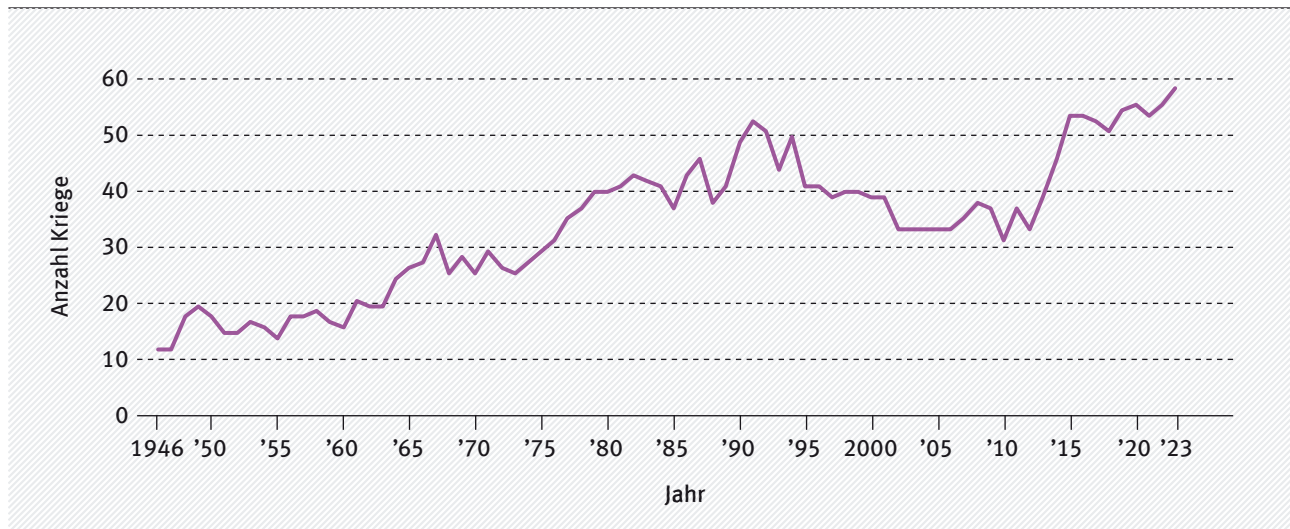
### Weltweite Konflikt- und Kriegslandschaft und Militärausgaben

Im Jahr 2022 kam es weltweit zu zahlreichen bewaffneten Konflikten, bei denen die Anzahl und das Ausmaß der Gewalt in den einzelnen Regionen stark schwankten. Der Krieg in der Ukraine war 2022 der einzige größere zwischenstaatliche Krieg, an dem stehende Armeen beteiligt waren. Außerhalb Europas fanden die meisten Kriege innerhalb von Staaten oder in Staatenbünden mit durchlässigen Grenzen statt (Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI) 2023). Insgesamt waren im Jahr 2022 56 Staa-

<sup>26</sup> Als beendet werden Kriege dann angesehen, wenn die Kampfhandlungen dauerhaft, d. h. für den Zeitraum von mindestens einem Jahr, eingestellt bzw. nur unterhalb der oben genannten Kriterien fortgesetzt werden (Universität Hamburg 2016).

Abbildung 10

**Gesamtzahl der Bürgerkriege und zwischenstaatlichen Konflikte weltweit in den Jahren von 1946 bis 2023**



Quelle: eigene Darstellung nach Statista GmbH 2023b; S. 13

ten von bewaffneten Konflikten betroffen (siehe Abbildung 10). Das sind fünf Staaten mehr als noch im Jahr zuvor (Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI) 2023). In 16 weiteren Fällen handelte es sich um intensive bewaffnete Konflikte.

Im Zuge der zahlreichen kriegerischen Auseinandersetzungen erfolgte in vielen Staaten eine Aufrüstung. Aufrüstung ist die Erhöhung des militärischen Potenzials eines einzelnen Staates oder eines Militärbündnisses. Dies kann sowohl durch die Modernisierung der Bewaffnung als auch durch eine Vergrößerung der Streitkräfte geschehen und sowohl der Kriegsverhütung durch Abschreckung als auch der Vorbereitung eigener kriegerischer Handlungen dienen (Friedrich-Ebert-Stiftung 2023b).

Die weltweiten Militärausgaben erreichten im Jahr 2022 einen neuen Rekord (Statista GmbH 2023b): 2022 wurden weltweit Ausgaben von rund 2,24 Billionen US-Dollar getätigt (siehe Abbildung 11). Die größten nationalen Militärausgaben hatten in diesem Zeitraum die USA mit 877 Mrd. US-Dollar, gefolgt von China mit 292 und Russland mit 86 Mrd. US-Dollar (Statista GmbH 2023b). Als Reaktion auf den russischen Angriff auf die Ukraine haben vor allem europäische Staaten ihre Militärausgaben erhöht. So wächst der Deutsche Verteidigungsetat 2024 um 1,7 Mrd. auf 51,8 Mrd. Euro und soll gewährleisten, dass Deutschland ab 2024 seinen Zwei-Prozent-Beitrag vom Bruttoinlandsprodukt zu den NATO-Fähigkeits-

zielen erbringt (Bundesministerium der Verteidigung (BMVG) 2023).

*Destabilisierung demokratischer Gesellschaften mittels hybrider Kriegsführung*

Die Art und Weise, wie Kriege geführt werden, hat sich im Laufe der Zeit immer wieder gewandelt und an die jeweiligen Bedingungen, verfügbaren Technologien und Machtverhältnisse angepasst. Der Begriff der „hybriden Kriegsführung“, der seit etwa 2005 verwendet wird, meint die Kombination von militärischen und nichtmilitärischen Konfliktmitteln, die offen oder verdeckt zum Einsatz kommen (Scheffran 2019). Durch die gezielte Kombination politischer, wirtschaftlicher, medialer, geheimdienstlicher, cybertechnischer (siehe Kapitel 2.9) und militärischer Kampfformen soll politische, wirtschaftliche und soziale Instabilität in den Zielstaaten geschaffen oder verstärkt werden (Bundeszentrale für politische Bildung (bpb) 2022a). Es entstehen rechtliche und moralische Grauzonen zwischen Krieg und Frieden, die zu komplexen Konfliktdynamiken führen, alle Bereiche der Gesellschaft umfassen und die zugrunde liegenden Problemmuster verstärken (Scheffran 2019). Ein zentrales Motiv der Kriegsparteien ist, die Zurechnung von (völker-)rechtlich und moralisch unzulässigen Handlungen unmöglich zu machen und den Gegner zu schwächen, ohne sich formal den Krieg zu erklären (Bundeszentrale für politische Bildung (bpb) 2022a).

**Blick in die Zukunft**

Der Ausgang kriegerischer Auseinandersetzungen ist schwer vorhersehbar. Um auf mögliche Resultate vorbereitet zu sein, wurde beispielsweise auch in der Kriegsführung unter anderem die Szenariotechnik etabliert. Im Rahmen einer strategischen Vorausschau werden Szenarien heute in einer Vielzahl von Handlungsfeldern eingesetzt, um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass Zukunft nicht vorhersehbar ist und komplexe, dynamische Wechselwirkungen zu einer Vielzahl alternativer möglicher Zukünfte führen können.

Das Europäische Parlament hat beispielsweise eine Foresight-Studie zu den künftigen Beziehungen zwischen der EU und der Ukraine durchgeführt und vier Szenarien für 2035 entwickelt, die im folgenden Kasten überblicksartig dargestellt sind (Damen 2023). Auch wenn die Szenarien teilweise abschreckend wirken, können sie als Elemente für strategische Überlegungen verschiedener politischer Akteure dienen und auch unabhängig von geopolitischen Konsequenzen Hinweise auf eventuelle Umweltwirkungen ermöglichen.

- ▶ **Szenario 1** Faire Stabilität: Die Ukraine erhält ihr gesamtes Territorium zurück und tritt der EU und der NATO bei, während ein neues kooperatives russisches Regime ein Friedensabkommen unterzeichnet.

- ▶ **Szenario 2** Kalter Krieg II: Keine der beiden Kriegsparteien gewinnt die Oberhand. Es entsteht eine neue bipolare Welt. Die Ukraine wird teilweise in die EU und NATO integriert.
- ▶ **Szenario 3** Eingefrorener Konflikt: Die Front kommt zum Stillstand und die Kriegsparteien handeln Kompromisse aus, was zu ukrainischer Neutralität und einem stagnierenden EU-Beitrittsprozess führt.
- ▶ **Szenario 4** Zerstörtes Europa: Russland eskaliert den Krieg, was zu einer Kriegsbeteiligung der NATO führt. Dies hat eine gestärkte und erweiterte NATO, aber eine uneinige, schwache EU zur Folge.

Mit Blick auf die Auswirkungen auf die Umweltpolitik widmet sich der Emerging Issues-Abschnitt den folgenden Fragen:

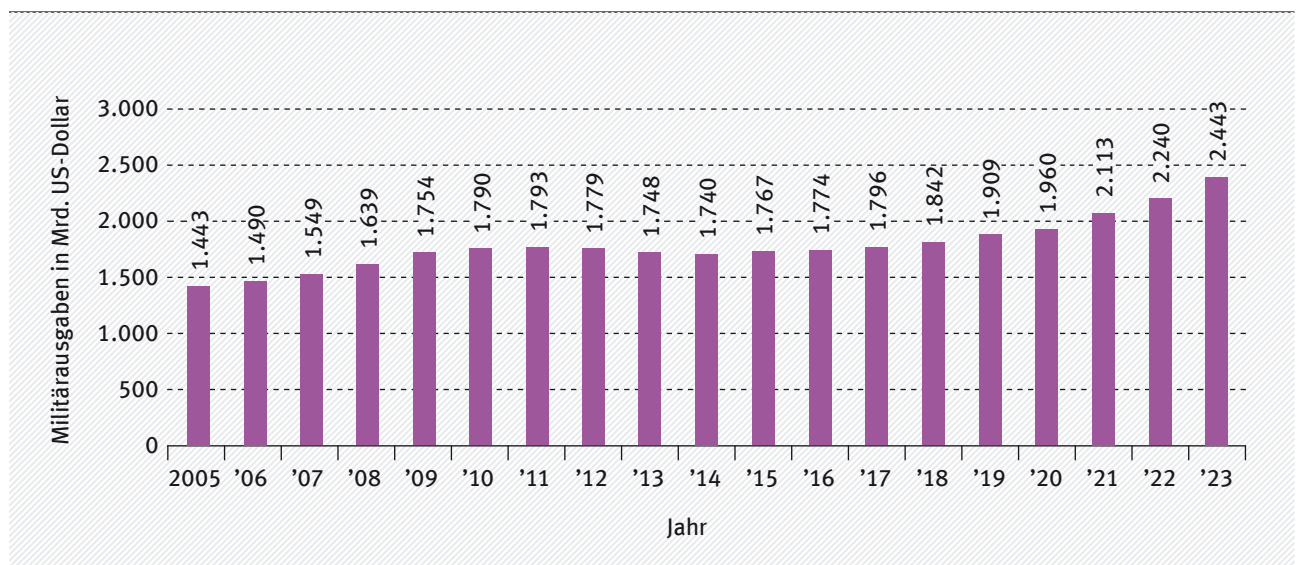
1. Welche Folgen hat Krieg für die Umwelt?
2. Wie wird Umweltzerstörung gezielt als Kriegsstrategie genutzt?
3. Wie lässt sich das Militär nachhaltiger gestalten?

**Emerging Issues**

Seit Jahrtausenden führt die Menschheit Kriege, die neben menschlichem Leid auch erhebliche Umweltschäden verursachen. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass die Umwelt in Kriegszeiten vernachlässigt und ihre Bedeutung militärischen Prioritäten untergeordnet wird (Oberschmidleitner

Abbildung 11

**Höhe der weltweiten Militärausgaben von 2005 bis 2022 (in Mrd. US-Dollar)**



Quelle: eigene Darstellung nach Statista GmbH 2023b; S. 56

2013). Bewaffnete Konflikte nehmen weltweit zu (siehe Hintergrund) und die weitere Entwicklung ist offen. Daher ist es umso wichtiger, sich der Umweltauswirkungen bewusst zu werden: Welche ökologischen Folgen haben Kriege, welche Rolle spielen gezielte Umweltzerstörungen und wäre ein nachhaltiges Militär denkbar?

### 1. Umweltschäden und -folgen von Krieg

Die Umwelt bildet das Schlachtfeld, den physischen Ort, an dem Kriege ausgetragen werden, und ist dadurch zwangsläufig von kriegerischen Aktivitäten betroffen (Repez und Atanasiu 2019). Und auch für den Wiederaufbau werden viele Ressourcen benötigt, wie beispielsweise zum Bau von Wohnhäusern, die durch Raketeneinschläge zerstört worden sind. Die durch Kriege verursachten Umweltschäden werden als unvermeidliche Begleiterscheinung betrachtet, also als Kollateralschaden, dem oft wenig Beachtung geschenkt wird (Lohbeck 2004). Statt sich um Umweltauswirkungen zu kümmern, liegt die höchste Priorität der Kriegsparteien darin, ihre Kriegsziele möglichst effektiv zu erreichen. Der Krieg beansprucht die volle gesellschaftliche und politische Aufmerksamkeit, während die Umwelt auf sekundärer Ebene steht (Schiefer 2022). Angesichts der Dringlichkeit der Klima- und Biodiversitätskrise ist es jedoch wichtig, die Umweltfolgen von Kriegen stärker zu berücksichtigen und die Relevanz des Klima- und Umweltschutz selbst in Konfliktsituationen nicht aus dem Blick zu verlieren. Denn die Auswirkungen von Kriegen dauern oft weit über die Dauer des Konflikts an und haben Einfluss über die Grenzen nationaler Hoheitsgebiete hinaus, beispielsweise wenn nach Raketeneinschlägen eine große Anzahl an Wohnungen neu gebaut werden muss (Reuß und Schäfer 2012).

Neuere Praktiken moderner Kriegsführungen bringen außerdem bisher nicht dagewesene Belastungen mit sich. Zwar sind militärische Anwendungen oft Innovationstreiber, allerdings ist mit deren Produktion und Betrieb auch häufig ein sehr hoher Verbrauch an Energie und Ressourcen verbunden. Die Verwendung beispielsweise von Künstlicher Intelligenz im Militär nimmt im Russisch-Ukrainischen Krieg zu, da sie zur Modellierung von Schlachtfeldern und Identifizierung feindlicher Objekte eingesetzt wird (Kreye et al. o.J.). Forschungsprojekte untersuchen die Integration

von KI in militärische Angelegenheiten, darunter unbemannte Wasserfahrzeuge (U.S. Department of Defense 2023), intelligente Drohnen und autonome Waffensysteme (Riedel 2022). Hochenergielaserwaffen könnten ebenfalls verstärkt eingesetzt werden. Beispielsweise hat die Bundeswehr 2022 erstmals eine Drohne mit einer Laserwaffe vom Himmel geschossen (Aviation Media & IT GmbH 2022) und Russland behauptet, Laserwaffen im Russisch-Ukrainischen Krieg bereits einzusetzen (Ghaedi 2022). Sowohl Hochenergielaser – zur Erzeugung des Laserstrahls (Bohnenstengel 2021) – als auch KI haben einen hohen Energieverbrauch (Muller und King 2023), wobei etwa das Training eines komplexen neuronalen Netzwerks für ein NLP-KI-Modell<sup>27</sup> laut einer Studie der University of Massachusetts Amherst fünfmal mehr CO<sub>2</sub> emittiert als ein Auto in seinem gesamten Lebenszyklus (Strubell et al. 2019). Zudem besteht die Gefahr, dass eine effizientere Ausgestaltung von beispielsweise KI-gesteuerten Drohnen zu vermehrter Produktion und Nutzung führt, was wiederum die Treibhausgasemissionen erhöhen könnte (Just und Damm 2021). Je nachdem, wie sich die hybride Kriegsführung künftig weiterentwickelt, könnten die Umweltauswirkungen der Kriegsführung daher weiter ansteigen.

Umweltauswirkungen infolge von Kriegen werden hinsichtlich zwei verschiedener zeitlicher Stadien betrachtet: kurzfristig, also während der Kriegshandlungen, und mittelbar, also zu einem späteren Zeitpunkt als Folge der Kriegshandlungen.

Bereits die akute Kriegsführung hat erhebliche Auswirkungen. Militärfahrzeuge wie Panzer oder Kampfhubschrauber verursachen große Mengen an CO<sub>2</sub>-Emissionen, schädigen durch ihr Gewicht Böden und Infrastrukturen und stören die Tier- und Pflanzenwelt mit Lärm (Scheffran 2020). Hochfrequenzsignale von Schiffen oder U-Booten können beispielsweise das Innenohr von Delfinen und Walen schädigen (Tsiptsiura 2022). Neben diesen Umweltbelastungen durch die akute physische Kriegsführung hat der Einsatz moderner Militärtechnologien ebenfalls Konsequenzen.

Als unmittelbare Konsequenz hinterlassen Kriege Zerstörung in der Fläche – an Gebäuden, Infrastruktur und Natur – und Kriegsabfälle, die langanhaltende Auswirkungen auf die Umwelt haben. Schadstoff-

<sup>27</sup> Natural language processing (dt. natürliche Sprachverarbeitung) bezeichnet die Art von KI-Anwendung, der z. B. ChatGPT angehört.

fe aus Bomben oder Munitionen, die beispielsweise Uran enthalten, verunreinigen Böden und gelangen ins Grundwasser (Auernheimer 2022). Zudem setzt die Zerstörung von Gebäuden und Infrastruktur gegebenenfalls darin enthaltene Schadstoffe frei – so sind etwa viele im Ukraine-Krieg zerstörte Häuser mit Asbest belastet (Nielsen und Hodgkin 2022). Es ist nicht nur im Fall von Kriegsmaterial, sondern auch im Fall von weiteren Abfällen schwierig, diese im Kriegsgeschehen zu deponieren. Zusätzlich führen Bomben- oder Raketeneinschläge zu Bränden und emittieren Treibhausgase (Tsiptsira 2022). Daneben gibt es große Kriegsfluchtbewegungen, die Treibstoff verbrauchen und durch entstehende Geflüchtetenlager die umliegenden Ökosysteme belasten (Scheffran 2020). Kriege bedingen Armut und zwingen Menschen, rücksichtslos mit natürlichen Ressourcen umzugehen, etwa für Feuerholz, und können so die Umgebung von Geflüchtetenlagern in Ödland verwandeln (Welzer 2010). Zudem kann der wirtschaftliche Druck durch die kostenintensive Kriegsführung Konfliktparteien zu einem nicht nachhaltigen, rein profitgesteuerten Abbau vorhandener Ressourcen animieren, der die Umwelt in Konfliktgebieten weiter belastet und es zudem Drittparteien ermöglicht, vom Kriegsgeschehen wirtschaftlich zu profitieren (Le Billon 2001).

Auch nach Kriegen bleibt die Umwelt als mittelbare Folge weiterhin belastet. Dies resultiert einerseits daraus, dass die Staaten nach dem Krieg ihre Aufmerksamkeit auf die Lösung von gesellschaftlichen Kriegsfolgeproblemen wie Armut und Sicherung der Grundbedürfnisse der Bevölkerung richten, wodurch nur begrenzte Mittel für eine nachhaltige Klima- und Umweltpolitik zur Verfügung stehen (Schiefer 2022). Andererseits entstehen weitere Belastungen durch den notwendigen Wiederaufbau, da Kriege Wohnungen, Straßen, Brücken, Bahnstationen, Flughäfen und mehr zerstören, wobei die Zementproduktion besonders emissionsintensiv ist (Martin Auer 2020). In der Ukraine wurden in den ersten 18 Kriegsmonaten bis September 2023 etwa 150 Mio. t CO<sub>2</sub> durch den Krieg emittiert – dies entspricht in etwa den jährlichen Emissionen eines Landes wie Belgien. Mit 36 % bildet der Wiederaufbau von Gebäuden und Infrastruktur dabei den größten Posten (Klerk et al. 2023).

Gleichzeitig bietet sich die Chance für einen grünen, nachhaltigen Wiederaufbau, unter anderem durch verstärkte Investitionen in moderne Technologien. Für die Ukraine werden bereits Konzepte für ein nachhaltiges Wiederaufbauprogramm erstellt, etwa durch das Umweltbundesamt (Hermann und Rosenbaum 2022) oder die vom BMUV geförderte Initiative Low Carbon Ukraine (Saha et al. 2022). 2024 wurde in Berlin durch das UN-Umweltprogramm (UNEP), die UN-Wirtschaftskommission für Europa (UNECE) und die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) im Rahmen der Ukraine Recovery Conference die „Platform for Action on the Green Recovery of Ukraine“ vorgestellt, die internationale Bemühungen für einen umweltverträglichen, nachhaltigen Wiederaufbau koordinieren soll (United Nations Environment Programme (UNEP) 2024). Angesichts der genannten Hürden für nachhaltiges Handeln in Kriegszeiten ist umso mehr hervorzuheben, dass die Ukraine seit Kriegsbeginn weiterhin Umweltthemen aktiv verfolgt und etwa das Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2023 zwar leicht angepasst,<sup>28</sup> aber grundsätzlich beibehalten wurde (Pragma Consulting Group 2023).

## 2. Umweltzerstörung als Kriegsstrategie

Während das Hauptziel von Kriegen darin besteht, den Gegner zu besiegen, zielt die Umweltzerstörung als eine Kriegsstrategie darauf ab, den Feind zu schwächen, indem seine ökologischen Unterstützungssysteme angegriffen werden. Kriegsstrategien umfassen beispielsweise den Einsatz umweltverändernder Techniken oder die gezielte Zerstörung kritischer Infrastrukturen. Ziel ist es, die dadurch freigesetzten Umweltkräfte als Waffe einzusetzen, um dem Gegner zu schaden und sogenannte verbrannte Erde zurückzulassen (Lohbeck 2004). Die Manipulation der Umwelt für militärische Zwecke reicht bis in die Antike zurück, beispielsweise durch das Vergiften von Gewässern (Reuß und Schäfer 2012). Heutzutage untersagen verschiedene Abkommen die Verursachung von Umweltschäden in Kriegszeiten. Allerdings ist die Ahndung unter anderem wegen sehr hoher rechtlicher Hürden für eine Anklage schwierig. Beispielsweise ist es selbst bei einem Katastrophenzustand wie einem atomaren GAU unmöglich vorherzusagen, welche Art von Umweltschäden der Internationale Strafgerichtshof als ausreichend verheerend

<sup>28</sup> So müssen nach der Gesetzesänderung direkte Reparaturen von durch Kriegshandlungen verursachten Zerstörungen keine Umweltverträglichkeitsprüfung durchlaufen (Pragma Consulting Group 2023).

betrachten würde; zusätzlich ist z. B. unklar, wie ein Haftbefehl gegen beispielsweise russische Befehlshaber überhaupt durchsetzbar wäre (Wilson 2023). Dennoch werden gezielte Umweltzerstörungen aus strategischen Gründen bis heute eingesetzt, so auch zu sehen im Krieg in der Ukraine. Der Umstand, dass in der Ukraine erstmals seit langer Zeit Krieg in einem stark industrialisierten Land geführt wird, birgt erhebliche Gefahren für die Gesellschaften in Europa und darüber hinaus (Hohmann und Hugo 2023). Moderne Kriegsführung und fortschrittliche Waffentechnologien haben eine besonders zerstörerische Kraft, zudem gibt es mehr Angriffspunkte für gezielte Zerstörungen von Anlagen mit verheerenden Auswirkungen auf die Umwelt, wie Gaspipelines und Atomkraftwerke, die so in der Vergangenheit nicht existierten.

Der Einsatz umweltverändernder Technologien, wie Bio- und Chemiewaffen, kann schwerwiegende Umweltauswirkungen haben. Ein bezeichnendes Beispiel ist der Vietnamkrieg, in dem als erster moderner Konflikt gezielte Umweltzerstörung als Kriegstaktik eingesetzt wurde (Oberschmidleitner 2013). Die USA versprühten etwa 45 Mio. l des Herbizids Agent Orange, um den Regenwald zu entlauben, den vietnamesischen Soldaten die Deckung zu nehmen und die Sicht im Gelände zu verbessern (Repez und Atanasiu 2019). Auch andere Herbizide wie Agent Blue wurden verwendet, um landwirtschaftliche Flächen zu zerstören (Rüffer 2022). Diese Herbizide kontaminierten Bö-

den und Gewässer, mit langfristigen Auswirkungen auf die Natur und die Bevölkerung (Scheffran 2020). Nach den verheerenden Umweltfolgen des Vietnamkriegs wurde der Einsatz umweltverändernder Techniken 1977 durch die ENMOD-Konvention verboten (Reuß und Schäfer 2012). Zudem sind seit 1975 die Biowaffen- und seit 1997 die Chemiewaffenkonvention in Kraft (Bundeszentrale für politische Bildung (bpb) 2015).

Auch durch Angriffe auf kritische Infrastrukturen versuchen Konfliktparteien gezielt, Umweltauswirkungen zu erzeugen. Dabei gibt es viele Varianten. Im zweiten Golfkrieg wurden beispielsweise von irakischen Truppen Ölquellen in Kuwait angezündet, um Ressourcen zu vernichten. Dies führte zur Verschmutzung von Luft, Erde und Gewässern, und sogar Nichtkriegsparteien wie die Türkei, Iran oder Oman hatten anschließend mit „schwarzem Regen“ zu kämpfen, weil Ruß infolge des Brandes mit Regen heruntersank. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen machten damals 2 bis 3 % der globalen Emissionen aus fossilen Brennstoffen aus (Auernheimer 2022). Auch heutzutage steht die kritische Infrastruktur der Ukraine unter wiederholtem russischem Beschuss, insbesondere Stromkraftwerke, Ölraffinerien und Schwerindustriestandorte. Durch diese Angriffe können hochgiftige Stoffe in Böden, Grundwasser und Luft gelangen (Hohmann und Hugo 2023). Die Bombardierung des Kachowka-Staudamms soll beispielsweise dazu geführt haben, dass etwa 150 t Motorenöl in den Fluss Dnipro gelangten (Zeit Online 2023). Die mitgespülten Waffen und Munition können aufgrund der enthaltenen Schwermetalle und energiereichen Materialien Boden und Wasser verschmutzen. Der Wasserstand des Kachowka-Stausees ist außerdem für das Kühlwasser der Reaktoren des AKW Saporischschja wichtig, unabhängig davon ist ein AKW in einem Kriegsgebiet als potenzielles Angriffsziel ein besonderes Risiko. Die Unterschreitung eines kritischen Wasserstands macht die Lage unsicher und potenziell gefährlich (tageschau.de 2023a), da bei einer Kernschmelze radioaktive Strahlung freigesetzt würde.

Auch der gezielte Angriff auf die Gaspipelines Nord Stream 1 und 2 im Rahmen des Russisch-Ukrainischen Kriegs hatte enorme Umweltschäden zur Folge. Mit Emissionen von ca. 14,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten stellte diese Sabotage bis Oktober 2022 das größte Einzelelement der Emissionen des Krieges in der Ukraine dar (Michaelowa 2023).



Neben der konventionellen Kriegsführung wird auch die zunehmende Cyberkriegsführung genutzt, um kritische Infrastrukturen anzugreifen und die Umwelt zu schädigen. Die Stromversorgung der Ukraine (Kolvenbach 2022) und Kernkraftwerke waren bereits Gegenstand von Cyberangriffen. 2010 wurde beispielsweise die Kontrollsoftware eines Kernkraftwerks im Iran gehackt, um die Rotationsfrequenz von Uran-Zentrifugen zu steuern, also industrielle Steuerungsanlagen zu beeinflussen (Muth 2020). Solche Angriffe auf die Energieversorgung könnten zu einem Stromausfall führen, was etwa bei Kernkraftwerken fatale Folgen für die Umwelt hätte. Neben den negativen Umweltfolgen infolge eines erfolgreichen Cyberangriffs hat die Cyberkriegsführung noch weitere negative Auswirkungen. Denn nicht nur der Cyberangriff selbst verbraucht Energie, sondern auch die von Staaten und Unternehmen zur Abwehr von Cyberattacken eingesetzte Infrastruktur – Rechenzentren, Hardware, Software – hat einen erheblichen Energieverbrauch (Schmid 2022).

### 3. Nachhaltiges Militär

Militär und Rüstungsindustrie verursachen weltweit etwa 5,5 % der Treibhausgas-Emissionen und haben einen hohen Ressourcenverbrauch – wären die Streitkräfte der Welt ein eigenes Land, hätten sie global den viertgrößten CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, größer als jener Russlands (Parkinson und Cottrell 2022). Der Klimawandel wird immer präsenter, und dennoch wird weltweit aufgerüstet. Sollten die NATO-Mitgliedsstaaten für die Jahre 2024 bis 2028 die Bündnisziele erreichen und halten, 2 % des BIP für Militärausgaben auszugeben und hiervon 20 % in neue Ausrüstung zu investieren, würde sich der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der NATO-Streitkräfte im Vergleich zu 2021 um 50 % erhöhen – auf 196 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente (Lin et al. 2023), was etwa die gesamten Treibhausgasemissionen der Niederlande für das Jahr 2023 erheblich übertreffen würde (150,75 t; European Commission 2024).

Im Fokus des deutschen Verteidigungsministeriums steht eine leistungsfähige Bundeswehr, für die das 2022 bereitgestellte Sondervermögen für die Bundeswehr für eingesetzt werden soll (Bundesregierung 2022), also das Staatsziel der Sicherheit. Doch während früher der Verteidigungssektor in der Klimapolitik kaum eine Rolle spielte – so wurde zum Beispiel im Kyoto-Protokoll von 1997 das Militär von den Emissionszielen und der Emissionsberichtspflicht noch explizit ausgenommen (Peil 2021) –, hat unter

anderem der Russisch-Ukrainische Krieg die Bedeutung des Sektors in der Klimapolitik gestärkt (Michaelowa 2023). Es wird immer deutlicher, dass negative Abhängigkeiten überwunden werden müssen, um strategische Autonomie sicherzustellen, wozu Umweltfreundlichkeit einen Beitrag leisten kann (Bosch und Vinke 2022): Die verstärkte Integration erneuerbarer Energien in das Militär kann beispielsweise die Unabhängigkeit von Energielieferungen auch im militärischen Kontext gewährleisten, zumal die Verfügbarkeit fossiler Rohstoffe weiter abnehmen wird. „Grüne“ Militärstrategien und ein „nachhaltiges“ Militär gewinnen daher an Bedeutung. Die NATO verabschiedete beispielsweise 2021 einen Aktionsplan zur Verknüpfung von Sicherheitspolitik und Klimakrise (North Atlantic Treaty Organization (NATO) 2021), ein verbindliches Regelwerk fehlt allerdings nach wie vor (Michaelowa 2023).

Wie aus dem Nachhaltigkeitsbericht des Bundesverteidigungsministeriums hervorgeht, stieß die deutsche Bundeswehr 2021 insgesamt 1,71 Mio. t CO<sub>2</sub> aus – Auslandseinsätze sind unberücksichtigt (Bundesministerium der Verteidigung (BMVG) 2022) –, vergleichbar mit der CO<sub>2</sub>-Emissionsbilanz von Malta (Urmersbach 2023). Von den Emissionen entfallen 54 % auf Liegenschaften und 46 % auf Mobilität (Bundesministerium der Verteidigung (BMVG) 2022). Hauptursachen der Emissionen sind zum einen der Treibstoffverbrauch von Panzern, Luftfahrzeugen und Schiffen. Ein Eurofighter erzeugt zum Beispiel in nur einer Flugstunde 11 t CO<sub>2</sub> (Auernheimer 2022), äquivalent zum jährlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoß einer durchschnittlichen deutschen Bürger\*in (Statista GmbH 2024b). Zum anderen sind der Strom- und Wärmeverbrauch in den Liegenschaften Haupttreiber der Emissionen.

Bestrebungen für ein nachhaltiges Militär zielen auf eine Emissionsreduktion der Inlands- und Einsatzliegenschaften durch innovative Technologien ab. Dazu gehören der verstärkte Einsatz erneuerbarer Energien wie Solarthermie, Photovoltaik und Windkraft, die Defossilisierung der Energieversorgung im Inland, der Ersatz fossiler Heizsysteme durch beispielsweise Wärmepumpen und die Sanierung sowie der energieeffiziente Bau von Militärbauwerken. In Einsatzliegenschaften, welche meistens in wärmeren Regionen liegen, wird angestrebt, den für Klimaanlagen nötigen Verbrauch fossiler Kraftstoffe durch solarthermische Kälteerzeugung zu reduzieren (Bundesministerium

der Verteidigung (BMVG) 2022). So könnte zukünftig eine Netto-Klimaneutralität der Liegenschaften erreicht werden.

Die Reduzierung der fossilen Treibhausgas-Emissionen in der Militärmobilität gestaltet sich schwieriger. Ideen zur Verwendung von synthetischen Kraftstoffen, hergestellt aus nachhaltigem Strom, Wasser oder CO<sub>2</sub> aus der Luft, existieren (Bundesministerium der Verteidigung (BMVG) 2022). Allerdings erfordern militärische Fahrzeuge leistungsstarke Antriebe und Energieträger mit hoher Energiedichte (Bundesministerium der Verteidigung (BMVG) 2022), für die bisher keine umweltfreundlichen Lösungen im industriellen Maßstab verfügbar sind (Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages 2020). Eine direkte Übertragung ziviler Energie- und Mobilitätskonzepte auf das Militär ist nicht möglich (Bundesministerium der Verteidigung (BMVG) 2022). Daher ist vorläufig ein Mix aus synthetischem und fossilem Treibstoff geplant (Weinzierl et al. 2021). Dennoch wird an synthetischen Kraftstoffen geforscht (Bundesministerium der Verteidigung (BMVG) 2022), sodass in der Zukunft ein Eurofighter nur mit CO<sub>2</sub>-neutralem synthetischen Kerosin fliegen könnte. Ein Vorteil dabei wäre, dass Fahrzeuge nicht ausgetauscht oder aufwendig umgerüstet werden müssen, da die Nutzung in herkömmlichen Motoren erfolgt (Weinzierl et al. 2021). Eine wichtige Rolle bei der Ausrichtung des Militärs auf Nachhaltigkeit spielen außerdem Wasserstoff und Wasserstoffbrennstoffzellen (Struck 2023). Das U-Boot der Klasse 212A der deutschen Bundeswehr nutzt bereits Wasserstoffbrennstoffzellen in Kombination mit Dieselgeneratoren (Bundeswehr o.J.). Auch unbemannte Luftfahrzeuge zeigen Potenzial für Brennstoffzellenanwendungen (Struck 2023). Allerdings hat reiner Wasserstoff eine geringe Energiedichte, was bei schweren Fahrzeugen zu großen Tankvolumina im Verhältnis zum verfügbaren Platz führen würde (Struck 2023). Daher wäre bei schweren Fahrzeugen eine Umstellung auf synthetische Kraftstoffe und bei leichteren Fahrzeugen die Verwendung von Wasserstoffantrieben sinnvoll (Struck 2023). Auch wenn der Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtbruttostrombedarf im ersten Halbjahr 2023 bei 52 % lag, benötigen synthetische Kraftstoffe (Rudolph 2019) und die Erzeugung von Wasserstoff wegen der Elektrolyse weiter erhebliche Mengen an erneuerbaren Energien (Bundesregierung 2023b).

Auch elektrische Antriebe würden den Verbrauch fossiler Brennstoffe und Abgasemissionen minimieren. Das deutsche Unternehmen FFG (Flensburger Fahrzeugbau GmbH) hat den Hybrid-Panzer „Genesis“ entwickelt, der im rein elektrischen Antrieb eine Reichweite von 150 km bei 40 km/h und im dieselektrischen Antrieb eine Reichweite von 600 km bei 60 km/h bietet (FFG Flensburger Fahrzeugbau GmbH). Für militärische Zwecke würde der Einsatz von vollständig batteriebetriebenen Panzern oder Elektrojets noch zahlreiche Innovationen erfordern, denn die Reichweite ist entscheidend. Auch Fragen der Ladeinfrastruktur würden in Kriegsgebieten verstärkt bestehen. Vorläufig sind nur Hybridfahrzeuge absehbar (Struck 2023). Es ist wichtig zu beachten, dass die Batterien, die für elektrische und hybride Antriebe benötigt werden, endliche Ressourcen wie Lithium verbrauchen (Mrozik et al. 2021). Da bei schweren Elektrofahrzeugen wie Panzern große Batterien erforderlich sind, ist gerade hier ein nachhaltiger Abbau und Recycling entscheidend für eine positive Bilanz in der Elektromobilität (Europäische Kommission (EK) 2020b).

### Fazit für Umweltpolitik und -forschung

Kriege und Militäreinsätze haben grundsätzlich neben den verheerenden Auswirkungen für betroffene Menschen ebenso schwere Umweltschäden sowohl während der Kriegshandlungen als auch danach zur Folge. Und unabhängig davon, ob künftig die Anzahl von Kriegen und Konflikten ansteigt, ist von einer weiteren Technisierung und entsprechenden Ressourcenbedarfen des Militärs auszugehen.

Gegenwärtig lässt sich noch nicht sicher absehen, wie sich das weltweite Konfliktgefüge weiterentwickeln wird und welche spezifischen Umweltauswirkungen insbesondere die neue hybride Kriegsführung mit sich bringt. Dennoch lässt sich feststellen, dass die Umwelt in bewaffneten Konflikten als „stilles Opfer“ geschädigt wird und ihr Schutz von elementarer Bedeutung ist.

Die Umweltpolitik kann Umweltschutz vor, während und nach bewaffneten Konflikten fördern und dabei verschiedene Ansatzpunkte nutzen. Eine Möglichkeit zur Intensivierung des Umweltschutzes während bewaffneter Konflikte und in deren Folge könnte ein bereits zu Friedenszeiten entwickeltes verbindliches, effektives Regelwerk zum Schutz der natürlichen Umwelt im Zuge militärischer Aktionen sein. Hier gilt es



auch, Regelungslücken zu schließen und Erfahrungen sowie Best Practices auszutauschen – beispielsweise zum Umgang mit Kriegsabfällen, Regelungen für den Wiederaufbau unter Berücksichtigung von Belangen von Ressourcen und Konsequenzen für Flora und Fauna. Im Kriegsfall könnten auch schärfere Sanktionen bei Verstößen und die konsequente Ahndung derselben eine Maßnahme sein. Weitere unterstützende Maßnahmen wären die Einführung und Umsetzung ambitionierter Umweltstandards bei der Beschaffung militärischer Ausrüstung sowie dem Betrieb von Liegenschaften und die Prüfung von Umweltwirkungen, insbesondere im Zusammenhang mit militärischen Übungen. Bisher obliegt es beispielsweise dem Bundesverteidigungsministerium, über die Anwendung des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung für Vorhaben, die nur dem Zweck der Verteidigung dienen, zu entscheiden.

Investitionen in Forschungsprojekte zur Entwicklung innovativer Technologien im militärischen Bereich spielen ebenfalls eine wichtige Rolle, um Emissionsreduktion und eine nachhaltige Transformation des Militärs selber voranzutreiben. Zudem könnten beispielsweise Studien, die die Umweltauswirkungen bewaffneter Konflikte untersuchen und hervorheben, gefördert und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden, um gegenwärtige und zukünftige Generationen für die Umweltrisiken bewaffneter Konflikte zu sensibilisieren. So wird auch ein Beitrag dazu geleistet, langfristige Strategien für eine, sofern möglich, die Umwelt und Menschen sowie Infrastruktur schonendere Kriegsführung zu entwickeln. Die Unterstüt-

zung von Nichtregierungsorganisationen (NGO) und zivilgesellschaftlichen Organisationen, die sich für den Umweltschutz in Konfliktgebieten engagieren, kann eine weitere unterstützende Maßnahme zur Minimierung der Umweltwirkungen von Kriegen sein.

In Kriegssituationen verlagert sich die politische Aufmerksamkeit auf die Sicherheitspolitik – zulasten der Umweltpolitik. Dies schlägt sich auch in der Verteilung von Haushaltsmitteln nieder: 2023 gaben etwa die NATO-Mitgliedsstaaten 1,26 Bio. US-Dollar für ihre Streitkräfte aus – eine Summe, mit der zwölf Jahre lang Klimafinanzierungen für ärmere Länder hätten bezahlt werden können; und sollten alle NATO-Mitgliedsstaaten für die nächsten fünf Jahre ihr Ausgabenziel von 2 % des BIP erreichen, wären die resultierenden 2,57 Bio. US-Dollar ausreichend, um Klimaanpassungskosten sämtlicher Länder mit niedrigen und mittleren Einkommen für die kommenden sieben Jahre zu decken (Lin et al. 2023). Auch auf nationaler Ebene treten in einem begrenzten Bundeshaushalt Ausgaben für Sicherheit und Militär zwangsläufig in Konkurrenz mit dringend notwendigen Investitionen in den Klima- und Umweltschutz. Vor diesem Hintergrund muss die Klima- und Umweltpolitik widerstandsfähig gegenüber äußeren Einflüssen und Krisen gestaltet werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass während bewaffneter Konflikte Umweltbelange, die auch direkt das Lebensumfeld vieler Menschen beeinflussen, nicht von der Agenda verdrängt werden und die Umsetzung einer nachhaltigen Transformation nicht insgesamt verlangsamt wird.



## 2.6 Die Krisengesellschaft

**Trend:** „Krisenmodus“ wurde 2023 von der Gesellschaft für deutsche Sprache (GfdS) zum Wort des Jahres gekürt. Zwar gab es Krisen schon immer, aber derzeit häufen sie sich scheinbar besonders stark. Die Covid-19-Pandemie wirkt noch nach, in der Ukraine herrscht Krieg und die Klimakrise wird mit jedem Jahr dringlicher. Gleichzeitig kommen neue bedrohliche Entwicklungen hinzu – Nahostkrieg, Inflation, schleppende Wirtschaft, Rechtsruck. Der Ausnahmezustand ist zur Normalität geworden. Was macht also eine Krisengesellschaft aus? Worin liegen die Gründe für anhaltenden Dauerstress? Welche Bewältigungsstrategien hat die deutsche Bevölkerung entwickelt und wie sollte die Bundesregierung darauf reagieren?

### Emerging Issues

- ▶ Realitätsflucht: Krisenresignation und Krisenverdrängung
- ▶ Forderung der Krisenbekämpfung: Zunahme und Intensivierung der Proteste
- ▶ Gefangen in der Krisenstimmung: die gestresste Arbeitsgesellschaft

### In Kürze

- ▶ Deutschland befindet sich derzeit in einer Phase der Polykrise, in der verschiedene Krisen parallel auftreten. Für die vergangenen zehn Jahre lässt sich eine zunehmende Verbreitung von Stress, Erschöpfung und stressbedingten Erkrankungen beobachten. Viele Menschen fühlen sich unsicher, haben große Sorgen, sind wütend oder hilflos. Jedoch wirken die Krisen nicht auf alle Menschen gleich.

Die Belastungen variieren je nach Persönlichkeit und Lebenssituation. Zudem sind bestimmte Bevölkerungsgruppen krisenspezifisch und aufgrund struktureller Bedingungen stärker herausgefordert als andere, die wiederum objektiv weniger fordernde Umstände deutlicher als bedrohlich wahrnehmen. Ein Blick in die Zukunft deutet darauf hin, dass mittel- und langfristig ökologische Faktoren eine zunehmende Quelle neuer Stressoren darstellen werden. Die sich verändernde Umweltsituation könnte somit zusätzliche Belastungen für die Menschen in Deutschland bedeuten.

- ▶ Die Polykrise – und die Reaktion darauf – belasten unsere Gesellschaft zunehmend und gefährden die Transformation zur Nachhaltigkeit. Die Reaktionen auf die Polykrise – Flucht vor der Realität, zunehmende Protestaktivitäten und steigender Stress in der Arbeitswelt – unterstreichen die Notwendigkeit einer umfassenden und anpassungsfähigen Umweltpolitik. Die Umweltpolitik muss hier ansetzen, indem sie einerseits Ängste in Zuversicht umwandelt und Vertrauen aufbaut und andererseits für die besonders engagierten Bürger\*innen Einflussmöglichkeiten schafft und mit Protestbewegungen interagiert. Gleichzeitig gilt es, resiliente Arbeitsmodelle voranzutreiben, die parallel Produktivität und Wohlbefinden steigern.

## Hintergrund

Der Begriff Krise beschreibt eine kritische oder entscheidende Phase in einem Prozess oder einer Situation, die mit Unsicherheit, Gefahr oder Schwierigkeiten verbunden ist. Sie kann verschiedene Bereiche des Lebens oder der Gesellschaft betreffen, einschließlich persönlicher, wirtschaftlicher, politischer oder sozialer Aspekte. Krisen sind Höhe- oder Wendepunkt andauernder Störungen, die ein „Weiter so“ nicht mehr zulassen. Sie fordern das Hinterfragen etablierter Routinen, damit das Tal anhaltender Störungen und Probleme überwunden werden und eine Phase positiver Entwicklung folgen kann (Steg 2020; Schubert und Klein 2021).

Krisen können unterschiedliche Hintergründe und Ursachen haben: Sie können sehr plötzlich durch Ereignisse wie beispielsweise den Todesfall einer nahestehenden Person oder Naturkatastrophen ausgelöst werden. Ebenso können sie sich langsam anbahnen und über Jahre aufbauen, etwa durch eine ungesunde Lebensweise, die Vernachlässigung von Beziehungen, Fehlinvestitionen oder Raubbau an der Umwelt. Krisen sind in aller Regel unangenehm und kein erstrebenswerter Zustand. Gleichzeitig weist die Forschung darauf hin, dass die Konfrontation mit Krisen einen wichtigen Bestandteil des persönlichen und sozialen Wachstums darstellt, wenn sie bewältigt werden. Die Erfahrung, herausfordernde Situationen meistern zu können, stärkt das Selbstvertrauen und die Fähigkeit, zukünftig mit Störungen besser umgehen zu können (Bengel und Lyssenko 2012; Krol 2024).

Ebenso bieten Krisen die Chance auf eine Neuausrichtung, die sich mittel- und langfristig positiv auswirkt. Festgefahrene Strukturen und Handlungsmuster können gelöst und zukunftsfähig etabliert werden. So haben beispielsweise Reformen, die als Konsequenz der Finanzkrise 2008/2009 umgesetzt wurden, das internationale Finanzsystem nachhaltig stabilisiert (Bundesfinanzministerium (BMF) 2019). Die Binsenweisheit „In jeder Krise steckt auch eine Chance“ hat entsprechend durchaus ihre Berechtigung. Es ist allerdings wichtig, dass die Intensität der Krise Betroffene nicht auf Dauer überlastet, hoffnungslos und mit einem tiefen Ohnmachtsgefühl zurücklässt.

Gegenwärtig ist Deutschland mit vielfältigen Krisen parallel konfrontiert. Gesprochen wird von einer andauernden Zeit der Polykrise (Homer-Dixon et al. 2022). Damit sind nicht nur die Folgen der Covid-19-Krise seit Anfang 2020 gemeint, sondern auch die Auswirkungen des russischen Angriffskrieges auf die Ukraine seit Februar 2022, der Nahostkonflikt, der Anfang Oktober 2023 eine neue Eskalationsstufe erreicht hat, und darüber hinaus die bereits länger andauernden und tiefer greifenden ökologischen Krisen wie Klimawandel, Biodiversitätsverlust, Umweltverschmutzung<sup>29</sup> und zunehmende Wasserknappheit (siehe Kapitel 2.2).

Mit den multiplen Krisen einher gehen Folgen, die ihrerseits als Krisen wahrgenommen werden können, beispielsweise die Energiepreisentwicklung, die Inflation oder die Migration nach Europa bzw. Deutschland sowie die steigende Zustimmung zum Rechtspopulismus oder der Vertrauensverlust in demokratische Institutionen (siehe Kapitel 2.4). Hinzu kommt, dass die zeitliche Überlagerung zahlreicher Krisen sowie deren unklare Dauer zu einer Form von Krisenpermanenz führen, in der Krise als ein Dauer- bzw. fast schon Normalzustand empfunden werden kann. Dies kann zu anhaltendem Stress sowie psychischen Gesundheitsproblemen führen.

### Deutschland – dauerhaft psychisch belastet

Für die vergangenen zehn Jahre lässt sich in Deutschland eine zunehmende Verbreitung von Stress, Erschöpfung sowie stressbedingten Erkrankungen beobachten. So gaben 26 % der Teilnehmenden einer repräsentativen Umfrage im Jahr 2021 an, dass sie häufig Stress empfinden. Das ist ein Anstieg um 6 Prozentpunkte im Vergleich zum Jahr 2013 (Voermans et al. 2021; S. 8 f.). Eine repräsentative Studie aus dem Jahr 2023 kommt sogar zu dem Ergebnis, dass rund 45 % der 14- bis 49-Jährigen in Deutschland unter Stress und etwa 36 % unter Erschöpfung leiden (Schnetzer 2023).

Stress beschreibt eine, durch innere wie äußere Reize (sogenannte Stressoren) verursachte, starke Beanspruchung eines Organismus. Die Verarbeitung dieser Reize muss eine Anpassungsreaktion im Organismus erzeugen. Der Körper wird in Alarmbereitschaft versetzt und reagiert mit der Ausschüttung von Hormo-

<sup>29</sup> Auch „Dreifachkrise“ genannt.



nen wie Adrenalin und Kortisol, die kurzfristig für zusätzliche Energie und Leistungsfähigkeit sorgen. Für die langfristige Gesundheit ist allerdings wichtig, dass auf Phasen stressbedingter Anspannung regelmäßige Phasen der Entspannung und Erholung folgen (ERGO o. J.; Voermans et al. 2021; S 5 ff.). Andernfalls kann langanhaltender Stress zu psychischen Erkrankungen wie Depressionen oder Burn-out führen und auch die psychische Gesundheit belasten. Dauerstress mindert das Konzentrationsvermögen und erhöht das Risiko von Herzinfarkt und Diabetes (GEO Wissen 2022).

Psychische Erkrankungen gehören mittlerweile zu den dritthäufigsten Gründen für Krankschreibungen im Beruf (Hildebrandt et al. 2023; S. 18). Die Anzahl an gemeldeten Ausfalltagen (AU-Tage)<sup>30</sup> ist seit 1991 überwiegend angestiegen. 2022 lag der Wert bei 301 und 2023 bei 323 pro 100 Versichertenjahre (2023) (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2023a; Dehl et al. 2024).

#### *Vor der Krise sind nicht alle Menschen gleich*

Menschen können unterschiedlich gut mit psychischen Belastungen und damit einhergehenden Stressoren umgehen. Einen guten Umgang mit krisenbedingtem Stress zu pflegen bedeutet, dass die Aktivierung des Organismus in einem angemessenen Maße stattfindet. Der Körper reagiert auf vorhandene Stressoren nicht länger und intensiver als dringend erforderlich. Menschen mit einer stabilen psychischen Widerstandskraft (Resilienz) reagieren auf Stress gemäßiger und sind in der Lage, körperliche Anspannungen zu regulieren. Die Ausschüttung von Stresshormonen wird zurückgefahren und der Stoffwechsel in ein gesundes Normalniveau zurückgebracht. Warum manche Menschen über mehr psychische Resilienz als andere verfügen, ist seit den 1950er Jahren Gegenstand von Wissenschaft und Forschung (Bengel und Lyssenko 2012; Krol 2024).

Als wissenschaftlich gesichert gilt, dass folgende Faktoren die psychische Widerstandskraft fördern:

- ▶ ein stabiles soziales Umfeld und mindestens eine feste Bezugsperson in der Kindheit und Jugend;

30 Arbeitsunfähigkeitstage (AU-Tage) werden pro 100 Versichertenjahre gerechnet, um eine standardisierte und leicht verständliche Kennzahl für den Krankenstand zu erhalten. Um den Wert für einen einzelnen Versicherten zu erhalten, teilt man die Gesamtzahl durch 100.

- ▶ mindestens mittlere Intelligenz, die Fähigkeit, umdenken zu können, einen guten Zugang zu Gefühlen haben und
- ▶ ein realistisches Selbstbild, Selbstwirksamkeitserfahrung, einen Sinn im Leben sehen, Zuversicht (Krol 2024).

Ebenso herrscht Konsens darüber, dass die psychische Widerstandskraft je nach Lebensphase schwanken kann. So ist beispielsweise die Zeit zwischen Schulabschluss und dem dreißigsten Lebensjahr i. d. R. von persönlicher Unsicherheit und einer schwächeren Resilienz geprägt. Ähnliches gilt für die ersten Jahre nach Beendigung des Berufslebens. In derartigen Umbruchsphasen fehlt es oftmals an Stabilität und Orientierung. Fehlender Halt und Ungewissheiten fordern persönliche Energieressourcen, wodurch die Konfrontation mit zusätzlichen Herausforderungen schneller zur Überforderung führen kann (Frick et al. 2022; Krol 2024). Dies wird durch Erfahrungen aus der Covid-19-Krise bestätigt. So zeigt eine Analyse zu gesellschaftlichen Folgen der Pandemie, dass vor allem Kinder und Jugendliche unter den Folgen der Pandemie zu leiden hatten und mit physischen und psychischen Erkrankungen zu kämpfen haben, u. a. Depressionen und Adipositas (Bundesregierung 2023d).

Neben individuellen, (sozial)psychologischen Bedingungen gibt es auch systemische Bedingungen, die Krisenfestigkeit von Menschen signifikant beeinträchtigen: Zum einen werden je nach Krise bestimmte Personengruppen – systembedingt – physisch und psychisch mehr belastet als andere. Während der Covid-19-Pandemie traf dies beispielsweise insbesondere Ärzt\*innen und Pflegepersonal. Sie mussten Sonderschichten übernehmen und unter enormem Zeit- und Leistungsdruck arbeiten, damit das Gesundheitssystem nicht kollabiert. Ihr Einsatz war systemrelevant. Auch Familien, insbesondere Alleinerziehende, waren stark belastet. Sie konnten ihre Kinder weder in eine Kindertagesstätte noch in die Schule schicken und mussten Erwerbsarbeit, Kinderbetreuung und Homeschooling parallel bewältigen. Zum anderen stehen Menschen unterschiedliche Ressourcen und Rahmenbedingungen zur Verfügung, um Belastungen abfedern und auf Phasen der Anspannung regelmäßige Phasen der Entspannung folgen lassen zu können. Beispielsweise ging mit dem Krieg in der Ukraine eine sehr plötzliche und star-

ke Erhöhung der Energiepreise einher und die Inflation erreichte ein Rekordniveau (Rudnicka 2024; Verivox 2024). Besagte Energiekosten sind zwar ab Herbst 2022 wieder gesunken, liegen jedoch weiterhin deutlich über dem Vorkriegsniveau (Stand Juni 2024). Auch die Inflationsrate hat sich auf ein stabiles Niveau abgeschwächt, doch die Teuerung ist geblieben und macht sich z. B. beim Lebensmitteleinkauf im Alltag bemerkbar (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2024; Statistisches Bundesamt (Destatis) o.J.). Derartige Mehrkosten belasten Haushalte mit niedrigen Einkommen besonders und sorgen hier für starke Verunsicherung. Dies gilt umso mehr dann, wenn das Vertrauen in die Politik als Problemlöser beschädigt ist – wie dies derzeit der Fall ist. So zeigt ein signifikanter Anteil der deutschen Bevölkerung im Alter von 18 bis 65 Jahren Misstrauen und Resignation gegenüber politischen Entscheidungsträger\*innen. Konkret zweifeln 73 % an der Kompetenz von Politikerinnen und Politikern, während nur 23 % Vertrauen in politische Prozesse setzen. Insgesamt machen sich 44 % große Sorgen um ihre Zukunft (Unzicker 2022; Poulakos 2023).

Und was belastet die deutsche Bevölkerung aktuell? Laut einer Trendstudie aus dem Jahr 2023 sorgen sich 63 % der 14- bis 29-Jährigen vor der Inflation, 59% vor Krieg in Europa, 53 % vor dem Klimawandel und 45 % vor einer Wirtschaftskrise. Darüber hinaus herrscht Sorge vor einer Spaltung der Gesellschaft und einem Zusammenbruch des Rentensystems. Mittlere und ältere Bevölkerungsgruppen sehen das ähnlich. Allerdings zeigen sich Unterschiede beim Thema Klimawandel, das die Jüngeren stärker belastet, und bei der Sorge vor Altersarmut, welche die Älteren stärker beschäftigt (Schnitzer 2023).

### *Blick in die Zukunft*

Insgesamt erscheint die zukünftige globale Entwicklung von hoher Unsicherheit und Volatilität geprägt. Zum einen erfordern die planetaren Belastungsgrenzen dringend eine Fortführung der Dekarbonisierung und beschleunigte Umsetzung der Nachhaltigkeitstransformation. Erlernte „Normalitäten“ und Routinen werden hierdurch weiterhin – teils un bequem – infrage gestellt, während neue erprobt und eingeübt werden müssen. Dass hierdurch weitere Stressoren entstehen, ist absehbar (Council of the European Union: General Secretariat of the Council 2024; World Economic Forum (WEF) 2024). Zum anderen stehen in den kommenden zwei Jahren in der

EU und darüber hinaus bedeutende Wahlen an. Fast drei Mrd. Menschen werden in Ländern wie Bangladesch, Indien, Indonesien, Mexiko, Pakistan, dem Vereinigten Königreich und den Vereinigten Staaten zur Stimmabgabe aufgerufen, um die Neuausrichtung ihres Landes mitzubestimmen. Hier wird sich u. a. zeigen, inwiefern sich progressive Demokratien behaupten oder reaktionäre, antidemokratische Bewegungen durchsetzen werden. Eine Ausweitung und Verfestigung reaktionärer, antidemokratischer Kräfte birgt die Gefahr, dass wissenschaftsbasierte Entscheidungen zugunsten kurzfristiger populistischer Agenden verdrängt werden (siehe Kapitel 2.4). Bei den entsprechenden Anhänger\*innen könnte dies kurzfristig zu einer Stärkung des Selbstwirksamkeitsgefühls und einem Moment der Entspannung führen. Dringend notwendige Transformationsmaßnahmen würden dadurch jedoch (weiter) verzögert oder gar verhindert. Damit würden sozial-ökologische Belastungsgrenzen weiter überschritten und ein Nährboden für neue Stressoren und sich verschärfende Krisen entstehen.

Vor diesem Hintergrund bewertet das World Economic Forum (WEF) Miss- und Desinformation als das größte Risiko für die kommenden zwei Jahre (siehe Abbildung 12). Grund dafür ist, dass anhaltende – absichtliche oder unabsichtliche – Falschinformationen, die über Mediennetzwerke weit verbreitet werden, die öffentliche Meinung in erheblichem Umfang verändern und Misstrauen gegenüber Fakten und Autoritäten schüren können. Desinformationskampagnen sind in der Regel darauf ausgelegt, negati-

ve Emotionen wie Angst, Wut und Verunsicherung auszulösen, da diese in sozialen Medien eine große Reichweite erzielen und lange im Gedächtnis bleiben. Dadurch können öffentliche Verantwortungsträger\*innen, Institutionen und Expert\*innen zunehmend negativ, z. B. als korrupt oder inkompetent, wahrgenommen werden. Miss- und Desinformation schüren damit zusätzliche Ängste und Unsicherheiten, untergraben das Vertrauen in demokratische Entscheidungsfindung und halten betroffene Bürger\*innen in einem anhaltenden Zustand emotionaler Belastung. Zuversicht und Hoffnung auf eine bessere Zukunft haben es entsprechend schwer. Dies ist gerade angesichts der weltweit angespannten geopolitischen Lage von zentraler Bedeutung. Die NATO geht davon aus, dass feindselige Absichten konkurrierender staatlicher Akteure fortbestehen werden. Sie werden versuchen „ihren Einfluss auszuweiten, indem sie Instabilitäten ausnutzen und alternative digitale, sozioökonomische und hybride Mittel nutzen“ (North Atlantic Treaty Organization (NATO) 2023).

Analog dazu stuft das WEF gesellschaftliche Polarisierung als kurzfristiges Risiko sehr hoch ein (Rang 3). Spaltende Faktoren wie politische Polarisierung und wirtschaftliche Not schwächen das Vertrauen und den Sinn für gemeinsame Werte. Die Erosion des sozialen Zusammenhalts lässt viel Raum für neue und sich entwickelnde Risiken (Council of the European Union: General Secretariat of the Council 2024; World Economic Forum (WEF) 2024).

Neben technologisch und gesellschaftlich bedingten Risiken werden ökologische Bedrohungen eine zunehmend zentrale Rolle einnehmen. Dies sagen mittlerweile nicht mehr nur Umweltaktivist\*innen und -forscher\*innen voraus. Auch das WEF betrachtet das Risiko von extremen Wetterereignissen kurz- und langfristig als eine der zwei größten Bedrohungen für die Weltgemeinschaft (Rang 2 bis 2026 und Rang 1 bis 2034). Außerdem werden voraussichtlich weitere, ökologisch bedingte Bedrohungen in den Vordergrund rücken, darunter kritische Veränderungen der Erdsysteme, der Verlust der biologischen Vielfalt, der Zusammenbruch von Ökosystemen und die Knappheit der natürlichen Ressourcen (World Economic Forum (WEF) 2024).

Es wird deutlich, dass – auch wenn die Dekarbonisierung und die Nachhaltigkeitstransformation Einzelpersonen und Staatengemeinschaften stark



Abbildung 12

## Globale Risiken, sortiert nach ihren kurz- und langfristigen Folgen

Pl.	2 Jahre	10 Jahre
1.	Fehlinformation und Desinformation	Extremwetterereignisse
2.	Extremwetterereignisse	Kritische Veränderung der Erdsysteme
3.	Gesellschaftliche Spaltung	Verlust der biologischen Vielfalt und Zusammenbruch der Ökosysteme
4.	Cybersicherheit	Verknappung natürlicher Ressourcen
5.	Zwischenstaatlicher bewaffneter Konflikt	Fehlinformation und Desinformation
6.	Mangel an wirtschaftlichen Möglichkeiten	Unerwünschte Folgen von KI-Technologien
7.	Inflation	Unfreiwillige Migration
8.	Unfreiwillige Migration	Cybersicherheit
9.	Wirtschaftsabschwung	Gesellschaftliche Spaltung
10.	Umweltverschmutzung	Umweltverschmutzung

Risikokategorien

- Ökonomisch
- Umwelt
- Geopolitisch
- Gesellschaftlich
- Technologisch

Quelle: eigene Darstellung nach World Economic Forum (WEF) 2024; S. 8

herausfordern – ihre grundsätzliche Umsetzungsnotwendigkeit nicht infrage gestellt werden kann.

Angesichts der beschriebenen anhaltenden Krisen, verbreiteten Sorgen und bedrohlich wirkenden Risikoszenarien stellen sich die Fragen:

1. Wie reagiert die Bevölkerung auf den andauernden Krisenmodus?
2. Welche Strategien wurden entwickelt, um mit dem anhaltenden Krisenmodus umzugehen?
3. Welche Umweltauswirkungen ergeben sich daraus?

### Emerging Issues

In der sich ständig wandelnden deutschen Gesellschaft, die konfrontiert ist mit komplexen und oft unvorhersehbaren Krisen, lassen sich verschiedene Reaktionsmuster beobachten. Einige Teile der Bevölkerung reagieren auf die Krisendynamiken mit

Rückzug und Vermeidung, also einer Form der Resignation. Andere Teile der Bevölkerung reagieren umgekehrt mit verstärkten eigenen Aktivitäten, angefangen bei Klimademonstrationen über politische Kundgebungen zum Russisch-Ukrainischen Krieg oder anderen geopolitischen Konflikten bis hin zu Protesten gegen Covid-19-Pandemiemaßnahmen.

Auch der Arbeitsplatz ist zunehmend von den Belastungen durch die verschiedenen Krisen betroffen. Die steigenden Anforderungen und die Notwendigkeit, sich kontinuierlich an neue Gegebenheiten anzupassen, belasten sowohl einzelne Beschäftigte als auch ganze Teams und erfordern neue Ansätze zur Stressbewältigung und Arbeitsorganisation.

Angesichts der wachsenden Herausforderungen durch die vielfältigen Krisen gewinnt die Analyse der privaten/persönlichen und beruflichen Reaktions-

muster aus einer umweltpolitischen Perspektive an Bedeutung.

### *1. Realitätsflucht: Krisenresignation und Krisenverdrängung*

Ein tiefgreifender Vertrauensverlust in politische und institutionelle Fähigkeiten prägt die Reaktion bedeutender Teile der deutschen Gesellschaft auf globale Krisen. Eine Mehrheit, 73 %, zweifelt an der Kompetenz politischer Führungskräfte, während nur ein Viertel, 23 %, politischen Prozessen vertraut. Die Skepsis geht einher mit einer gefühlten Überforderung durch aktuelle Krisen, wobei 59 % sich zurückziehen und 87 % vorrangig im privaten Umfeld nach Stabilität suchen. Dieser Rückzug ist ein deutliches Zeichen für die wahrgenommene eigene Ohnmacht und den Glauben an die Wirkungslosigkeit des eigenen Handelns (Poulakos 2023).

Die Konzentration auf die eigene Lebenswelt und die damit verbundene Vernachlässigung globaler Ereignisse, einschließlich der Klimakrise, verschärft aber die Problematik: Nur 39 % der Bevölkerung informieren sich aktiv über weltweite Geschehnisse (Poulakos 2023). Die Entscheidung, sich nicht zu informieren, blockiert Initiativen zur Veränderung. Sie geht teils einher mit einer Negation der Krisen selbst. Gleichzeitig führen der Rückzug ins Private wie auch ein schlechter Informationsstand zur jeweiligen aktuellen Lage in Bezug auf die verschiedenen Krisen zu einer verringerten Reaktionsfähigkeit und -bereitschaft – und damit auch zu einer Verringerung der kollektiven Handlungsfähigkeit. Indem persönlicher Rückzug priorisiert und politisches Engagement gemieden werden, nehmen Teile der Bevölkerung ihre eigenen Handlungsspielräume als irrelevant oder unwirksam wahr. Die Herausforderungen, die Krisen darstellen, erscheinen überwältigend groß und unüberwindbar, was transformative Ansätze und das Streben nach nachhaltigen Lösungen lähmt (Novalia und Malekpour 2020).

Verstärkt werden die genannten Reaktionsmechanismen noch durch die intensive Nutzung sozialer Medien verbunden mit der Gefahr von Filterblasen, in denen Menschen nur noch Informationen und Meinungen sehen, die ihre bestehenden Ansichten bestätigen. Dies führt zu einer verzerrten Wahrnehmung der Realität und kann die Bereitschaft, sich mit gegensätzlichen Meinungen auseinanderzusetzen, weiter verringern. In solchen isolierten Informa-

tionssphären wird die Komplexität globaler Krisen oft vereinfacht oder ignoriert, was die Fähigkeit zur kritischen Reflexion und zum informierten Handeln einschränkt. Die Entstehung von Filterblasen trägt somit zur Polarisierung der Gesellschaft bei und erschwert kollektive Lösungsansätze für globale Herausforderungen wie die Klimakrise (Pariser 2011).

Psychologische Abwehrmechanismen, wie Verdrängung und Resignation, schützen vor massivem Stress, Depressionen, Burn-out und ähnlichen individuellen Reaktionen, die in Verbindung mit der Polykrise stehen. Diese Abwehrmechanismen verhindern aber gleichzeitig die direkte Auseinandersetzung mit den neuen, schwierigen Realitäten. Die Polykrise wirkt jedoch nicht nur als Quelle persönlichen Leids, sondern kann auch zu gesellschaftlichem Engagement motivieren, was ein vertieftes Verständnis dieser Dynamiken erfordert (Junqueira und Prates 2023).

Lösungen bieten das Stärken bürgerschaftlichen Engagements und das Wiederherstellen von Vertrauen in kollektive Aktionen. Es gilt, Bedingungen zu schaffen, die dazu ermutigen, eine nachhaltige Zukunft aktiv mitzugestalten. Die Herausforderung liegt darin, das Krisennarrativ zu ändern: von der Wirkungslosigkeit eigener Aktivitäten hin zur Anerkennung der eigenen Einflussmöglichkeiten und aktiver Teilhabe an der Schaffung einer resilienten Gesellschaft (Novalia und Malekpour 2020). Diese Aussage gilt schon allgemeinpolitisch. Sie hat aber eine besondere Bedeutung im umweltpolitischen Kontext. Um auf Umweltprobleme adäquat reagieren zu können, ist eine gesamtgesellschaftliche Handlungsfähigkeit essenziell. Die effektive Lösung von Umweltproblemen ist eng mit gesamtgesellschaftlichem Engagement und einem Gefühl von Selbstwirksamkeit im Angesicht der Krise verknüpft.

Die Umweltpolitik hat hier diverse Anknüpfungspunkte: Sie kann das Systemvertrauen stärken durch konsistente und langfristige Strategien und Programme (wie etwa das Klimaschutzgesetz von 2019) und durch Erfolgskommunikation, etwa im Rahmen regelmäßiger Berichterstattung. Zur Stärkung des Systemvertrauens zählt aber auch, kritische Wahrheiten auszusprechen und Transparenz zu praktizieren, auch dort, wo Entwicklungen kritisch sind. Ein Beispiel hierfür ist der jährlich von der Bundesregierung vorgelegte Klimaschutzbericht.

Wichtig ist auch die Förderung von Bürgerbeteiligung und Bürgerdialog. Über partizipative Prozesse und Formate (z. B. Bürgerforen, Online-Plattformen und lokale Umweltkomitees) können Bürger\*innen in die Entscheidungsfindung eingebunden werden. Beispielhaft sind hier etwa die Bürgerdialoge zur Energiewende zu nennen. Diese Dialoge förderten das Verständnis und die Akzeptanz der Energiewende. Erfolgsbedingungen und Ansatzmöglichkeiten einer erfolgreichen Bürgerbeteiligung sind inzwischen gut erforscht (Schipperges et al. 2024), sodass hier weitere Schritte ergriffen werden können.

Lokale Anknüpfungspunkte zu nutzen und Bürger\*innen vor Ort einzubinden, ist ebenfalls von großer Bedeutung im geschilderten Kontext. Bürgerhaushalte, wie z. B. in Freiburg, wo Bürger\*innen über die Verwendung eines Teils der Mittel des städtischen Haushaltes mitentscheiden, oft mit einem Fokus auf nachhaltige Projekte, sind eine Möglichkeit, die künftig noch stärker verfolgt werden kann – auch wenn die Verwendung für nachhaltige Zwecke nicht garantiert ist. Daneben gibt es aber viele weitere, wie etwa eine bessere Unterstützung von Gemeinschaftsprojekten im Rahmen von lokalen Energiegenossenschaften oder über Nachbarschaftsinitiativen mit gemeinsamen Aktionen zum Naturschutz, zu Abfallvermeidung etc.

## *2. Förderung der Krisenbekämpfung: Zunahme und Intensivierung der Proteste*

Die Klimakrise treibt persönliches Engagement voran, mit Bewegungen wie Fridays for Future, Extinction Rebellion und Critical Mass, die sich durch Proteste für den Umweltschutz starkmachen und u. a. durch die Teilnahme sehr junger Bevölkerungsgruppen und eine starke Prägung durch Frauen gekennzeichnet sind. Die Aktionen dieser Bewegungen orientieren sich an der Tradition zivilen Ungehorsams, inspiriert von historischen Persönlichkeiten wie Rosa Parks und Mahatma Gandhi, mit dem Ziel, eine nachhaltige Wende herbeizuführen (Kiesewetter 2022; Haarbusch und Wendt 2023; Rucht 2023b).

Seit den 1970er Jahren weisen Wissenschaftler\*innen kontinuierlich auf die Risiken des Klimawandels hin, doch globale Anstrengungen zur Bekämpfung der Erderwärmung bleiben unzureichend (Rucht

2023b). Trotz 28 UN-Klimakonferenzen (Bundesregierung 2023c) hat sich der weltweite CO<sub>2</sub>-Ausstoß nicht in dem notwendigen Maß verringert. Vor diesem Hintergrund haben Klima- und Umweltproteste eine wichtige Funktion übernommen: Sie lenken die Aufmerksamkeit gezielt auf umweltpolitische Themen und erhöhen den Druck auf politische Entscheidungsträger. Obwohl der direkte Zusammenhang solcher Proteste auf politische Entscheidungen schwer quantifizierbar ist, haben historische Beispiele wie der Widerstand gegen die atomare Wiederaufbereitungsanlage in Wackersdorf 1989 (Röhrlich 2019), die Verhinderung der Rodung des Hambacher Forsts 2018 (ZDFheute 2023) oder die teilweise erfolgreiche Klage vor dem Bundesverfassungsgericht gegen das Klimaschutzgesetz 2021 gezeigt, dass Protestbewegungen signifikante politische Veränderungen bewirken können.

Insbesondere der zivile Ungehorsam hat sich als wirkungsvolle Methode erwiesen, um mediale und öffentliche Aufmerksamkeit zu generieren. Die Aktionen von Fridays for Future, bei denen Schüler\*innen an Freitagen die Schule bestreiken, haben das Bewusstsein für den Klimawandel und speziell auch für das Thema der Klimagerechtigkeit<sup>31</sup> weltweit geschärft. Diese Proteste wären vermutlich weniger beachtet worden, hätten sie außerhalb der Schulzeit stattgefunden. Ebenso haben die Aktionen der „Letzten Generation“, die durch Straßenblockaden und ähnliche Maßnahmen die Klimakrise in den Medien präsent halten, die Aufmerksamkeit auf die Dringlichkeit der Thematik gelenkt. Derartige Störungen des öffentlichen Lebens bleiben im kollektiven Gedächtnis oft nachhaltiger haften als symbolische Aktionen – unabhängig von der persönlichen Bewertung des Protests (Rucht 2023b).

Der zunehmende Einsatz von zivilem Ungehorsam in Protestbewegungen birgt Potenzial für die Beschleunigung einer nachhaltigen Transformation, kann jedoch paradoxerweise auch Hindernisse schaffen. Eine Umfrage ergab, dass 71,4 % der Befragten glauben, Aktionen wie die Straßenblockaden der „Letzten Generation“ schaden dem Klimaschutz mehr, als dass sie nützen, während lediglich 3,6 % einen klaren Vorteil in solchen Protesten sehen (Civey 2022). Der Hauptkritikpunkt liegt darin, dass diese Proteste

31 U. a. durch eine Kooperation mit der Gewerkschaft Verdi.

oft den Alltag der Bevölkerung stören, ohne direkt an den politischen Entscheidungsorten präsent zu sein. Zudem sehen einige Bürger\*innen keinen schlüssigen Zusammenhang zwischen den Protestzielen, wie dem Kampf gegen Lebensmittelverschwendung, und den angewandten Methoden (Rucht 2023a). Insbesondere die Aktionen gegen Kunstwerke hat zu einem negativen öffentlichen Bild der Protestbewegung geführt, was die Gewinnung neuer Unterstützender erschwert (Kumkar 2022).

Die Taktik, mit zivilem Ungehorsam politische Entscheidungsträger\*innen unter Druck zu setzen, ermutigt weitere Gruppen, darunter auch transformativ-feindliche, vergleichbare Strategien zu verfolgen (Theurer 2022). Hinzu kommt, dass Medien dazu neigen, die Form der Proteste über deren eigentliche Anliegen zu stellen, was den Fokus vom Kernthema Klimaschutz ablenkt (Rucht 2023a). Feststellbar ist insgesamt auch ein Abnutzungseffekt der Proteste. Ein Strategiewechsel von Extinction Rebellion – auch als Antwort auf die politische Gegeneskalation – mit dem Ziel der Massenmobilisierung wird seit Herbst 2023 angestrebt, bisher allerdings ohne wirklichen Erfolg (Arnhold 2024).

Während gerade die radikalen Proteste von Extinction Rebellion also mit einigen Problemen verknüpft sind, ist festzuhalten, dass die mediale Berichterstattung über die Proteste die Aufmerksamkeit für den Klimawandel verstärkt hat (Kumkar 2022). Erste Untersuchungen zeigen auch, dass die Proteste durchaus die teils angestrebten Effekte auf die öffentliche Meinungsbildung erreichen: Bedenken mit Blick auf den Klimawandel steigen nach Protestaktionen in der breiten Bevölkerung in Deutschland, und sie nehmen in keiner Bevölkerungsgruppe ab (Brehm und Gruhl 2024).

Aus umweltpolitischer Perspektive verleihen Proteste umweltpolitischen Maßnahmen teils Legitimation. Doch wenn sie zu stark in das Leben der Bürger\*innen eingreifen, droht eine Delegitimation. Während Proteste zwar einer lebendigen Demokratie Ausdruck verleihen, können sie gleichzeitig Kompromisse in der Umweltpolitik erschweren. Eine erfolgreiche Umweltpolitik wird in der Regel allerdings auf einem Ausgleich der Interessen aller Beteiligten und damit einer breiten Kompromissuche basieren.

Um die Protestbewegungen aufzufangen und aus umweltpolitischer Sicht produktiv zu nutzen, ist es wichtig, mit ihnen offen und konstruktiv umzugehen. Ihre Anliegen müssen in der einen oder anderen Form aufgenommen werden. Das startet damit, in einen Dialog zu treten. Dialogveranstaltungen zwischen Politiker\*innen, Expert\*innen und Vertreter\*innen der Protestbewegungen sind hier ein Ansatzpunkt ebenso wie Bürgerforen oder ähnlich Konsultationsprozesse.

Mit Blick auf die Klimaproteste kann es ein deutliches Zeichen für Reaktionsbereitschaft und -fähigkeit sein, einen Klimanotstand auszurufen (wie etwa im Vereinigten Königreich), um damit die Dringlichkeit des Handelns zu unterstreichen. Strengere Umweltgesetze, die den Forderungen der Protestbewegungen entsprechen, sind in letzter Konsequenz auch eine Strategie, wie Umweltpolitik Protestbewegungen stärken kann.

Daneben können niedrigschwelligere, aber gleichwohl effiziente Maßnahmen auch noch in anderer Form ergriffen werden, wie etwa Pilotprojekte, die innovative Lösungen für Umweltprobleme erproben und dabei die Gemeinschaft einbeziehen oder die Initiierung von Partnerschaften zwischen Technologieunternehmen und NGOs, um innovative Lösungen für den Klimaschutz zu finden, wie es z. B. in Kalifornien praktiziert wird.

### *3. Gefangen in der Krisenstimmung: die gestresste Arbeitsgesellschaft*

Die Arbeitswelt durchläuft einen stetigen Wandel, geprägt durch hohe Dynamik, zunehmende Unsicherheit und wachsende Komplexität. Parallel führt die anhaltende Konfrontation mit multiplen Krisen, wie u. a. dem Klimawandel, Covid-19-Pandemie (mit den unmittelbaren Folgewirkungen auf die Arbeitswelt), geopolitischen Konflikten und wirtschaftlichen Unsicherheiten, zu einem erhöhten Stressniveau bei den Beschäftigten. Diese Belastungen wirken sich je nach sozioökonomischem Status, Beschäftigungsverhältnis und Zugang zu Ressourcen unterschiedlich auf die Arbeitnehmer\*innen aus, was eine differenzierte Belastungssituation zur Folge hat (Hellert und Stix 2023).

Der Fehlzeiten-Report (Badura et al. 2023) „Zeitenwende – Arbeit gesund gestalten“ verbindet den Anstieg der Krankheitstage mit der Zunahme der Belastung durch multiple Krisen. Diese Beobachtung wird



durch eine Umfrage des Pinktum Institute (2024) unterstützt, in der 43,2 % der Befragten die Vielzahl an Krisen als Hauptbelastungsfaktor angaben. Unternehmen erleben enormen Veränderungsdruck, der bei den Beschäftigten zu Sorgen, Unsicherheiten und Ängsten führt. Solche psychosozialen Stressfaktoren werden als Ursache für mehr krankheitsbedingte Fehlzeiten gesehen, insbesondere bei psychischen Erkrankungen, die 2023 einen Höchststand erreichten (Boysen-Hogrefe et al. 2023; Deutsches Ärzteblatt 2023; Loschert et al. 2023).

Der gestiegene Krankenstand und die damit einhergehenden Arbeitsausfälle haben die durchschnittliche Arbeitszeit der Beschäftigten um 1,3 % im Vergleich zur Zeit vor der Corona-Pandemie gesenkt. Der Krankenstand ist von durchschnittlich 68,2 Stunden im Jahr 2021 auf 91,2 Stunden im Jahr 2022 angestiegen (Boysen-Hogrefe et al. 2023). Eine unklare Rolle nimmt hier die Möglichkeit des Homeoffice ein, da zusätzlicher Stress eventuell auch aus dem Arbeiten im Homeoffice resultiert, allerdings kann Homeoffice auch zu Stressreduktion führen (Deutsches Ärzteblatt 2022; Chudzicka-Czupala et al. 2023).

Darüber hinaus verschärft der demografische Wandel in Deutschland die bereits bestehende Arbeitskräfte-

knappeheit, was die wirtschaftliche Leistung und die gesellschaftliche Wohlfahrt beeinträchtigt (Bauer et al. 2023).

Die Belastung durch Stress beeinträchtigt nicht nur das individuelle Wohlbefinden, sondern auch die Kreativität und Innovationsfähigkeit, die für die Bewältigung der Klimakrise und die nachhaltige Transformation unserer Gesellschaft unerlässlich sind. Stress führt zu einer Einengung des Denkens, was die Entwicklung kreativer und innovativer Lösungen für den Klimaschutz behindert. Zusätzlich verringert Stress die Produktivität, was das Wachstum und den materiellen Wohlstand der Volkswirtschaft beeinflusst. Die Stundenproduktivität ist von 2021 zu 2022 nur um 0,4 % gestiegen, für 2023 wird eine Reduktion um 1,2 % im Vergleich zu 2022 erwartet (Bauer et al. 2023).

Für eine erfolgreiche nachhaltige Transformation ist eine funktionierende und widerstandsfähige Arbeitsgesellschaft entscheidend. Deutsche Unternehmen und ihre Belegschaften spielen als Innovationsmotoren eine zentrale Rolle bei der Entwicklung, Erprobung und Skalierung grüner Technologien. Daher ist es auch von umweltpolitischer Bedeutung, sich mit der zunehmenden Stressbelastung von Beschäftigten

in Unternehmen auseinanderzusetzen, um die Bewältigung von Krisen, insbesondere der Klimakrise, erfolgreich zu gestalten (Helmcke et al. 2021).

Die Umweltpolitik hat diverse Hebel, um Stress in der Arbeitsgesellschaft zu reduzieren. Dies startet mit der Vorbildfunktion als eigener Arbeitgeber. Hier kann das Umweltressort beispielgebend auftreten und entsprechend günstige Arbeitsbedingungen schaffen.

Bei der Arbeit beginnt Stressreduktion mit dem Weg zur Arbeit. Weniger Pendelverkehr, auch durch die Förderung von mehr Homeoffice und flexible Arbeitszeiten, grüne Pendler\*innenguthaben, die die Nutzung von umweltfreundlichen Verkehrsmitteln incentivieren, sowie entsprechende Steuervergünstigungen bzw. Änderungen bei den bestehenden Steuerbegünstigungen (Pendlerpauschalen) sind mögliche Maßnahmen, um den Arbeitsweg stressfreier zu gestalten.

Die Einrichtung von ruhigen Zonen in städtischen Gebieten, in denen Lärm und Lichtverschmutzung reduziert wird, kann Arbeitnehmer\*innen auch helfen, Ruhe und Erholung zu finden. Die Förderung von umweltfreundlichen Arbeits-Retreats, also solchen in naturnahen Umgebungen, die es den Mitarbeiter\*innen ermöglichen, in einer stressfreien und inspirierenden Umgebung zu arbeiten, ist ein weiterer umweltpolitischer Ansatzpunkt. So könnten Unternehmen regelmäßige Retreats in Öko-Dörfern oder Naturreservaten anbieten.

### **Fazit für Umweltpolitik und -forschung:**

Die Polykrise belastet unsere Gesellschaft zunehmend und gefährdet die Transformation zur Nachhaltigkeit. Die breite Palette von Reaktionen auf diese Krise, einschließlich der Flucht vor der Realität, zunehmender Protestaktivitäten und steigendem Stress in der Arbeitswelt, unterstreichen die zunehmende Spaltung der Gesellschaft, gleichzeitig aber auch die Notwendigkeit einer umfassenden und anpassungsfähigen Umweltpolitik.

Wie dargestellt, reagieren viele Bürger\*innen mit Realitätsflucht und Resignation auf die wachsende persönliche Belastung aus der Polykrise. Die Umweltpolitik muss hier ansetzen, um Ängste in Zuversicht umzuwandeln, wobei ein hohes Maß an Transparenz, der Aufbau von Systemvertrauen und die Vermittlung eines optimistischen Zukunftsbildes entscheidend

sind (Suckert 2021). Transparenz und Vertrauen fördern die Akzeptanz politischer Maßnahmen und motivieren zum Engagement. Daher sollte die Politik das Systemvertrauen stärken, positive Zukunftsvisionen bieten und politische Partizipation fördern, um Aktivierung zu erreichen und Ohnmachtsgefühle zu verringern. Transparenz, Information und angemessene Kommunikation, auch mit den schwieriger zu erreichenden Teilen der Bevölkerung, sind dabei zentral. Die Bereitstellung staatlicher Unterstützung zur Stärkung der mentalen Gesundheit ist ebenfalls wesentlich (Nadjivan und Sustala 2023).

Erhöhte Einflussmöglichkeiten sind besonders für diejenigen wichtig, die mit Protestaktivitäten auf Krisen reagieren, um ihre Interessen vertreten zu sehen und sich verstanden zu fühlen (Bültena 2022). Für die Umweltpolitik bedarf es daher Wege, konstruktiv mit Protestbewegungen zu interagieren und ihre Anliegen in politische Maßnahmen umzusetzen, um eine breitere Akzeptanz und Beteiligung an der Nachhaltigkeitstransformation zu erzielen.

Eine übergreifende Perspektive, die Krisenzeiten als Chance für Innovation und Veränderung sieht und ein gemeinsames (Ziel-)Verständnis fördert, ist entscheidend für die Transformation zu einer nachhaltigen Gesellschaft. Die Entwicklung und Förderung resilienter Arbeitsmodelle, die Produktivität und Wohlbefinden steigern, verbunden mit einem neuen Verständnis von Wohlfahrt, sind wichtige Schritte (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) 2016; S. 36).



## 2.7 Transformation in wirtschaftlich unsicheren Zeiten

**Trend:** Die Soziale Marktwirtschaft in Deutschland befindet sich mitten in einem tiefgreifenden Umbau hin zu einer sozial-ökologischen Ausrichtung. Erste wichtige Schritte sind getan, aber es bedarf noch erheblicher Investitionen und Anstrengungen. Die aktuellen wirtschaftlichen Kennzahlen zeigen allerdings eine stagnierende Wirtschaftslage und lassen keine baldige Erholung erwarten. Bürger\*innen, Unternehmen und auch der Staat sind von Investitionsbedarfen betroffen. Die Frage nach einer gerechten Verteilung gewinnt an Bedeutung. Wie ist es um die sozial-ökologische Marktwirtschaft derzeit bestellt? Welche Schritte wurden unternommen, welche blieben (bisher) aus? Was bedeuten knappe Kassen für die Transformation?

### Emerging Issues

1. Transformation, wenn Bürger\*innen sinkende Einkommen und Vermögen haben
2. Transformation, wenn Unternehmen wirtschaftlich zunehmend unter Druck geraten
3. Transformation, wenn dem Staat auf allen Ebenen der Staatshaushalt schrumpft

### In Kürze

- ▶ Deutschland kann auf eine lange Wachstumsphase zurückblicken. Die eingeführte Soziale Marktwirtschaft gilt als Erfolgsmodell, das Wohlstand in die Breite der Gesellschaft getragen hat. Angesichts der planetaren Belastungsgrenzen gilt es jedoch, wirtschaftliches Handeln nicht mehr nur mit sozialer Gerechtigkeit und Teilhabe, sondern

auch mit ökologischer Nachhaltigkeit in Einklang zu bringen: Vom Leitbild einer sozial-ökologischen Marktwirtschaft ist die Rede, das auch im Koalitionsvertrag der Bundesregierung verankert ist. Dazu bedarf es eines nachhaltigen Wohlstandsverständnisses, entsprechender Rahmenbedingungen und Investitionen. Doch wie können diese finanziert werden? Die deutsche Wirtschaft schwächelt, steht vor strukturellen Herausforderungen. Wirksame Strategien für neuen Aufschwung werden daher dringend gesucht.

- ▶ Sollte die gegenwärtige Entwicklung wirtschaftlicher Unsicherheit anhalten, so wird es für Bürger\*innen, Unternehmen und den Staat schwieriger, die sozial-ökologische Transformation weiter voranzutreiben. Auch schon in der jetzigen Situation ist die Akzeptanz dieser Transformation infrage gestellt, weil die Lastenverteilung als ungerecht empfunden wird. Bei weiter zurückgehenden Einkommen bzw. ggf. auch sinkenden Unternehmensgewinnen kann sich diese Situation noch weiter verschärfen. Gleichzeitig werden zurückgehende Einnahmen bei Staat und Unternehmen zum einen dazu führen, dass nicht ausreichend Investitionen getätigt werden können in den Aufbau neuer Produktionen und Infrastrukturen bzw. die Umgestaltung bestehender Systeme.

Gleichzeitig werden zum anderen bei zurückgehenden Erträgen die Spielräume für die Finanzierung von Innovationen potenziell geringer – Innovationen, die für die sozial-ökologische Transformation unerlässlich sind.

## Hintergrund

Deutschland ist stolz auf mehr als 70 Jahre Soziale Marktwirtschaft. Seit Einführung des Konzepts Mitte des 20. Jahrhundert hat die Wirtschafts- und Gesellschaftsordnung insbesondere in den Nachkriegsjahren vielen Menschen aus der Armut geholfen und sich über die vergangenen Jahrzehnte als Erfolgsmodell für Wohlstandssicherung herausgestellt (Orth 2023). Das Konzept der Sozialen Marktwirtschaft folgt der Grundidee, die Vorteile einer freien Marktwirtschaft – wie Effizienz und Leistungsfähigkeit – zu nutzen und gleichzeitig deren Nachteile, insbesondere hinsichtlich sozialer Ungleichheit, auszugleichen. Kurz gesagt, sollen wirtschaftliche Aktivitäten durch staatliche Rahmenseetzungen dem Wohle aller Bevölkerungsschichten dienen. Die aktuelle Bundesregierung strebt an, die Soziale Marktwirtschaft in eine sozial-ökologische Marktwirtschaft weiterzuentwickeln. Wirtschaftliches Wachstumsstreben soll demnach nicht mehr nur sozial, sondern auch ökologisch eingebettet werden. Dieses Bestreben basiert auf der wissenschaftlich fundierten Erkenntnis, dass ein intaktes Ökosystem eine zentrale Grundlage für Wohlstand und Sicherheit darstellt (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) o. J.b; Bundeszentrale für politische Bildung (bpb) 2021; World Economic Forum (WEF) 2024). Wirtschaftliche Aktivitäten müssen in einer sozial-ökologischen Marktwirtschaft daher nicht mehr nur sozial ausgeglichen, sondern auch mit planetaren Belastungsgrenzen in Einklang gebracht werden. Es gilt, sowohl die Bedürfnisse der Bevölkerung als auch die der Ökosysteme zu berücksichtigen. Die Nachhaltigkeitstransformation sozialverträglich voranzubringen, ist eine enorme Herausforderung. So zeigen verschiedene Studien für Deutschland einen Investitionsbedarf zwischen 4,5<sup>32</sup> und 6 Bio. Euro (Burret et al. 2021; Helmcke et al. 2021), um die gesetzlich verankerten Klimaziele

bis 2045 zu erreichen. Für den Zeitraum von 2020 bis 2045 würden damit jährlich etwa 180 bis 240 Mrd. Euro anfallen. Gleichzeitig muss die Bevölkerung mitgenommen werden. So rücken Verteilungsfragen und die Schaffung von Ausgleichsmechanismen, wie etwa des sogenannten Klimageldes, in den Vordergrund (Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) 2022; Pokraka 2023).

## Wie es um die sozial-ökologische Marktwirtschaft steht

Die wirtschaftliche Lage eines Landes wird klassischerweise anhand von Indikatoren wie dem Bruttoinlandprodukt (BIP)<sup>33</sup> und der Inflation bzw. Preisentwicklung definiert. Ergänzend dazu finden im Bundeswirtschaftsbericht seit 2022 auch einzelne, sogenannte „Wohlfahrtsmessindikatoren“ Beachtung. Sie beleuchten Faktoren wie soziale Gerechtigkeit und Teilhabe sowie den Umgang mit ökologischen Grenzen. Damit stellen sie einen wichtigen Schritt in Richtung einer ganzheitlichen Wohlfahrtsmessung unter Berücksichtigung notwendiger Nachhaltigkeitsaspekte dar. Gleichzeitig sind Verbesserungen notwendig, um die Aussagekraft und Anwendbarkeit der Indikatoren zu erhöhen und ein ausgewogeneres Bild der gesellschaftlichen Wohlfahrt zu zeichnen. So sollten z. B. ökologische und soziale Indikatoren deutlich differenzierter dargestellt und stärker gewichtet werden (Diefenbacher und Zieschank 2010; Jakob Dirksen 2024).

Das **BIP** war in Deutschland im vierten Quartal 2022 und im ersten Quartal 2023 von einem Rückgang gekennzeichnet (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2023b; Wollmershäuser 2023; Statistisches Bundesamt (Destatis) 2023f). Auch über das gesamte Jahr 2023 verteilt, sank das BIP um 0,3 %. Für das Jahr 2024 rechnet das Bundeswirtschaftsministerium mit einem Anstieg um 0,2 % und für 2025 mit einem Anstieg um 1 % (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2024; Deutsche Bundesbank 2024).

Als gesunde und wirtschaftlich förderliche **Preisentwicklung** wird eine jährliche Teuerung von 2 % gesehen. Dieser Anstieg gilt als ausgewogen, da er die Kaufkraft einer Währung stabilisiert und gleichzeitig Anreize für Investitionen und Konsum setzt. Im Au-

<sup>32</sup> Die Studie geht vom Ziel der Dekarbonisierung im Jahr 2050 aus. Das Vorziehen auf das Jahr 2045 war zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der zitierten Studie nicht absehbar.  
<sup>33</sup> Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) beschreibt den Wert aller Güter und Dienstleistungen, die in einer Volkswirtschaft innerhalb eines Jahres erwirtschaftet werden.

gust 2023 lag die Inflationsrate in Deutschland bei 6,1 % (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2023d). Für 2024 wird mit einem Rückgang auf 3 % gerechnet (Roland Berger GmbH und Handelsblatt Research Institute 2023; S. 27). Betrachtet man die vergangenen vier Jahre, so ist das Preisniveau in dem Zeitraum um rund 20 % gestiegen. Diese Entwicklung fand weitgehend abgekoppelt von Lohn- und Gehaltssteigerungen statt. Die Kaufkraft der Bürger\*innen hat damit deutlich abgenommen (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2024).

Hinsichtlich der Entwicklung **sozialer Gerechtigkeit und Teilhabe** zeigt sich, dass die Einkommen regional weiterhin insbesondere zwischen Osten und Westen, aber auch zwischen Norden und Süden ungleich verteilt sind. Im Süden und Teilen des Westens verfügen Menschen tendenziell über mehr Einkommen als im Osten und im Norden des Landes (Stand 2021). Außerdem ist die Einkommensverteilung in der Bevölkerung seit 2010 relativ stabil geblieben und Unterschiede nahmen zuletzt leicht ab (Stand 2022). Auch Verdienstunterschiede zwischen Frauen und Männern sind seit 2010 gesunken, stagnieren jedoch seit 2020. Männer verdienen demnach brutto

im Durchschnitt 18 % mehr als Frauen (Stand 2023) (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2024).

Zum Thema **Berücksichtigung ökologischer Grenzen** zeigen die Wohlfahrtsmessindikatoren u. a., dass die Treibhausgasemissionen zwischen 2019 und 2022 von 797 auf 750 CO<sub>2</sub>-Äquivalente zurückgegangen und Investitionen in Maßnahmen für den Klimaschutz von 2017 bis 2019 durchgängig gestiegen sind (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2024). Von seinem Ziel, die Netto-Treibhausgasneutralität bis 2045 zu erreichen, ist Deutschland jedoch noch weit entfernt. Festgelegte Zwischenziele, wie etwa die Minderung der THG-Emissionen um mind. 65 % bis 2030, drohen ohne zusätzliche Anstrengungen verfehlt zu werden (Expertenrat für Klimafragen 2023).

#### *Deutsche Wirtschaft durch vielfältige externe Faktoren angezählt*

Im Zuge der Covid-19-Pandemie erlebte die europäische Staatengemeinschaft die tiefste Wirtschaftskrise seit dem Zweiten Weltkrieg. In Deutschland führte die Pandemie zu einer schweren Rezession, vergleich-



bar mit dem Wirtschaftseinbruch infolge der globalen Finanzkrise von 2009. Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) ging um 5 % zurück (Bundesfinanzministerium (BMF) 2021). Umfangreiche staatliche Hilfs- und Konjunkturpakete wurden verabschiedet, um negative Folgen für Wirtschaft und Zivilgesellschaft abzufedern (Bundesregierung 2023e). In Deutschland waren Produktionsstandorte v. a. von gestörten Lieferketten betroffen – ein Problem, das bis heute nachwirkt. Beschaffungsprozesse müssen seitdem diversifiziert und Mehrkosten gegenüber Versorgungssicherheit abgewogen werden (Ragnitz 2022).

Die Corona-Krise war noch nicht überwunden, da versetzte der russische Angriffskrieg auf die Ukraine der deutschen Wirtschaft im Frühjahr 2022 einen erneuten Dämpfer. Mit dem innereuropäischen Konflikt ging eine enorme Energiepreissteigerung einher. Im Januar 2023 waren die Erzeugerpreise für Erdgas 50,7 % höher als im Vorjahr. Die Preise für Strom und Mineralölprodukte waren im selben Zeitraum um 27,3 % bzw. 12,6 % gestiegen (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2023e). Durch den plötzlichen Wegfall Russlands als günstiger Rohstofflieferant verloren insbesondere die energieintensiven Industriesektoren in Deutschland einen jahrelangen Wettbewerbsvorteil (Wehrle 2023). Zudem sorgten Maßnahmen zur Bekämpfung der hohen Inflation zwar für mehr Preisstabilität, führten aber auch zu hohen Zinsen, die negativ auf die Investitionsfreudigkeit von Unternehmen wirken (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2024).

Die Exportorientierung Deutschlands hat zur Folge, dass Erfolg und Misserfolg der Volkswirtschaft besonders von internationalen Märkten abhängen. Hier zeigen sich aktuell insbesondere zwei Herausforderungen: Zum einen weist die Weltwirtschaft mit etwa 3 % nur ein schwaches Wachstum auf und für 2024 wird eine Abschwächung auf 2,7 % erwartet (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2024). Zum anderen verschärft sich der internationale Wettbewerb, u. a. weil wichtige Handelspartner wie die USA und China die inländische Produktion für den heimischen und internationalen Markt stark priorisieren und subventionieren. So fördert die chinesische Regierung bereits seit Jahren sehr gezielt Zukunftstechnologien wie die Elektromobilität, um die Technologieabhängigkeit von ausländischen Anbietern zu verringern (Viklenko o.J.). Mittlerweile dominieren chinesische Automobilhersteller wie BYD den

inländischen Markt und könnten im globalisierten Wettbewerb deutsche Hersteller wie Volkswagen aus dem Zukunftsfeld Elektromobilität verdrängen (CAM 2023). In den USA wurde zudem 2022 der Inflation Reduction Act (IRA) beschlossen, um die heimische Wirtschaft anzukurbeln und beim Klimaschutz voranzukommen. Das Programm sieht vor, die Nachhaltigkeitstransformation durch Steuergutschriften und Subventionen im Umfang von etwa 369 Mrd. US-Dollar, verteilt auf zehn Jahre, zu unterstützen (Baur et al. 2023; DIW Berlin 2023).

Die beschriebenen Herausforderungen im deutschen Exportgeschäft spiegeln sich in aktuellen Absatzzahlen wider. So hat der Außenhandel Deutschlands im Dezember 2023 gegenüber dem Vorjahr einen Rückgang von 4,6 % zu verzeichnen (tagesschau.de 2024a). Exporte in die USA und China – Deutschlands wichtigste Handelspartner – sanken im selben Zeitraum um 9,9 % und 12,7 % (tagesschau.de 2024b).

Die Einführung des IRA hat auf EU- und Bundesebene eine Debatte ausgelöst, wie angemessen auf das Förderprogramm der USA reagiert werden kann, um wettbewerbsfähig zu bleiben und eine Abwanderung wichtiger Industrien zu verhindern (Crawford 2023; Deutsche Industrie- und Handelskammer (DIHK) 2023; Sachverständigenrat für Wirtschaft 2023). Auf Bundesebene sind dem Staat durch die gesetzlich verankerte Schuldenbremse zusätzliche Investitionsspielräume außerhalb des Bundeshaushalts sowie des Klima- und Transformationsfonds (KTF) genommen. Der Versuch einer Umwidmung von 60 Mrd. Euro aus dem Sondervermögen der Covid-19-Pandemie in den KTF wurde vom Bundesverfassungsgericht im November 2023 zurückgewiesen (Wirtschaftswache 2023). Die Möglichkeit, umweltschädliche Subventionen in großem Umfang abzubauen und die freiwerdenden Mittel in den sozial-ökologischen Umbau der Wirtschaft zu reinvestieren, wurde von der Bundesregierung bisher nicht genutzt. Das Umweltbundesamt (UBA) (2021) beziffert die umweltschädlichen Subventionen auf jährlich 65 Mrd. Euro.

### *Wirksame Strategien für wirtschaftlichen Aufschwung dringend gesucht*

Die bisher dargelegten Hemmnisse und Herausforderungen ereilten die deutsche Wirtschaft sehr plötzlich und waren kaum vorherzusehen. Daneben hat Deutschland allerdings auch mit strukturellen Pro-

blemen zu kämpfen, die sich über viele Jahre aufgebaut haben. Hierzu zählt hoher Bürokratieaufwand und aktueller sowie perspektivischer Arbeitskräftemangel (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2024).

Insbesondere für mittelständische Unternehmen stellen Antrags-, Berichts- und Meldepflichten ein Wachstumshemmnis dar. Sie binden knappe personelle Ressourcen und verzögern Projektfortschritte teilweise erheblich. Die Bundesregierung will daher in Kooperation mit betroffenen Unternehmen bestehende Informations- und Berichtspflichten hinsichtlich Angemessenheit und Zweckmäßigkeit überprüfen. Im März 2024 wurde das vierte Bürokratieentlastungsgesetz beschlossen, um für effizientere und attraktivere Rahmenbedingungen zu sorgen (Deutsche Industrie- und Handelskammer (DIHK) 2024).

Der Fachkräftemangel stellt für mehr als die Hälfte der deutschen Industrieunternehmen schon heute ein Geschäftsrisiko dar (Statista GmbH 2024c). In absehbarer Zeit wird er aller Voraussicht nach eine größere Bedeutung für die Wirtschaft spielen. Die geburtenstarken Jahrgänge gehen vermehrt in den Ruhestand, zu wenige qualifizierte Arbeitskräfte kommen nach. Während im Jahr 2012 knapp 33.300 Ausbildungsstellen unbesetzt blieben, hat sich die Zahl 2022 auf knapp 68.900 unbesetzte Stellen mehr als verdoppelt. Derzeit sind vor allem technische, soziale und Gesundheitsberufe vom Fachkräftemangel betroffen. Zur erstgenannten Gruppe gehören u. a. Fachkräfte im Bereich Sanitär, Heizung, Klima (SHK-Fachkräfte) sowie Elektrotechnik- und IT-Expert\*innen, die für die Transformation des Wirtschaftsstandorts Deutschland von zentraler Bedeutung sind (KOFA 2023; ver.di 2023). Diesem negativen Trend versucht die Bundesregierung im Rahmen ihrer Fachkräftestrategie und mit dem Fachkräfteeinwanderungsgesetz entgegenzuwirken. Die Maßnahmen zielen darauf ab, mehr Menschen aus dem In- und Ausland in den deutschen Arbeitsmarkt zu integrieren. Allerdings bleibt offen, ob der demografisch bedingte Erwerbstätigenschwund ausgeglichen werden kann; schließlich wird die Bevölkerung im erwerbsfähigen Alter bis 2030 um 3,9 Mio. und bis 2060 um 10,2 Mio. Menschen sinken (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) o. J.a).

### *Transformation ermöglichen durch Zuwanderung, KI und Postwachstum?*

Laut einer Zukunftsstudie des Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB) würde das Erwerbspersonenpotenzial<sup>34</sup> auch in einem optimistischen Zuwanderungsszenario – 400.000 Personen bis 2035 jährlich – um 1,5 % schrumpfen. In einem als realistisch befundenen Zuwanderungsszenario, das historisch begründet von einer jährlichen Nettozuwanderung von 200.000 Personen ausgeht, würden 2,9 Mio. Arbeitskräfte fehlen (Klinger und Fuchs 2020; Statista GmbH 2024d). Hinzu kommt, dass Deutschland für gut ausgebildete junge Menschen aus dem Ausland im Vergleich nicht hinreichend attraktiv ist. Deutschland konkurriert mit Ländern wie den USA, Australien, Neuseeland und Großbritannien, wo durch die englische Sprache eine geringere Sprachbarriere herrscht. Außerdem macht Deutschland international durch rechtspopulistische Debatten und ein Umfragehoch rechtspopulistischer Parteien derzeit nicht mit einer ausgeprägten Willkommenskultur auf sich aufmerksam (Tran 2022).

Aufgrund dieser Herausforderungen wird auch auf Effizienzsteigerung durch (generative) Künstliche Intelligenz gehofft. Doch damit diese Zukunftstechnologie ihr Potenzial ausschöpfen kann, muss zunächst im Zuge der Digitalisierung eine entsprechende Infrastruktur und Rahmung vorgebracht werden. Auch dies benötigt Zeit und Fachkräfte, die bereits heute knapp sind (Lauterjung o.J.). Außerdem kann nicht seriös vorhergesagt werden, ob dem Fachkräftemangel durch Künstliche Intelligenz tatsächlich signifikant entgegengewirkt werden kann oder ob nicht vielmehr zusätzliche Tätigkeitsbereiche und Berufsgruppen entstehen werden (Klingbeil-Döring 2023). Zudem gilt es sicherzustellen, dass die Digitalisierung nachhaltig erfolgt.

Was also, wenn aufgrund fehlender Produktivitätssteigerungspotenziale auf Dauer kein wirtschaftliches Wachstum mehr möglich wäre? Dem Bundeshaushalt würde ein kontinuierliches Defizit drohen und dem Sozialsystem der Kollaps. Oder gäbe es dazu eine Alternative? Ökonomische Denkschulen, wie etwa die Degrowth- oder Postwachstumstheorie, bieten für dieses Szenario Anknüpfungspunkte. Beide Ansätze stellen eine kausale Abhängigkeit zwischen

<sup>34</sup> Als Erwerbspersonenpotenzial wird das Maß für das in Deutschland maximal zur Verfügung stehende Arbeitskräfteangebot bezeichnet. Es umfasst sowohl Erwerbstätige und Erwerbslose als auch eine sogenannte stille Reserve, also Personen die aus unterschiedlichen Gründen nicht arbeitslos gemeldet sind.

gesellschaftlichem Wohlergehen und wachsendem BIP radikal infrage. Sie gehen davon aus, dass eine Entkopplung von Ressourcenverbrauch und Wirtschaftswachstum, wie sie für das Einhalten planetarer Grenzen nötig wäre, nicht möglich ist. Diese Einschätzung wird auch vom Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) geteilt. Die Postwachstumstheorie strebt entsprechend eine Wirtschaft an, die auf stabile soziale Versorgungsstrukturen setzt und mit einem nachhaltigen Konsumniveau einhergeht (Petschow et al. 2020b; Petschow et al. 2020a; Thie et al. 2022; Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) 2024). Jedoch ist der Sozialstaat bislang vom Wirtschaftswachstum abhängig. Leistungen wie gesetzliche Versicherungen, Bildung, öffentliche Sicherheit und Gesundheit werden aus Steuermitteln querfinanziert. Vor dem Hintergrund unsicherer Wachstumsperspektiven empfiehlt der SRU daher, die staatlichen Sozialsysteme vorsorgend so umzugestalten, dass sie ihre Aufgaben auch ohne ständig zunehmende Wirtschaftsleistung erfüllen können. Durch die Umsetzung einer suffizienzorientierten<sup>35</sup> Kreislaufwirtschaft könnte ein Wirtschaftsmodell entstehen, das nicht auf kontinuierlichem Wirtschaftszuwachs, sondern auf Stabilität und Nachhaltigkeit beruht. Zudem könnten alternative Wohlstandsindikatoren wie Lebensqualität, Umweltgesundheit und soziale Gerechtigkeit das BIP in seiner Vorrangstellung ablösen (Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) 2024).

Wie sich die Wirtschaft in Deutschland langfristig entwickeln wird, bleibt offen. Klar ist jedoch, dass mit kontinuierlichem wirtschaftlichem Wachstum nicht immer gerechnet werden kann. Mit Blick auf die Umweltpolitik stellen sich demnach folgende Fragen:

1. Wie verändern sich individuelle Beitragsmöglichkeiten zur Dekarbonisierung, wenn Bürger\*innen mit sinkenden Einkommen und Vermögen agieren müssen, und welche Aufgaben ergeben sich dann für die Regierung?
2. Welche Investitionen in Klimaschutz und Innovationen für die Transformation können Unternehmen in wirtschaftlich unsicheren Zeiten leisten?
3. Wie gelingt staatliche Prioritätensetzung für Klima- und Nachhaltigkeitspolitik mit einem schrumpfenden Staatshaushalt?

## Emerging Issues

Die sozial-ökologische Transformation stellt eine zentrale Herausforderung für Deutschland dar, und zwar sowohl auf Ebene aller Bürger\*innen wie auch für Unternehmen und den Staat. Der anstehende und notwendige tiefgreifende Wandel ist verknüpft mit einer breiten Anpassung der Lebens- und Produktionsweisen und erfordert erhebliche Investitionen in eine Vielzahl von Infrastrukturen, industrielle Systeme und Humankapital sowie eventuelle Ausgleichsmaßnahmen. Der Strukturwandel birgt zahlreiche Risiken und Chancen. Die Frage, wer in welchem Maße aus der Transformation einen Nutzen zieht und wer Nachteile erleidet, insbesondere, welche gesellschaftlichen Gruppen von der Umverteilung, die mit dem Wandel einhergehen, profitieren und welche Gruppen verlieren, wird entscheidend für die gesellschaftliche Akzeptanz der sozial-ökologischen Transformation sein.

### 1. Transformation, wenn Bürger\*innen sinkende Einkommen und Vermögen haben

In Deutschland haben Bürger\*innen im Jahr 2020, vor allem aber auch 2022 durch Inflation und sinkende Reallöhne unterschiedlich starke Wohlstandsverluste erlebt. Menschen mit niedrigeren Einkommen spüren die ökonomischen Belastungen durch klimapolitische Maßnahmen überproportional, während Haushalte mit höherem Einkommen weniger stark betroffen sind. Gleichzeitig weisen verschiedene Studien, z. B. Lutter et al. (2022), Oehlmann et al. (2021) und Khalfan et al. (2023), darauf hin, dass grundsätzlich Bürger\*innen mit höherem Einkommen insgesamt (deutlich) mehr Klima- und Umweltschäden verursachen, selbst wenn sie nachhaltigere Produkte und Dienstleistungen konsumieren. Diese Tatsache wirft Fragen hinsichtlich des sozialen Ausgleichs und einer gerechten Verteilung der Kosten und Nutzen der aktuellen Energie- und Klimapolitik auf. Das eigentlich schon für die aktuelle Legislaturperiode geplante Klimageld könnte eine Antwort für eine gerechte Aufteilung sein.

Das Soziale Nachhaltigkeitsbarometer des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (2020) bestätigt das Bedürfnis in der breiten Bevölkerung nach Fairness und Gerechtigkeit in der Kostenverteilung. Die Energiekrise und geopolitische Spannungen ver-

<sup>35</sup> Suffizienzorientiert bedeutet in diesem Kontext, den Verbrauch von Gütern und Dienstleistungen mit schädlichen Umweltwirkungen zu reduzieren. Für den SRU ist Suffizienz nicht nur eine Frage des individuellen Lebensstils, sondern auch eine strukturelle Aufgabe, die entsprechende politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen erfordert. Diese Rahmenbedingungen sollten eine umweltschonende gesellschaftliche Praxis fördern, anstatt sie zu erschweren.

stärken den Wunsch vieler nach einer Politik, die Klimaschutz und Energieversorgung integriert angeht. Die Mehrheit der Bürger\*innen empfindet staatliche Unterstützungsmaßnahmen als unzureichend, besonders für Menschen mit niedrigem Einkommen, und kritisiert die von ihnen wahrgenommene Ungerechtigkeit der Kostenverteilung der Maßnahmen (Wolf 2020; Roland Berger GmbH und Handelsblatt Research Institute 2023; Wolf et al. 2023). Eine effektive Klimapolitik muss Umverteilungsmechanismen für einkommensschwache Gruppen einschließen, um die Transformation inklusiv und ausgleichend zu gestalten und damit die Akzeptanz der Transformation sicherzustellen. So weisen Otto et al. (2019) beispielsweise auf eine stärkere finanzielle Beteiligung wohlhabender Haushalte an Umweltschutzmaßnahmen hin, um soziale Ungleichheiten zu verringern und die Transformation inklusiv zu gestalten. Länder wie Schweden zeigen, wie Steuersysteme mit starker Progression die finanzielle Last für den Umweltschutz anders verteilen können (Otto et al. 2019).

Eine Online-Erhebung der Hans-Böckler-Stiftung (2023) unter 2.000 Beschäftigten von April 2022 verdeutlicht ebenfalls die Tatsache, dass die sozial-ökologische Transformation durchaus als wirtschaftliches Risiko wahrgenommen wird (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) und Umweltbundesamt (UBA) 2023). Während viele Befragte Verbesserungen für Gesundheit (59 %), Energieversorgungssicherheit (56 %) und Luftqualität (65 %) erwarten, befürchteten sie auch höhere Lebenshaltungskosten (67 %), soziale Ungleichheiten (51 %) und eine Verringerung des Lebensstandards (50 %). Wesentliche Hindernisse für einen Wechsel in die „grüne“ Wirtschaft sind potenziell geringeres Gehalt (40 %), die Notwendigkeit eines Ortswechsels (34 %) und mit 29 % Qualifikationszweifel (Schulz und Trappmann 2023). Wirtschaftliche Schwierigkeiten sowie steigende Kosten für Lebenshaltung und Mobilität können die Bereitschaft, sich aktiv an der sozial-ökologischen Transformation zu beteiligen, deutlich beeinträchtigen (Hickel et al. 2021).

Neben einer sinkenden Bereitschaft, umwelt- und klimapolitische Maßnahmen mitzutragen, führen sinkende Einkommen und Vermögen bei Bürger\*innen auch zu einer Einschränkung der eigenen Investitionsfähigkeit. Weniger verfügbares Einkommen bedeutet einen geringeren finanziellen Spielraum für



notwendige Anpassungen im privaten Bereich, wie etwa die Umrüstung auf Heizsysteme, die auf erneuerbaren Energiequellen basieren, oder die Durchführung von Maßnahmen zur Gebäudeenergieeffizienz. Diese finanziellen Restriktionen limitieren damit die aktive Beteiligung einkommensschwächerer und normal verdienender Haushalte an der notwendigen ökologischen Transformation. Auch aus dieser Perspektive sind daher sinkende Einkommen und Vermögen bei breiten Teilen der Bevölkerung – nicht bei den oberen Einkommensschichten – aus umweltpolitischer Sicht problematisch mit Blick auf die erfolgreiche Bewältigung der sozial-ökologischen Transformation.

## *2. Transformation, wenn Unternehmen wirtschaftlich zunehmend unter Druck geraten*

Die stark exportorientierte deutsche Wirtschaft sah sich schon durch die Covid-19-Pandemie vor erhebliche Herausforderungen gestellt, jüngste geopolitische Veränderungen verschärfen diese jetzt noch einmal. Nach zehn Jahren Wachstum führten 2020 hohe Energiepreise, eine schwache Weltkonjunktur und gestörte Lieferketten zu einer Rezession mit einem Rückgang des BIP um 3,8 %. Die Erholung 2021 mit einem BIP-Anstieg von 3,2 % und 2022 um 1,8 %, trotz des Russisch-Ukrainischen Kriegs und Energiekrise, reichte nicht, um die Verluste auszugleichen; das BIP lag nur 0,7 % über dem von 2019. Für 2023

sank das BIP um 0,3 %, mit einer OECD-Prognose von nur 0,2 % Wachstum für 2024, einem der niedrigsten unter den G20-Staaten. Insbesondere die deutsche Industrie, die einen signifikanten Beitrag zur Wirtschaftsleistung des Landes liefert, ist von den Folgen der Pandemie, den geopolitischen Veränderungen und den globalen Wirtschaftsschwankungen stark betroffen (Dohse et al. 2020; Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) 2023b; Statistisches Bundesamt (Destatis) 2023c; Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2024; Olk 2024).

Mehr als ein Fünftel der nationalen CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland stammt direkt aus der Industrie, insbesondere aus energieintensiven Prozessen wie der Zement- oder Stahlproduktion, wo Emissionen mit aktuellen Technologien schwer zu reduzieren sind (Ariadne Projekt 2023). Die Transformation zu einer klimaneutralen Wirtschaft erfordert daher nicht nur den Umstieg auf erneuerbare Energien, sondern auch signifikante Innovationen, besonders in energieintensiven Sektoren. Angesichts wirtschaftlich schwieriger Zeiten stellt sich die Frage, ob die Investitionsfähigkeit und die Innovationskraft der Unternehmen dazu ausreichen.

2022 erhöhten deutsche Unternehmen ihre Klimaschutzinvestitionen trotz wirtschaftlicher Unsicherheiten um 31 % auf 72 Mrd. Euro, real bereinigt um 18 %, wie KfW Research (2023) berichtet. Klimaschutzmaßnahmen machten 15 % aller Unternehmensinvestitionen aus, mit Schwerpunkten auf klimafreundlicher Mobilität, erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz von Gebäuden. In Reaktion auf die Energiekrise und Preissteigerungen fokussierten sich Unternehmen nicht nur auf Investitionen in erneuerbare Energien, sondern reduzierten auch ihren Energieverbrauch. Mehr als 40 % gaben gestiegene Energiekosten an Kund\*innen weiter, während nur 6 % die Produktion drosselten. Große Unternehmen investierten signifikant in den Klimaschutz, während kleinere Betriebe, belastet durch Unsicherheiten und Profitabilitätseinbußen, ihre Investitionsbereitschaft in diesem Bereich reduzierten, tendenziell kurzfristige Maßnahmen bevorzugten oder nur dringende Investitionen zur Geschäftserhaltung tätigten. Kleinunternehmen finanzierten durchschnittlich 42 % ihrer Klimainvestitionen aus Eigenmitteln, im Gegensatz zu Großunternehmen mit über 90 %. Für KMUs sind daher Bankkredite und Fördermittel wichtiger

für die Finanzierung von Klimaschutzinvestitionen als für Großunternehmen (KfW Research 2023).

Trotz gestiegener Transformationsinvestitionen im vergangenen Jahr besteht weiterhin eine Investitionslücke von etwa 68 Mrd. Euro jährlich, um die notwendigen Klimaschutzmaßnahmen zu finanzieren (KfW Research 2023). Unsicherheiten über die Rentabilität von Klimaschutzinvestitionen und die unzureichende Internalisierung externer Kosten erschweren es Unternehmen, sich für nachhaltige Investitionen zu entscheiden (KfW Research 2023; Fleiter und Rehfeldt 2023).

Wie erwähnt, setzt das Erreichen der Klimaneutralität bis 2045 neben Investitionen auch einen Schub bei Innovationen voraus. Allerdings wird der Innovationsschub durch wirtschaftliche Unsicherheiten und verschlechterte Standortbedingungen behindert (Luderer et al. 2021). Zusätzliche Probleme wie Lieferschwierigkeiten bei Klimaschutztechnologien und Fachkräftemangel verschärfen die Situation und bedrohen die Führungsrolle Deutschlands in zukunftssträchtigen Technologiebereichen (KfW Research 2023). Disruptive Veränderungen, die eine schnelle und effektive Anpassung erfordern, stellen die etablierten Wirtschaftssektoren in Deutschland vor erhebliche Herausforderungen (Ariadne Projekt 2023; Meyer 2023).

Soweit möglich, bedarf es stabiler regulatorischer Rahmenbedingungen, verknüpft mit langfristigen, quantitativen und sektorspezifischen Zielen, um nachhaltiges Wirtschaften attraktiv zu machen. Nur so werden sich Unternehmen aktiv an der Gestaltung einer nachhaltigen Zukunft beteiligen und bereit sein, Risiken für die Entwicklung von Zukunftstechnologien wie Wasserstoff- und Carbon-Capturing-Technologien einzugehen. Gleichzeitig muss der Staat Exnovationen unterstützen, um den Wandel voranzutreiben und sozialverträglich zu gestalten (Jacob et al. 2019).

### *3. Transformation, wenn dem Staat auf allen Ebenen der Staatshaushalt schrumpft*

Die Covid-19-Pandemie markierte einen Wendepunkt in der Fiskalpolitik Deutschlands und der EU: Verstärkte öffentliche Investitionen wurden zur Krisenbewältigung priorisiert. Zur Finanzierung dieser Investitionen erhöhte der Staat seine Verschuldung und setzte temporär die Schuldenbremse aus. Die Schul-



denbremse, die üblicherweise die Nettokreditaufnahme begrenzt, verlangt postpandemisch eine Reduzierung der Schuldenstandsquote zur Sicherstellung von Tilgungen. Angesichts der sozial-ökologischen Transformation und zusätzlicher Krisen bleibt der Bedarf an hohen staatlichen Investitionen jedoch bestehen, was den Druck auf die Fiskalpolitik verstärkt (Bezanoska et al. 2021; Luderer et al. 2021; Grömling et al. 2022). Deutschlands staatliche Investitionen sind im internationalen Vergleich gering, ein Umstand, der die Notwendigkeit einer deutlichen Aufstockung zur Förderung der grünen Transformation betont (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) 2023a; Sievert 2023; Wolff 2023).<sup>36</sup> Begrenzte finanzielle Spielräume drohen jetzt nicht nur die Wirtschaftsleistung, sondern auch die Transformationskapazität zu beeinträchtigen.

Eingeschränkte staatliche Investitionskapazitäten sind ein klares Hindernis für eine wirksame, zukunftsorientierte Umweltpolitik. Deutschland sieht sich mit der Aufgabe konfrontiert, erhebliche Mittel in die sozial-ökologische Transformation zu stecken, einschließlich der Dekarbonisierung der Wirtschaft, der Förderung erneuerbarer Energien, der Bildung,

des Wohnungsbaus und der Modernisierung des Gesundheitssektors (Clemens et al. 2019). Der Bedarf an öffentlichen Investitionen beläuft sich auf geschätzte 457 Mrd. Euro über die nächsten zehn Jahre (Dullien et al. 2021).

Die Konsequenzen begrenzter Investitionskapazitäten sind vielfältig und weitreichend. Eine Verlangsamung bei der Umsetzung erforderlicher Maßnahmen zur Erreichung der Klimaziele kann die Transformation zu einer klimaneutralen Wirtschaft behindern. Dies birgt das Risiko, notwendige Schritte zur Reduktion der Treibhausgasemissionen verspätet oder unzureichend zu initiieren. Zudem stellen eingeschränkte Investitionen ein Versäumnis dar, ökonomische Chancen zu nutzen, die die ökologische Transformation bietet (Luderer et al. 2021). Investitionen in erneuerbare Energien, Energieeffizienz und andere nachhaltige Technologien können signifikantes wirtschaftliches Wachstum und neue Arbeitsplätze schaffen. Die Nichtrealisierung dieser Potenziale aufgrund finanzieller Restriktionen führt zu doppelten Verlusten (Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung 2019).

<sup>36</sup> Deutschland verzeichnete von 2011 bis 2021 lediglich zwischen 2,10 % (2014) und 2,69 % (2020) des BIP in öffentliche Infrastrukturinvestitionen. Der EU-27-Schnitt lag 2021 bei 3,25 % (Janson o.J.).

Studien belegen zudem, dass staatliche Investitionen private Investitionstätigkeit stimulieren, was für die Erreichung der Klimaschutzziele essenziell ist. Jeder Euro öffentlicher Investitionen generiert durchschnittlich 1,50 Euro an privaten Investitionen, besonders in Bereichen wie Bildung, Wohnungsbau und Umweltschutz (Clemens et al. 2019). Eine Reduzierung staatlicher Investitionen würde somit nicht nur den staatlichen Beitrag zur Erreichung der ambitionierten Klimaschutzziele für 2030 und 2045 gefährden, sondern auch die parallel laufenden unternehmerischen Transformationsbemühungen beeinträchtigen (Luderer et al. 2021).

Kritisch zu sehen ist ferner die Gefahr für soziale Gerechtigkeit und öffentliche Gesundheit. Essenzielle Investitionen in den Gesundheitssektor und soziale Dienste stärken die Resilienz gegenüber Umweltkrisen. Eine Vernachlässigung dieser Bereiche aufgrund finanzieller Engpässe kann soziale Ungleichheiten und gesundheitliche Risiken verstärken (Dullien et al. 2021).

Die Bewältigung der bevorstehenden Herausforderungen erfordert die Reduktion umweltschädlicher Subventionen und ihre Umleitung, u. a. in Gestalt eines Transformationsfonds für nachhaltige Investitionen, eine Reform der Fiskalpolitik, die ökologische Investitionen fördert, sowie die Mobilisierung privater Investitionen durch gezielte Anreize. Eine strategische Neuausrichtung der Finanzpolitik ist entscheidend, um die erforderlichen Investitionen für eine nachhaltige Zukunft zu sichern und das volle Potenzial der grünen Wirtschaft zu nutzen. Eine wichtige Funktion dabei hat auch der Sustainable Finance-Beirat. Gleichzeitig werden die Bemühungen zur Stärkung der Finanzierung der Transformation auch derzeit schon wirkungsvoll begleitet durch Aktivitäten auf UN-, G7- und G20-Ebene – Aktivitäten, die auch in der Zukunft fortgesetzt werden sollten.

### Fazit für Umweltpolitik und -forschung

Sofern der derzeitige Trend wirtschaftlicher Unsicherheit anhält, wird es ohne umfassende Änderungen der aktuellen Politik für Bürger\*innen, Unternehmen und den Staat schwierig, die sozial-ökologische Transformation weiter voranzutreiben. Bereits in der jetzigen Situation ist die Akzeptanz dieser Transformation infrage gestellt, weil die Lastenverteilung als ungerecht empfunden wird. Bei weiter zurückgehenden Einkommen bzw. Unternehmensgewinnen wird

sich diese Situation verschärfen. Im Geist der Strategischen Vorausschau gilt es, sich auf mehrere mögliche Zukünfte vorzubereiten und Strategien zu entwickeln, wie eine Transformation gestaltet werden kann, selbst wenn es zu einer anhaltenden Rezession kommen sollte, z. B. mit einer Low-budget-Transformation aus der Krise.

Besonders wichtig ist es, die soziale Frage in den Mittelpunkt der umweltpolitischen und forschungsbezogenen Anstrengungen zu stellen. Umweltpolitik muss sozial verträglich sein und soziale Härten abfedern. Dabei ist es entscheidend, dass die Verursacher\*innen von Umweltbelastungen stärker in die Verantwortung genommen werden. Die Transformation muss allen ermöglicht werden, beispielsweise durch gezielte Förderungen für KMU und durch energetische Sanierungen von Mietwohnungen bei gleichbleibenden Mieten. Negative Umweltfolgen sollten reduziert und gleichmäßiger verteilt werden, um soziale Ungerechtigkeiten zu vermeiden. Dies erfordert gezielte Maßnahmen, um soziale Härten abzufedern und sicherzustellen, dass alle gesellschaftlichen Gruppen von den Vorteilen einer nachhaltigen Entwicklung profitieren können. Umweltpolitik muss auch generationsgerecht sein, indem sie die Bedürfnisse und Rechte zukünftiger Generationen berücksichtigt und eine nachhaltige Lebensgrundlage sichert.

Das breite umweltpolitische Instrumentarium – Umweltsteuern, Förderprogramme, Auflagen und Genehmigungen etc. – hat unterschiedliche Verteilungseffekte. Bei der Auswahl der Instrumente müssen künftig stärker ihre Verteilungseffekte berücksichtigt und Ausgleichsmechanismen mitgedacht werden. Hier besteht auch eine weitere Aufgabe für die Umweltforschung. Es ist essenziell, dass Umweltpolitik integriert gedacht wird, also zusammen mit Sozialpolitik und unter Berücksichtigung von Umweltgerechtigkeit. Eine richtig konzipierte Umweltpolitik kann zur Entlastung gerade der wirtschaftlich schwächeren gesellschaftlichen Gruppen beitragen. Hier sollte auch aktiv der Anschluss an den aktuellen Diskurs zu Verteilungsgerechtigkeit gesucht werden.

Wie dargestellt, gefährden sinkende Einnahmen bei Staat und Unternehmen sowohl die Investitions- als auch die Innovationsfähigkeit am Standort Deutschland. Aber auch der Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit wird gefährdet sein, ebenso wie die Technologieführerschaft, über die Deutschland in vielen Bereichen

verfügt. Eine integriert gedachte Umweltpolitik kann auch einen Beitrag zur Industriepolitik leisten. Besonders zu nennen ist die Exportinitiative Umwelttechnologien (EXI), die gezielt deutsche Green-Tech-Unternehmen unterstützt, ihre innovativen Lösungen international zu vermarkten. Die EXI hilft Unternehmen, neue Märkte zu erschließen, und trägt so zur globalen Verbreitung von umweltfreundlichen Technologien bei, was wiederum positive Rückwirkungen auf die heimische Wirtschaft hat. Diese Ansätze zur Exportförderung wurden wesentlich im Umweltministerium entwickelt.

Diverse umweltpolitische Entscheidungen haben ferner die Basis geschaffen für neue Wirtschaftszweige, wie die Photovoltaik und die Windkrafterzeugung. Damit liegt es auch in den Händen der Umweltpolitik, einen Beitrag zur wirtschaftlichen Stabilität und Zukunftsfähigkeit Deutschlands zu leisten. Die Umweltpolitik in Deutschland hat bereits in Teilen eine wirtschaftliche Erfolgsgeschichte geschrieben. Dies sollte durch entsprechende Informationsarbeit deutlich in den Vordergrund gerückt werden. Gleichzeitig sollte den zukunftsfähigen Industrien, die von der Transformation besonders profitieren, mehr Gehör und Sichtbarkeit verschafft werden. Die Umweltpolitik selbst braucht Verbündete, um die Transformation auch gegen die Transformationsverlierer (z. B. fossile Industrien) durchzusetzen. Dafür muss auch langfristig eine Basis an Unterstützern in der Wirtschaft geschaffen werden. So wie in anderen Politikfeldern Ministerien auch einen sehr engen Schulterschluss mit den jeweiligen Sektoren aufgebaut haben, so sollte dies ebenso im Bereich der Umweltpolitik systematischer und mit einem Blick auf die mittelfristige Zukunft vorangetrieben werden.



## 2.8 Internet der Zukunft

**Trend:** Das Internet, einst ein bahnbrechendes Phänomen der 1990er Jahre, hat unseren Alltag revolutioniert. Von der digitalen Transformation bis zu leistungsfähigen Künstlichen Intelligenzen und Extended Reality-Technologien – die Zukunft des Internets verspricht eine fesselnde Reise durch Innovation und Vernetzung: kein abgegrenzter Raum mehr, sondern ein integraler Bestandteil unseres Alltags. Doch welche aufregenden Wendungen und Herausforderungen wird diese Reise für Mensch und Umwelt mit sich bringen? Wird das Internet derzeit komplett neu erfunden? Welche Rollen spielen Künstliche Intelligenz und das Metaverse und wie könnte das Internet der Zukunft unsere Beziehung zur Umwelt verändern?

### Emerging Issues

- ▶ Neue Endgeräte für das Internet der Zukunft
- ▶ Neue Inhalte: Eintauchen in komplexe, immersive Welten
- ▶ Neue Smartness: Internet und Künstliche Intelligenz

### In Kürze

- ▶ Innovationen wie 5G, Edge Computing, Extended Reality und Künstliche Intelligenz (KI) ebnen den Weg für ein Internet der Zukunft, das von einer zunehmenden Verschmelzung physischer und virtueller Welten geprägt sein könnte. Immersive cyberphysische Welten ermöglichen neue Erfahrungs- und Interaktionsräume mit Echtzeit-Synchronität. Die Gaming-Branche erreicht in derarti-

gen Welten bereits ein Millionenpublikum. Im B2B-Bereich<sup>37</sup> entstehen neue Ansätze wie digitale Fabrikplanung, und virtuelle Meetingräume versprechen neue Formen der Zusammenarbeit. Das Metaverse gilt als ökonomisch attraktiv, allerdings bestehen auch Zweifel bezüglich Realisierbarkeit und Ressourcenverbrauch.

- ▶ Neue Hardware ermöglicht neue Nutzungserfahrungen und die Schaffung neuer Inhalte im Internet der Zukunft. Gleichzeitig entstehen durch die Notwendigkeit neuer Geräte signifikante Umweltfolgen, vor allem hinsichtlich verwendeter Ressourcen, und die neuen Inhalte verbrauchen in ihrer Übertragung, Berechnung und Darstellung erhebliche Mengen an Energie. Immersive Nutzungserlebnisse bieten aber auch Potenziale, Bürger\*innen eindrücklicher als bisher mit Umweltfragen in Verbindung zu bringen.
- ▶ Künstliche Intelligenz kann die Erstellung aufwendiger Inhalte für das Internet der Zukunft entscheidend prägen bzw. überhaupt erst in einem Umfang ermöglichen, der für die Vision eines Metaverse vonnöten wäre. Auch

<sup>37</sup> „Business-to-Business“ bezeichnet Geschäftsbeziehungen zwischen Unternehmen.

bei der energieeffizienten Gestaltung des Internets und seiner Infrastruktur bietet KI verschiedene Potenziale zur Entfaltung positiver Umweltwirkungen, denen jedoch der erhebliche Ressourcenverbrauch von KI-Anwendungen gegenübersteht.

## Hintergrund

Auch mehr als 15 Jahre nach der Einführung der ersten bahnbrechenden Smartphones (2007, Apple iPhone) und der folgenden Entwicklung hin zum mobil nutzbaren Internet schreitet die digitale Vernetzung beständig voran. Neue Endgeräte wie haptische Handschuhe oder Anzüge versprechen in Verbindung mit VR-/AR-Technologie das mit verschiedenen Sinnen erlebte Eintauchen in komplexe, digitale Welten, die mit großem Aufwand von Unternehmen entwickelt werden. Das wohl bekannteste Beispiel: das von Mark Zuckerbergs Digitalkonzern Meta entwickelte Metaverse. Dabei handelt es sich um einen Virtual Reality (VR)-Raum, der es den Nutzenden ermöglicht, in einer computergenerierten 3D-Umgebung miteinander zu interagieren (Peters et al. 2022).<sup>38</sup> Zudem verändern Anwendungen auf Grundlage generativer Künstlicher Intelligenz, wie ChatGPT oder Midjourney, die Nutzungsmöglichkeiten des Internets rasant und machen es leichter zugänglich (Jetzke et al. 2019a). Dabei sind wesentliche Elemente des Internets der Zukunft bereits heute angelegt und entsprechende Technologien stehen schon auf einem hohen Reifegrad (Technology-Readiness-Level, TR-Level) zur Verfügung (Peters et al. 2022).

### *Internet der Zukunft als immersiver cyberphysischer Raum*

Wie das Internet der Zukunft im Detail aussehen wird, bleibt offen. Es zeichnet sich jedoch ab, dass es ein zunehmend immersiver cyberphysischer Raum sein könnte, der über die Weiterentwicklung und Verschmelzung bereits bestehender sowie neuer Technologien entsteht. „Immersiv“ könnte das Internet deshalb werden, weil sich die bislang häufig getrennt betrachteten Sphären von digitaler und analoger Welt zunehmend vermischen. Die gegenwärtigen Entwick-

lungstrends deuten darauf hin, dass Nutzer\*innen im Internet der Zukunft mit immer mehr Sinnen in cyberphysische Räume eintauchen werden, als wir bislang das Internet erfahren. Große Techunternehmen wie Meta (ehemals Facebook), Microsoft und Alphabet (ehemals Google) haben sich zum Ziel gesetzt, derartige Welten zu gestalten, und geben mit ihren Pionierleistungen sowie Investitionen Hinweise darauf, wie sich das Internet der Zukunft entwickeln könnte (Peters et al. 2022).

Seinen Anfang nahm das Internet Ende der 1970er Jahre, als erste virtuelle Interaktionsräume entstanden. Mitte der 1980er Jahre konnten digitale Spielwelten bereits erstmals mit Avataren – die Spieler\*innen repräsentierende virtuelle Charaktere – erkundet werden (Downey 2014). Die 1990er Jahre brachten international den Durchbruch für Personal Computer und stationäres Internet. Über ISDN (Integriertes Sprach- und Datennetz) konnten Nutzer\*innen erstmals von Zuhause auf Webseiten zugreifen. Der Onlinehandel nahm seinen Anfang und das Zeitalter der E-Mail-Kommunikation war geboren. Die 2000er Jahre waren sehr stark vom Fortschritt in der Mobilfunktechnik geprägt. Internetfähige Mobilfunkgeräte eroberten mit der UMTS-Technologie (Universal Mobile Telecommunications System) den Massenmarkt. Damit einher ging ein Boom sozialer Medien wie MySpace, StudiVZ und Facebook. Leistungsfähigere Mobilfunkstandards wie LTE und 5G verstärken den Trend ebenso wie die Weiterentwicklung von Smartphones, nutzerzentrierte Apps mit Echtzeitdatenübertragung und weiteren Funktionen wie Geopositioning, z. B. Google Maps (Resnick o.J.).

### *Konturen des Internets der Zukunft werden sichtbar*

In den weiteren 2020er Jahren dürften die genannten technologischen Grundlagen das Internet weiter in Richtung einer immersiven cyberphysischen Welt verändern:

- ▶ Niedriglatente Netzwerke (5G) schaffen die Voraussetzung für Echtzeit-Synchronität zwischen virtueller und physischer Welt. Latenz bezeichnet den Zeitraum zwischen einem Ereignis und der darauffolgenden Reaktion. Je geringer die Ver-

<sup>38</sup> „Metaverse“ ist nicht auf die Entwicklung des Unternehmens Meta beschränkt. Auch andere Unternehmen wie beispielsweise Microsoft und Autodesk sind in diesem Bereich aktiv und bieten eigene Metaverse-Welten an. Im Folgenden wird „Metaverse“ verwendet, um virtuelle Welten zu beschreiben, in denen Nutzende durch Avatare interagieren – unabhängig vom jeweiligen Entwickler/Anbieter.

zögerung, desto realer werden virtuelle Welten wahrgenommen.

- ▶ Edge Computing – leistungsfähige digitale Endgeräte mit hoher Rechenleistung – ermöglicht eine lokale Erfassung, Speicherung und Verarbeitung von Daten. Das Computing findet nicht mehr in zentralen Rechenzentren statt, sondern immer mehr dort, wo die Daten entstehen, z. B. auf dem Smartphone. Damit entstehen kürzere Datenwege, was die Effizienz erhöht und die Latenz weiter verkürzt. Das bildet eine weitere Grundlage für Echtzeit-Synchronität (Elmasry et al. 2022).
- ▶ Künstliche Intelligenz (KI) (große Sprachmodelle, Bild-, Objekt-, Bewegungserkennung) ermöglicht technischen Systemen, Sinneseindrücke ganzheitlich zu erfassen und direkt auf die individuellen Bedarfe von Nutzer\*innen zu reagieren. Grundsätzlich basiert KI auf Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik. Daten werden eigenständig erfasst, als Wissen gespeichert, miteinander abgeglichen, logisch weiterentwickelt und zur Lösung spezifischer Problemen fast in Echtzeit eingesetzt. Moderne, generative KI kann nicht mehr nur einfache Wenn-Dann-Abläufe (sog. regelbasierte Prozesse) automatisieren. Sie ist auch in der Lage, für komplexe Fragestellungen eigenständige Lösungswege zu entwickeln – siehe etwa ChatGPT-Textausgaben. Generative KI wird immer besser darin, menschliche Denkmuster nachzuahmen. Im Gegensatz zum Menschen haben KI-Anwendungen jedoch keinen direkten Zugriff auf Weltwissen. KI ist immer nur so gut wie die Daten, die ihr durch Bild-, Objekt-, Bewegungs-, Gesichts- und Spracherkennung zur Verarbeitung zur Verfügung stehen (Peters et al. 2022; Seemann 2023).
- ▶ Extended Reality – dazu zählen Augmented Reality, Virtual Reality und Mixed Reality – ermöglicht interaktive Erfahrungen in computergenerierten Welten. Extended Reality (XR) bildet den Sammelbegriff für Technologien, die immersive Erlebnisse mit unterschiedlichen Anteilen realer und digitaler Informationen zusammenbringen. Bei Augmented Reality (AR) wird die physische Welt mit digitalen Informationen wie Bild, Sprache und Animation angereichert, z. B. Pokémon Go. Bei Virtual Reality (VR) tauchen Nutzer\*innen vollständig in eine digital simulierte Umgebung

ein, etwa mittels Oculus Rift-Headset von Meta. Die Mixed Reality (MR) führt in eine Welt, in der physische und digitale Objekte nebeneinander existieren und miteinander interagieren können, z. B. mittels HoloLens 2-Brille von Microsoft.

### *Physische und virtuelle Lebens- und Arbeitswelten verschmelzen zunehmend*

Im Business-to-Consumer-Bereich (B2C) sind immersive cyberphysische Angebote derzeit v. a. im Gaming-Sektor präsent. Das kooperative Computerspiel Fortnite konnte 2023 rund 500 Mio. Nutzende erreichen (Tenzer 2024). Die in 3D realisierte Spielwelt Roblox erreichte 2021 täglich knapp 50 Mio. Nutzende. Cyberphysische Welten der Gaming-Industrie sind allerdings keinesfalls auf klassische Spieleinhalte beschränkt. Vielmehr bieten sie auch Musiker\*innen digitale Bühnen vor Millionenpublikum. Beispielsweise erreichte der Rapper Travis Scott 2020 mit einem virtuellen Avatar-Auftritt in der Spielwelt Fortnite Berichten zufolge gut 12 Mio. Zuschauer\*innen (SPIEGEL Online 2020). Darüber hinaus werden Unternehmen im Metaverse immer präsenter. Sie zeigen sich mit eigenen, virtuellen Filialen, um Aufmerksamkeit für ihre Marke zu erzeugen und den Absatz ihrer physischen wie virtuellen Produkte anzukurbeln (E-Commerce). Der Online-Shop herrenaustatter.de bietet Kund\*innen in seiner 3D-Filiale die Möglichkeit, Produkte virtuell zu erkunden und anzuprobieren. Bei Kaufinteresse kann zwischen Kryptowährung und klassischem digitalen Zahlverfahren gewählt werden. Die Lieferung wird dann wie im herkömmlichen Online-Handel abgewickelt (Thieme 2022). Neben Gaming, Entertainment und E-Commerce bietet das Metaverse auch Einsatzmöglichkeiten im Bereich Tourismus. Nutzer\*innen können virtuell Orte besuchen, die ihnen im realen Leben nicht zugänglich sind bzw. die geschützt werden sollen. Anwendungsfälle sind bisher jedoch noch selten (Zeit Online 2022; Constantin et al. 2023).

Im Business-to-Business-Bereich (B2B) sind immersive cyberphysische Lösungen vergleichsweise weniger verbreitet. Es zeigen sich jedoch erste Ansätze und Konzepte. So haben beispielsweise BMW und NVIDIA mit Omniverse 2021 ein Tool vorgestellt, das eine vollständig digitale, fotorealistische Planung von Fabriken ermöglicht. Bereits existierende Fabriken werden als digitale Zwillinge zugänglich gemacht und neue Fabriken komplett virtuell geplant und simuliert. Ähnliche Tools sollen es Mitarbeitenden zu-



künftig ermöglichen, in virtuellen Arbeitsumgebungen gemeinsam an neuen Produkten zu arbeiten, unabhängig vom Standort einzelner Personen (Autodesk 2022).

Bereits seit der Covid-19-Pandemie boomt der Markt für virtuelle Meetingräume. Die Zusammenarbeit in hybriden Teams ist in weiten Teilen der Arbeitswelt nicht mehr wegzudenken. Etablierte Videokonferenz-Software könnte in Zukunft durch immersive Meeting- und Kollaborationsräume ergänzt oder gar ersetzt werden. Meta bietet bereits erste entsprechende virtuelle Arbeitsumgebungen in seinem Metaverse (meta o. J.). Auch im Bildungsbereich zeigen sich neue Anwendungsfelder. Lernende könnten in virtuelle Lernumgebungen eintauchen und beispielsweise Montagearbeiten trainieren, ohne physisches Material zu verschleifen oder zu verbrauchen (Werrlich et al. 2017; WBS TRAINING o.J.).

#### *Metaverse – Goldgrube oder Milliardengrab?*

Von einigen Unternehmen werden immersive cyberphysische Welten insbesondere unter dem Schlagwort „Metaverse“ vielfach als ein ökonomisch attraktives Entwicklungsfeld gesehen. Dass diesbezüglich eine

Aufbruchsstimmung herrscht, lässt sich an entsprechenden Kennzahlen klar ablesen. So verdoppelten sich von 2021 auf 2022 die weltweiten Investitionen in die Entwicklung des Metaverse auf rund 120 Mrd. US-Dollar (Elmasry et al. 2022). Dabei ist auffällig, dass insbesondere große, globale Techunternehmen sehr viel Geld investieren, um eigene cyberphysische Infrastrukturen aufzubauen, neue Märkte zu kreieren und diese frühzeitig zu besetzen.

Allerdings ist keinesfalls sichergestellt, dass sich aktuelle Investitionen langfristig auszahlen werden. Es mehren sich Zweifel, ob sich die futuristischen Visionen von Mark Zuckerberg und anderen CEOs tatsächlich in der Praxis realisieren lassen. Es ist schwer abzuschätzen, ob Kund\*innen und Nutzer\*innen das Metaverse als wirklichen Mehrwert erachten und in der Breite annehmen werden. Wie jede andere Innovation, muss sich auch das Metaverse gegenüber bereits existierenden Angeboten und Routinen durchsetzen. Doch ist das Interaktionserlebnis in Metaverse-Umgebungen tatsächlich so viel besser als in herkömmlichen, desktopbasierten digitalen Netzwerken (Hurtz o.J.; Peters 2023)?

Ein zentrales Argument, das gegen einen zeitlich absehbaren Durchbruch des Metaverse angeführt wird, ist die noch nicht ausreichende Technologiereife. So stelle die Verbindung von physischer und virtueller Realität mit klobigen XR-Headsets und Grafiken, die nicht die erwartete futuristische Qualität erreichen, eine erhebliche Hürde dar. Außerdem heben Kritiker hervor, dass das Metaverse für die Durchschnittsnutzer\*in derzeit wenig bietet, was in der realen Welt nicht einfacher oder besser erledigt werden könnte (Hermann 2022; Rapoza o.J.).

Setzen sich immersive cyberphysische Welten jedoch durch, so ist von großen Wachstumspotenzialen auszugehen. McKinsey schätzt den Metaverse-Markt bis 2030 auf bis zu 5 Bio. US-Dollar, wenn es gelingt, umfangreiche Geschäftsmodelle, Produkte und Dienstleistungen im B2B- sowie B2C-Bereich einzuführen (Elmasry et al. 2022).

### *Blick in die Zukunft*

Klare Vorstellungen und ausgearbeitete Szenarien über die mögliche künftige Entwicklung des Internets bestehen in dieser Form bislang nicht. Seit den 1990er Jahren werden Vorstellungen immersiver Welten nicht zuletzt durch populärkulturelle Werke aus Literatur (etwa der Roman „Snow Crash“, der 1992 das Metaverse beschreibt) und Filmkunst (z. B. die Matrix-Filme) geprägt.

Die gegenwärtigen Vorstellungen einer zukünftigen Evolution des Internets in Richtung eines immersiven, cyberphysischen Raums werden vor allem sektorspezifisch geprägt.

So unterscheiden sich potenzielle Erscheinungsformen des Internets der Zukunft derzeit vor allem nach Anwendungskontexten (Peters 2023). Im Bereich E-Commerce ist zu erwarten, dass der Point of Sale (POS)<sup>39</sup> im Zentrum weiterer Entwicklung stehen wird. Hier stellt sich die Frage, ob es mit dem Metaverse langfristig gelingen wird, eine Einkaufserfahrung zu kreieren, die zahlkräftige Kund\*innen in nennenswerter Zahl in ihre virtuellen Filialen lockt. Es ist anzunehmen, dass Erfolg und Misserfolg an dieser Stelle nicht zuletzt von der Weiterentwicklung digitaler Endgeräte, der Einbettung von KI und der Grafikqualität von XR-Brillen abhängen werden. Ge-

rade für Gesundheitswesen (Healthcare Metaverse) und Industrie (Industrial Metaverse) ist der Umgang mit sensiblen Daten von besonderer Relevanz. Was kann vor dem Hintergrund der Gefahr des Datenmissbrauchs – beispielsweise in Form von Deep Fakes – mit gutem Gewissen geteilt werden? Werden Patient\*innen in der Breite der Gesellschaft bereit sein, relevante Gesundheitsdaten über Wearables – z. B. smarte Uhren, Armbänder, Ringe – von kommerziellen Anbietern tracken zu lassen? Dies wird sicherlich nicht zuletzt vom Vertrauen in Anbieter und von bestehenden Datenschutzrichtlinien abhängen.

Im Folgenden Abschnitt werden die Emerging Issues des Internets der Zukunft mit Fokus auf ihre Umweltwirkungen behandelt.

1. Welche Folgen hat der Bedarf an neuer Hardware für die Umwelt?
2. Wie verändern sich Inhalte im Internet der Zukunft, und welche Chancen und Risiken lassen sich für die Umwelt und Umweltpolitik identifizieren?
3. Welche Auswirkungen hat der Trend hin zu mehr Smartness und KI-Anwendungen?

### **Emerging Issues**

Zur Teilhabe am Internet der Zukunft benötigen Nutzer\*innen neuartige oder verbesserte Endgeräte, mit deren Hilfe neue Inhalte und Anwendungen die Grenzen zwischen realer und virtueller Welt verschwimmen lassen und neue Dimensionen des Online-Erlebens eröffnen. Die aufgezeigten Entwicklungen haben das Potenzial, sich in erheblichem Ausmaß auf die Umwelt auszuwirken: insbesondere durch den gesteigerten Bedarf an Ressourcen und Energie für Herstellung und Betrieb der benötigten Geräte und Infrastrukturen sowie durch erhöhten Datenverkehr, der durch diese neuen, datenintensiven Inhalte und Anwendungsfälle entsteht. Gleichzeitig entstehen auch Chancen und Potenziale, die sich positiv auf die Umwelt auswirken können.

#### *1. Neue Endgeräte für das Internet der Zukunft*

Um virtuelle Inhalte so realistisch und reaktiv darzustellen, dass sich die Interaktion mit ihnen natürlich anfühlt, muss die verwendete Hardware so gestaltet sein, dass annähernd in Echtzeit sowohl Informatio-

<sup>39</sup> POS wird im Deutschen meist mit „Verkaufspunkt“ oder „Verkaufsort“ übersetzt. Er beschreibt den Ort, an dem eine Transaktion stattfindet.

nen an die Nutzer\*innen weitergegeben als auch ihre Eingaben aufgenommen und verarbeitet werden können. Um dies in Verbindung mit Online-Inhalten zu gewährleisten, muss eine besonders niedriglatente Netzwerkanbindung vorhanden sein (5G-Netzwerk). Zudem muss die Hardware leistungsfähig genug sein, um die notwendigen Berechnungen zur Darstellung der virtuellen Inhalte und ihrer Reaktivität durchzuführen (Edge Computing).

Viele der Technologien, die das Internet der Zukunft prägen könnten, existieren bereits. Im Bereich der Endgeräte sind hier insbesondere VR-/AR-Brillen und -Headsets zu nennen, die für gesteigerte Immersion und erweiterte Interaktionsmöglichkeiten mit zusätzlichem Zubehör wie haptischen Anzügen und Handschuhen oder Laufplattformen ergänzt werden können. Diese Technologien ermöglichen es, virtuelle Welten und Inhalte nicht nur zu sehen und zu hören, sondern auch auf haptischer Ebene mit virtuellen Objekten und Umgebungen zu interagieren: Entsprechende Handschuhe ermöglichen es etwa, virtuelle Gegenstände mit Handgesten zu berühren und zu manipulieren und dabei ein haptisches Feedback an die Hände der Nutzer\*in zu übertragen. So soll das Gefühl erzeugt werden, einen realen Gegenstand in der Hand zu halten.<sup>40</sup> Ähnliche Ansätze werden auch mit Anzügen verfolgt, die entsprechende Sinneswahrnehmungen am ganzen Körper simulieren (Min o.J.). Um die Bewegung in virtuellen Welten möglichst immersiv abzubilden, produzieren diverse Hersteller inzwischen zudem VR-Laufmatten oder -bänder. Auf diesen können Nutzer\*innen wie in der realen Welt gehen, laufen und springen, und ihre Bewegungen werden in die virtuelle Welt übertragen (Fink o.J.). Zunehmend wird in VR-Headsets auch Eyetracking eingesetzt, bei dem mittels Sensoren die Augenbewegungen erfasst werden. Dies kann genutzt werden, um hochauflösende Inhalte effizienter genau dort zu berechnen, wo die Nutzer\*in hinsieht, aber auch, um etwa eine rein blickgesteuerte Bedienung von Benutzeroberflächen zu ermöglichen und so beispielsweise zur Barrierefreiheit virtueller Räume beizutragen (Adhanom et al. 2023).

Der Absatz von XR-Hardware steigt global an: Für das Jahr 2028 wird weltweit ein Absatz von 22,9 Mio. AR-/VR-Brillen prognostiziert, ein Anstieg um 259 %

im Vergleich zu 2022 mit 8,83 Mio. (Statista GmbH 2024e). Für haptische Hardware wird ein Wachstum des globalen Marktes von 10,22 Mrd. Euro (2022) auf 23,8 Mrd. Euro im Jahr 2030 erwartet, mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 11,4 % (Precedence Research 2023). Wie auch bei anderen Elektronikprodukten, werden für die Produktion und den Betrieb von XR-Hardware erhebliche Mengen an Energie und Ressourcen benötigt. Da die verwendete Hardware in der Regel nur teilweise recyclebar ist bzw. recycelt wird, trägt diese Entwicklung zudem zur Entstehung großer Mengen an Elektroschrott bei (Majkowska o.J.). Exakte Daten zum ökologischen Fußabdruck von XR-Hardware sind gegenwärtig rar; Meta gibt beispielsweise im Nachhaltigkeitsbericht für 2023 zwar an, Lebenszyklusanalysen für seine Hardware-Produkte erstellt zu haben (meta 2023; S. 30), veröffentlicht diese aber bisher nicht separat. Eine Untersuchung von Huawei aus dem Jahr 2017 legt nahe, dass insbesondere die Verwendung von Gold in den elektronischen Bauteilen sowie die bei der Produktion verwendete Energie negative Umweltwirkungen verursachen (Andrae 2017).

Neben neuen End- und Peripheriegeräten werden sich auch bereits flächendeckend genutzte Technologien an die neuen Entwicklungen anpassen, was in der Regel mit dem Austausch durch neuere Modelle einhergeht. So gibt Vodafone Deutschland an, dass im Jahr 2023 bereits 43 % aller im eigenen Netz betriebenen Smartphones 5G unterstützen – im Vorjahr lag diese Quote noch bei 26 %, es wurde also eine erhebliche Anzahl von Geräten ausgetauscht bzw. neu ans Netz genommen (Hassa 2023). Für 2028 wird erwartet, dass 5,1 Mrd. Menschen ein Smartphone nutzen (Degenhard 2024). In den USA werden Smartphones gegenwärtig nach durchschnittlich ca. drei Jahren ausgetauscht (Statista GmbH 2023c). Diese kurze Lebensdauer stellt ein Problem für die Umwelt dar, weil Smartphones bei ihrer Herstellung erhebliche Mengen an Ressourcen verbrauchen und Emissionen verursachen (Cordella et al. 2021). 83 % der Emissionen, die für ein einzelnes Smartphone freigesetzt werden, fallen für Produktion, Versand und Nutzung im ersten Jahr nach Anschaffung an (Lee et al. 2021). In den vergangenen Jahren zeichnet sich ein Trend zur längeren Nutzung von Smartphones durch die User ab (Lee et al. 2021); längere Nutzungszyklen wür-

<sup>40</sup> <https://teslasuit.io/>

den den Bedarf an neuer Hardware und entsprechend den ökologischen Fußabdruck des Sektors reduzieren (Cordella et al. 2021). Steigende Hardwareanforderungen im Internet der Zukunft können diesem Trend aber entgegenwirken und Anreize zum Austausch vorhandener Hardware setzen – was mit jedem ersetzten Smartphone neuen Elektroschrott erzeugt, neue Ressourcen beansprucht und Emissionen freisetzt.

Um die beschriebenen Entwicklungen möglich zu machen, ist auch ein erheblicher Zuwachs an digitaler Infrastruktur notwendig (Sendemasten, Rechenzentren etc.), sodass sich der ökologische Fußabdruck der neuen Technologien nicht nur auf die neuen Endgeräte beschränkt. Zusätzlich zu Kosten und Umweltfolgen der Herstellung fallen weitere Emissionen und Energieverbrauch für den Betrieb an. 5G-Netzwerke operieren grundsätzlich deutlich stromsparender als noch LTE-/4G-Netze: Pro transportierter „Traffic Unit“ wird bis zu 90 % weniger Energie verbraucht (Nokia 2020). Dieser Effekt wird allerdings durch einen zu erwartenden Reboundeffekt negiert. Aufgrund der deutlich höheren notwendigen Dichte der 5G-Infrastruktur und eines zu erwartenden erheblichen Anstiegs an Traffic (siehe Emerging Issue 2) wird damit gerechnet, dass der Energiebedarf des 5G-Sektors vier- bis fünfmal so hoch ausfallen könnte wie jener des 4G-Netzes (VIAVI Solutions 2023). Edge Computing könnte durch die Verringerung der anfallenden Übertragungsmenge an Daten und notwendiger Server-Infrastruktur dazu beitragen, dieser Entwicklung entgegenzusteuern – allerdings nur, wenn der Energieverbrauch der nun weniger ausgelasteten Datenzentren entsprechend reduziert wird (Frąckiewicz o.J.). Zudem reduziert Edge Computing zwar die benötigten Rechen- und Übertragungsleistungen in der Cloud, befördert durch die Verteilung der Rechenleistung auf eine Vielzahl von Endgeräten mit begrenzter Nutzungsdauer (siehe oben) aber ebenso die Problematik des anfallenden Elektronikschrotts (Frąckiewicz o.J.). Auch hier könnte eine Zunahme der insgesamt notwendigen Energiemenge aufgrund des anfallenden Traffics, etwa wegen steigender Nutzer\*innenzahlen im Metaverse, die möglichen Energie- und Emissionseinsparungen deutlich übertreffen.

Neben den konkreten Umweltauswirkungen birgt der Bedarf an neuer Hardware die Gefahr, dass sich die bereits heute bestehende Kluft zwischen denjenigen,

die sich den Zugang zum Internet leisten können, und denjenigen, deren wirtschaftliche oder sonstige Situation eine digitale Teilhabe erschwert oder unmöglich macht, weiter vertieft (Lacey 2023). Dies betrifft etwa auch Menschen mit Behinderungen (Glencross et al. 2021) und ältere Personen (Mubarak und Suomi 2022). In einer zunehmend digitalisierten Gesellschaft ist die konstante Nutzung des Internets für die gesellschaftliche Teilhabe unerlässlich, und eine Nichtnutzung führt zu gravierenden sozialen und ökonomischen Benachteiligungen (Schelisch und Spellerberg 2021). Während sich Smartphones in den vergangenen Jahren weltweit immer mehr verbreiten (siehe Emerging Issue 1) und immer mehr Menschen den Zugang zum Internet ermöglichen, kann eine Verschiebung hin zu neuer, teurer Hardware die Digitalisierungsfortschritte der Vergangenheit zunichtemachen und dazu führen, dass (vorerst) nur privilegierte Gruppen Zugang zum Internet der Zukunft haben.

### *2. Neue Inhalte: eintauchen in komplexe, immersive Welten*

Das Aufkommen neuer Technologien und die Verfügbarkeit von Geräten, die neue Nutzungsmöglichkeiten eröffnen, werden die Inhalte im Internet der Zukunft verändern. Schnellere Datenübertragung und -verarbeitung ermöglichen nicht nur die Kommunikation untereinander, sondern auch die Interaktion mit Inhalten in Echtzeit. XR-Technologien machen das Eintauchen in virtuelle Welten realistischer als je zuvor, und Innovationen im Bereich der Künstlichen Intelligenz werden die Inhalte des Internets in Zukunft ebenfalls maßgeblich beeinflussen.

Zwischen der Verbreitung neuer Inhaltsformen und neuer Hardware besteht eine enge Wechselwirkung: Die skizzierten Inhalte sind nur mit geeigneter Hardware umsetzbar und nutzbar, attraktive Nutzungserlebnisse sind aber ebenso Voraussetzung dafür, dass auf Seite der Kund\*innen eine ausreichende Nachfrage entsteht und sich die entsprechende Hardware am Markt etabliert. In diesem Zusammenhang werden vor allem Anwendungen relevant, die die einzigartigen Eigenschaften und Möglichkeiten der neuen Endgeräte nutzen und nur mit diesen genutzt werden können (Lee et al. 2022).

VR-Inhalte eignen sich weniger für Anwendungen, die kontinuierliche und präzise Bedienung durch die Nutzer\*innen benötigen, wie das Schreiben von Texten. Stattdessen sind Inhalte relevanter, die über eine

Erfassung von Bewegungen der Hände, der Augen und des gesamten Körpers bedient werden können. Auch die Nutzung von zusätzlichen Steuerelementen wie Game-Controllern, Lenkrädern etc. ist möglich. Gegenwärtige Hardware-bedingte Einschränkungen der VR-Technologie machen besonders jene Anwendungen attraktiv, deren Nutzungsdauer auf kürzere Zeiträume ausgelegt ist, da stundenlange Sessions wegen begrenzter Akkuleistungen der Headsets sowie Ermüdung seitens der Nutzenden schwierig umsetzbar sind (Lee et al. 2022). Zukünftige Hardware-Innovationen und -Optimierungen könnten diese Probleme verringern und damit auch längere Nutzung ermöglichen, was wiederum die umsetzbaren Inhalte beeinflusst. Expert\*innen gehen davon aus, dass sich XR-Inhalte künftig vor allem als Mischformen aus echter Welt und digitalen Inhalten herausbilden werden. Dies wird nicht zuletzt mit den sensorischen Einschränkungen in rein virtuellen Umgebungen begründet, die auch durch neue Endgeräte nicht vollkommen ausgeräumt werden können, beispielsweise beim Geschmacks- und Geruchssinn (Anderson und Rainie 2022; S. 43).

Die Spanne denkbarer Inhalte ist angesichts der skizzierten Innovationen fast unbegrenzt und umfasst realistische Nachbildungen realer Gegenstände und Umgebungen ebenso wie künstlerische oder kom-

merzielle Neuschöpfungen. So könnten etwa Einrichtungshäuser zukünftig virtuelle Services anbieten, die das Betrachten neuer Einrichtungsgegenstände und Möbel in der eigenen Wohnung dreidimensional und realistisch ermöglichen – inklusive Tastproben neuer Oberflächen etc. und anschließender Kaufoption innerhalb der digitalen Oberfläche. Ebenso könnten digitale Räume für Zusammenkünfte lokal voneinander entfernter Personen genutzt werden, sei es in geschäftlichen oder privaten Kontexten. Anders als in herkömmlichen Videoanrufen könnten die Teilnehmenden hierbei jedoch gemeinsam interaktive, immersive Inhalte erleben, etwa Begehungen von Produktionsstätten, den Besuch eines digitalen Museums, von Kinos oder eine nachgebildete Naturerfahrung (siehe unten).

5G wird mit deutlich höheren Übertragungsraten dafür sorgen, dass der Trend zu hochauflösenden Video-, Musik- und anderen Streaming-Inhalten weiter anhält bzw. sich hin zu vollständig ladezeitfreien Erlebnissen der Nutzer\*innen entwickelt (Arora o.J.). Die Kombination aus niedriglatenter Übertragung und hoher Rechenkapazität von Edge-Computing-Endgeräten ermöglicht es den Anbietern darüber hinaus, hochgradig personalisierte und reaktive Inhalte an die Nutzer\*innen auszuspielen (Arora o.J.). Diese Inhalte können in Echtzeit kollaborativ konsu-



miert oder interaktiv genutzt werden (Cherukuri o.J.). Es wird angenommen, dass sich global betrachtet der durchschnittliche Datenverbrauch pro Smartphone von 21 Gigabyte/Monat (2023) auf 56 Gigabyte/Monat im Jahr 2029 erhöhen wird; der weltweite monatliche Durchsatz mobiler Daten soll von 130 Exabyte<sup>41</sup> im Jahr 2023 um ca. den Faktor drei auf 403 Exabyte im Jahr 2029 ansteigen (Ericsson 2023). In dieser Prognose ist ein Anstieg wegen der zunehmenden Nutzung von XR bereits einkalkuliert: Sollte das Wachstum des XR-Marktes das angenommene Maß überschreiten, ist mit einem entsprechend stärkeren Anstieg der mobilen Datennutzung zu rechnen (Ericsson 2023). Zwar ist das 5G-Netz energiesparender als bisherige Übertragungstechnologien (siehe oben), ein derartiger Anstieg der Datenmengen kann unter dem Strich aber zu einem im Vergleich zur Gegenwart deutlich erhöhten Energieverbrauch führen – mitsamt der damit verbundenen Umweltwirkungen.

Inhalte im Metaverse bringen angesichts ihrer immersiven, aufmerksamkeitsbindenden Natur die Gefahr mit sich, dass Nutzer\*innen Desinformationen eher für glaubhaft halten (Peters 2023). Im Umweltkontext kann dies den Erfolg der Nachhaltigkeitstransformation erschweren, wenn Inhalte beispielsweise wissenschaftliche Fakten falsch wiedergeben, Klima- und Naturschutzmaßnahmen in ein falsches Licht rücken oder Personen, die sich für Umweltbelange einsetzen, diskreditieren (siehe Kapitel 2.9). Die Immersivität des Mediums kann aber auch für die Vermittlung von Umweltthemen genutzt werden (Spangenberg et al. 2022; Meijers et al. 2023; Newton et al. 2023; Thoma et al. 2023; Yavo-Ayalon et al. 2023). Hier sind verschiedene Optionen denkbar:

- ▶ Extended Reality macht die Natur der Erde immersiv erlebbar, unabhängig vom Standort der Nutzer\*innen. Dieser Ansatz kann Empathie wecken und die Bereitschaft stärken, die Umwelt durch eigenes Handeln zu schützen. Das Unternehmen „Habitat XR“ bietet beispielsweise XR-Touren durch verschiedene Lebensräume an und ermöglicht die digitale Begegnung mit Nashörnern im Tschad, Gorillas in Ruanda oder Gürteltieren in der Kalahari-Wüste.<sup>42</sup> Bis zu einem gewissen Grad könnten solche Erlebnisse auch reale Urlaubs-

reisen ersetzen oder ergänzen und Emissionen einsparen (Lee et al. 2022).

- ▶ XR wird bereits heute eingesetzt, um Szenen aus der Vergangenheit erlebbar zu machen (Barbara 2022). Auf diese Weise kann dem Problem des „Shifting Baseline Syndroms“ begegnet werden: Zunehmende Umweltzerstörung führt dazu, dass sich die gesellschaftlichen Grenzen eines akzeptablen Zustands der Natur immer weiter nach unten verschieben – Angehörige jeder neuen Generation nehmen die von ihnen vorgefundenen Bedingungen als normal an, auch wenn diese bereits degradiert sind (Soga und Gaston 2018). Mithilfe von Extended Reality kann der Zustand der Natur zu früheren Zeitpunkten dargestellt werden, so dass beispielsweise heute 20-Jährige eine Umwelt erleben können, in der noch nicht mehr als 75 % der Biomasse fliegender Insekten verschwunden ist (Hallmann et al. 2017). Abstrakte Statistiken über den Zustand und die Veränderungen unseres Planeten können so mit Leben gefüllt und die Dringlichkeit eines entschlossenen Handelns gegen Klimawandel und Artensterben eindrücklich vermittelt werden.
- ▶ Schließlich kann XR auch genutzt werden, um Menschen die Gefahren des Klimawandels vor Augen zu führen, indem die Prognosen bekannter Klimamodelle, z. B. des IPCC, in plastischen Erlebnisräumen modelliert werden. Yavo-Ayalon et al. (2023) zeigten beispielsweise Einwohner\*innen von Roosevelt Island (New York, USA) Modellierungen möglicher Überflutungen in VR und konnten im Anschluss ein gesteigertes Bewusstsein für die Gefahren des Klimawandels und eine höhere Motivation für Gegenmaßnahmen messen. In Zukunft könnten solche Erfahrungen für eine Vielzahl von Orten generiert und online verfügbar gemacht werden.

Zudem könnten die Möglichkeiten der präzisen individuellen Ansprache von Nutzer\*innen durch personalisierte Inhalte neben der wirtschaftlichen Nutzung durch Werbung etc. auch für die Umweltbildung genutzt werden, um Botschaften und Instrumente der Umweltpolitik (Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) 2021) passgenauer als bisher an die ein-

<sup>41</sup> Ein Exabyte entspricht 1.048.576 Terabyte bzw. 1.073.741.824 Gigabyte.

<sup>42</sup> <https://www.habitatxr.com/>

zelne Bürger\*in zu bringen und für umweltpolitische Themen zu sensibilisieren. Die Nutzung von KI-Tools kann perspektivisch den Aufwand zur Erstellung derartiger Inhalte verringern und eine weitere Verbreitung ermöglichen (siehe Emerging Issue 3).

Diesen Chancen stehen jedoch der erhebliche Energieverbrauch der Technologie und der bereits erwähnte Ressourcenbedarf der benötigten Hardware gegenüber, deren Anschaffung für die Nutzung des Internets der Zukunft unumgänglich ist. Langfristig könnten sich auch durch eine stärkere Adaption immersiver, auf AR und VR basierender virtueller Welten die notwendig werdenden Rechenkapazitäten im Bereich von Cloud und Edge Computing massiv ausweiten. Einzelne Angaben aus der IT-Branche schätzen einen Anstieg der benötigten Rechenkapazitäten um den Faktor eintausend (Peters et al. 2022). Darüber hinaus attestieren Expert\*innen dem Metaverse eine Reihe von Risiken, die sich auf unterschiedliche Weise auch auf die Umwelt auswirken können: So könnte die virtuelle Realität zu einer Entfremdung von der realen Umwelt führen und damit die Motivation für Umweltschutzmaßnahmen eher hemmen als stärken; der technische Rahmen des Metaverse ermöglicht es auch Akteuren, die gegen den Klimaschutz arbeiten, Einfluss zu nehmen und glaubwürdige, aber irreführende Inhalte zu platzieren (siehe oben); und wie durch andere soziale Netzwerke könnte auch mit dem Metaverse die Polarisierung der Gesellschaft weiter vorangetrieben und damit politische Entscheidungsprozesse hin zu mehr Umweltschutz belastet werden (Anderson und Rainie 2022).

### 3. Neue Smartness: Internet und Künstliche Intelligenz

Erheblichen Einfluss auf das Internet der Zukunft wird ebenso die Präsenz KI-generierter Inhalte haben. Diese werden zunehmend schwerer von menschlichen Erzeugnissen wie Bildern, Texten oder Videos unterscheidbar und stellen ein erhebliches Risiko für Desinformation dar (siehe Kapitel 2.9). Gleichzeitig bietet der weiträumige Einsatz von KI das Potenzial für eine erheblich veränderte Nutzungserfahrung im Internet, die z. B. KI-gestützte Suche, Generierung von Inhalten und Unterstützung bei diversen Aufgaben umfasst.

Mit der Einführung von ChatGPT im November 2022 wurden KI-Anwendungen innerhalb kürzester Zeit zum gesellschaftlich heiß diskutierten Thema und fanden eine breite Basis an Nutzer\*innen (Albrecht 2023b). Schnell wurde auch im öffentlichen Bewusstsein klar, dass KI die Nutzung des Internets, aber ebenso Mensch-Maschine-Interaktionen generell fundamental verändern würde – mit Auswirkungen auf fast alle Lebensbereiche (Delcker 2023). Expert\*innen prognostizieren starkes Wachstum im weltweiten KI-Markt: Während der Markt 2021 (vor dem ChatGPT-Hype) ein Volumen von 95,6 Mrd. US-Dollar aufwies, liegt die Prognose für das Jahr 2030 bei fast 2 Bio. US-Dollar – eine annähernde Verzwanzigfachung des Umsatzes (Thormundsson 2023).

Zu den wichtigsten Anwendungen von KI zählt gegenwärtig die KI-gestützte Suche im Netz. Diese ist für Nutzer\*innen auf den ersten Blick eine wertvolle Hilfestellung: KI kann etwa aus unpräzisen Fragestellungen den Kern der Frage identifizieren, gezielt nach diesem suchen und somit bessere Ergebnisse erzeugen. Zudem werden Ergebnisse kompakt zusammengefasst, was Rechercheaufwand und Zeit einspart. Aufgrund ihrer Funktionsweise – LLM<sup>43</sup> sagen Wortfolgen vorher und haben kein inhaltliches Verständnis der verarbeiteten Informationen – ist KI allerdings auch anfällig für die Generierung falscher Informationen; im Fall von „erfundenen“, d. h. falsch zusammengesetzten Fakten spricht man von „Halluzinationen“ der KI (Kanana o.J.). Diese Gefahr muss den Nutzer\*innen bei der Verwendung von KI-Werkzeugen bewusst sein, um einen verantwortungsvollen Umgang zu ermöglichen und Risiken von Falschinformationen zu minimieren.

Ein weiterer wichtiger Bereich ist die Erstellung von Inhalten mittels KI, seien es Bilder (Dall-E, Midjourney), Texte (ChatGPT, Bard, Bing) oder Videos (DeepBrain AI, Synthesia.io). KI-gestützte Werkzeuge ermöglichen z. B. die Erstellung und Illustration von Texten in kürzester Zeit und legen damit die Grundlage für eine Vielzahl von Anwendungen im Internet der Zukunft – von Werbung über Online-Journalismus bis hin zu ausgefeilten und auf den ersten Blick schwer erkennbaren Cyberangriffen, etwa in Form von Phishing und Social Engineering (siehe Kapitel 2.9) (Kanana o.J.). Die beschleunigte Generierung von

43 LLM = Large Language Model; Computermodell, das auf die Verarbeitung sprachlicher Daten trainiert wurde (z. B. ChatGPT) (Albrecht 2023b).

Inhalten mittels KI ermöglicht es Anbietern zudem, riesige virtuelle Welten wie das Metaverse mit ansprechenden Inhalten zu füllen – eine Voraussetzung für deren Erfolg bei den Nutzenden (Lv 2023). Realistisch wirkende KI-Erzeugnisse können aber u. a. auch genutzt werden, um Personen und Gruppen durch Falschinformationen zu diskreditieren (Engler und Dhamani o.J.); im Umweltbereich wurde beispielsweise die Klimaaktivistin Greta Thunberg bereits Opfer solcher Angriffe (Bart 2023). Die zunehmende Verbreitung von KI liefert somit auch Gegner\*innen von Klima- und Umweltschutzmaßnahmen neue Werkzeuge, um durch Einflussnahme auf die politische Meinungsbildung eine nachhaltige Transformation zu verzögern oder zu verhindern (siehe Kapitel 2.4 und 2.9).

Im Vergleich zu anderen Anwendungen im Internet führen KI-Modelle deutlich komplexere Berechnungen durch, um ihre Ergebnisse zu generieren. Dies ist mit einem erheblichen Energiebedarf verbunden. Insbesondere Entwicklungen im Bereich der generativen KI, z. B. ChatGPT, und der immersiven Welten wie etwa Metaverse dürften bei dynamischer Verbreitung in absehbarer Zeit den weltweiten Ressourcenverbrauch erhöhen. Die Tragweite dieser Entwicklung lässt sich bereits heute in Ansätzen erahnen: Suchfunktionen, die durch generative KI unterstützt werden, sind beispielsweise zehnmal energieintensiver als herkömmliche Suchmaschinen (Albrecht 2023b). Angesichts des prognostizierten Marktwachstums von KI-Anwendungen ist daher mit einem drastischen Anstieg des Energieverbrauchs und der damit verbundenen Emissionen zu rechnen.

Mit dem Einsatz von KI-Anwendungen können, im Zusammenhang mit dem Internet und Online-Diensten, aber auch positive Umwelteffekte erzielt werden. Google gibt an, KI für eine kraftstoffeffiziente Routenplanung in Google Maps einzusetzen (tagesschau.de 2023b). Bereits 2016 konnte durch den Einsatz von KI der Energieverbrauch für die Kühlung der Google-eigenen Rechenzentren um 40 % gesenkt werden (Evans und Gao 2016). KI kann auch genutzt werden, um Webseiten und Anwendungen hinsichtlich ihres Ressourcenverbrauchs zu optimieren: So können KI-basierte Anwendungen zur Bildkomprimierung die Dateigröße von Bildern auf Webseiten reduzieren, ohne deren visuelle Qualität zu beeinträchtigen, und so Energie auf der Serverseite und bei der Datenübertragung einsparen (Caballero 2023). KI-Anwendun-

gen, die erkennen, welche Art von KI-Modell für eine Aufgabe am besten geeignet ist, haben das Potenzial, unnötige Berechnungen zu vermeiden und damit Energie und Emissionen zu reduzieren (Cho o.J.). In Kombination mit anderen umweltrelevanten Anwendungen, beispielsweise zur Prozessoptimierung und Energieeinsparung in komplexen Industrie- und Logistikanlagen wie Containerhäfen (Tsolakis et al. 2022), könnte der Einsatz von KI bis 2030 zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 6,1 % in den USA und um 4,9 % in Europa führen (Thormundsson 2022).

### Fazit für Umweltpolitik und -forschung

Die aufgezeigten Entwicklungen haben eine Vielzahl von Implikationen für den Umweltbereich. Zum einen können sie zu einer Verschärfung von bereits existierenden Umweltfolgen des Elektroniksektors führen, wie Ressourcen- und Energieverbrauch bei der Produktion und Nutzung neuer Endgeräte sowie der Entstehung von Elektronikschrott bei deren Entsorgung. Zum anderen bieten sie aber auch neue Möglichkeiten zur Förderung von Umweltthemen und nachhaltigen Praktiken, etwa durch den Einsatz von XR-Inhalten zur Umweltbildung oder durch KI-Optimierung von industriellen Prozessen.

Zur umweltpolitischen Bewertung des Internets der Zukunft ist ein detailliertes, transparentes Monitoring der Umweltwirkungen aller relevanten Technologien nötig, das gegenwärtig noch große Lücken aufweist. Die bestehende Forschungs- und Informationslücke muss geschlossen werden, um Chancen und Risiken der neuen Technologien vor dem Hintergrund ihrer Umweltwirkungen umfassend bewerten zu können.

Eine umweltorientierte Ausrichtung des Internets der Zukunft muss daher eine Reihe von Maßnahmen umfassen, die einerseits die Nutzung der existierenden Potenziale ermöglicht, andererseits aber ebenso den Gefahren für die Umwelt abwägt und regulativ begegnet. Entsprechende Maßnahmen könnten etwa die Förderung der Entwicklung energie- und ressourceneffizienterer Hardware (bzw. mit der Zeit zu erhöhende Mindestanforderungen oder Verbote veralteter/nicht effizienter Hardware), die Einforderung von Reparaturmöglichkeiten und -angeboten sowie Recyclingmethoden für Elektronikschrott und die Nutzung erneuerbarer Energiequellen für den Betrieb der Technologien umfassen. Beispielhaft sei hier die 2024 in der EU in Kraft getretene Ökodesign-Ver-



ordnung genannt, die die Einführung von Ökodesign-Produkt Richtlinien ermöglicht, etwa in Hinsicht auf Haltbarkeit, Wiederverwendbarkeit, Reparierbarkeit und Umweltfußabdruck (Europäische Kommission (EK) 2024), und damit auch die neuen Endgeräte des Internets der Zukunft betreffen wird.

Gesamtgesellschaftlich kann das Internet der Zukunft bestehende Probleme der Digitalisierung weiter verstärken, sei es durch eine weitere Verlagerung des Einzelhandels aus Ortskernen hin zum XR-gestützten Onlinehandel inklusive der daraus folgenden Konsequenzen für Stadtzentren, wie Leerstand und Verringerung der Aufenthalts- und Lebensqualität (Hangebruch 2023), oder durch noch eindrücklicher wirkende Fehlinformationen (siehe Emerging Issue 2) und einen sich weiter vergrößernden „Digital Divide“ (siehe Emerging Issue 1). Auch diese Problematiken müssen bei der Weichenstellung hin zu einem Internet der Zukunft mitbedacht werden, die Umweltfolgen in den Fokus rückt und die Transformation zu einer nachhaltigen Gesellschaft fördert, statt sie zu behindern.



## 2.9 Cybersicherheit und Umweltschutz

**Trend:** In einer umfassend vernetzten Welt besteht ein zunehmend großes Risiko, Angriffen über das Internet ausgesetzt zu sein. Diese können von der Verbreitung von Fake News über politisch aktive Personen bis zum technischen Lahmlegen ganzer Institutionen, Unternehmen oder Infrastrukturen reichen. Welche Folgen ergeben sich insbesondere angesichts der zunehmenden Verwundbarkeit kritischer Infrastrukturen, Unternehmens- und Verwaltungsaktivitäten und Einzelpersonen? Wie können sich solche Attacken auf die Transformationsbestrebungen der Gesellschaft auswirken und welche Folgen ergeben sich für den Umweltschutz?

### Emerging Issues

- ▶ Angriffe auf (kritische) Infrastrukturen
- ▶ Angriffe auf Unternehmen und Wertschöpfungsketten
- ▶ Angriffe auf politische Institutionen
- ▶ Angriffe auf die Meinungsbildung

### In Kürze

- ▶ Die zunehmende Vernetzung und Komplexität von Informationstechnik bringt Herausforderungen mit sich, die Systeme sicher zu gestalten und vor Cyberangriffen zu schützen, während die Zahl der Cyberangriffe kontinuierlich ansteigt. Angreifer\*innen bedienen sich einer Vielzahl an Methoden und zielen unter anderem darauf ab, Wirtschaft, Staat und Verwaltung, aber auch Gesellschaft und Individuen zu erpressen, Desinformationen zu verbreiten oder

kritische Infrastrukturen zu sabotieren. Zukünftig kann der Einsatz neuer Technologien wie z. B. KI neben neuen Herausforderungen auch Möglichkeiten bedeuten, Cybersicherheit neu zu gestalten.

- ▶ Cyberangriffe können vielfältige Auswirkungen auf die Umwelt haben. Angriffe auf kritische Infrastrukturen können zu Havarien und damit einhergehenden Umweltschäden führen, etwa durch den Austritt von Schadstoffen. Angriffe auf die Produktion von transformationsrelevanten Technologien hemmen umweltrelevante Fortschritte, und Cyberattacken auf Umweltbehörden behindern den effektiven Schutz der Umwelt. Zudem wird durch Online-Attacken auf die Glaubwürdigkeit politisch aktiver Personen und Gruppen auch der gesellschaftliche Konsens für Umweltschutzmaßnahmen untergraben, der Grundlage politischen Handelns ist.
- ▶ Angesichts zunehmender Vernetzung und immer vielfältigerer Möglichkeiten für Cyberangriffe verschiebt sich der Fokus der Cybersicherheit hin zu Resilienz, d. h. der Minimierung des Schadens im Angriffsfall. Dies umfasst Notfallvorkehrungen (redundante Anlagen etc.) bei kritischer Infrastruktur und in Wertschöpfungsketten, aber auch Aufklärung und Medienbildung für Nut-

zer\*innen und Öffentlichkeit, um z. B. Falschinformationen identifizieren zu können. Dieser Fokus kann die Grundlage einer Cybersicherheitsstrategie des Umweltresorts bilden.

### Hintergrund

Die digitale Transformation mit immer mehr vernetzter Informationstechnik (IT) und zunehmend digitalisierten, gesellschaftlich relevanten Infrastrukturen prägt unseren Alltag. Ein Leben ohne digitale Technologien lässt sich nur schwerlich vorstellen. Wie abhängig das gesellschaftliche und wirtschaftliche Leben von funktionsfähigen IT-Systemen ist, zeigt sich vor allem, wenn sie, beispielsweise durch Angriffe, nicht mehr verfügbar sind: z. B. als zu Beginn des russischen Angriffskrieges auf die Ukraine eine Cyberattacke auf Satelliten die Fernwartung von Windkraftanlagen aussetzen ließ (Brühl 2022) oder als die gesamte Kommunikationsinfrastruktur im Gazastreifen zusammenbrach.

Die fortschreitende Digitalisierung und Vernetzung, aber auch die zunehmende Komplexität von IT-Systemen bieten immer größere Angriffsflächen, gleichzeitig entwickeln sich kriminelle Methoden und Systematisierungen von Hackerangriffen weiter. Schwachstellen und Angriffe in der digitalen Welt haben potenziell schwerwiegende Folgen (Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat 2021). Sowohl politisch motivierte Cyberangriffe wie Manipulation von Wahlen als auch kriminelle Hackerangriffe, die z. B. auf Erpressung von Lösegeld abzielen, können negative Auswirkungen auf Menschen, Organisationen, staatlichen Institutionen, aber auch ganze Gesellschaften haben. Diese vielfältigen Angriffe adressieren dabei beispielsweise Lieferketten, Unternehmensproduktionen oder Gesundheits- und Energieversorgung und andere kritische Infrastrukturen.

Damit steigt die Relevanz der Cybersicherheit für alle gesellschaftlichen Akteure. Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik beschreibt Cybersicherheit als sich befassend mit „[...] allen Aspekten der Sicherheit in der Informations- und Kommunikationstechnik. Das Aktionsfeld der klassischen IT-Sicherheit wird dabei auf den gesamten Cyber-Raum ausgeweitet. Dieser umfasst sämtliche mit dem Inter-

net und vergleichbaren Netzen verbundene Informationstechnik und schließt darauf basierende Kommunikation, Anwendungen, Prozesse und verarbeitete Informationen mit ein.“ (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) 2022a; S. 16). In der Cybersicherheitsstrategie Deutschland werden drei Arten von Bedrohungen für Cybersicherheit unterschieden (Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat 2021): Cyberkriminalität, z. B. zur Erpressung von Lösegeld; Cyberangriffe, etwa staatlich/politisch motivierte Angriffe oder Cyberterrorismus mit dem Ziel, Angst oder Panik auszulösen; oder hybride Bedrohungen wie z. B. Cybersabotage oder Desinformationskampagnen und Cyberspionage.

Die Zahl der Cyberangriffe in Deutschland lag im Jahr 2023 bei 134.407 registrierten Fällen (Bundeskriminalamt 2024). Obwohl ein leichter Rückgang zum Vorjahr um 1,8 % erkennbar war, steigt die Zahl der Angriffe über die Jahre kontinuierlich an. Diese absoluten Zahlen zeichnen allerdings kein realistisches Bild der Cyberangriffe, da hier nur Fälle gezählt werden, bei denen sowohl Angreifende als auch die Schäden allein in Deutschland zu verzeichnen sind. Dieses Bild bestätigt auch der „BSI Lagebericht“ 2023, in dem aufgezeigt wird, dass insbesondere die Daten über Angriffe aus dem Ausland seit 2020 – in diesem Jahr begannen die Aufzeichnungen – stetig ansteigen. Weiterhin wird geschätzt, dass es nur in 10 % der Fälle tatsächlich zu einer Anzeige kommt – die Dunkelziffer ist damit enorm (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) 2023b).

### *Angriffe auf Cybersicherheit betreffen Wirtschaft, Gesellschaft und Individuen*

Von Cyberangriffen betroffen sind in Deutschland mehrheitlich wirtschaftliche Akteure. Es lässt sich ein Zusammenhang zwischen den Digitalisierungsbestrebungen in und seit der Covid-19-Pandemie und einem Anstieg der Angriffe auf Unternehmen erkennen. Das ist darauf zurückzuführen, dass durch Lockdowns ein schneller Wechsel auf virtuelles Arbeiten nötig war und daher viele zusätzliche digitale Interaktionen über private Infrastrukturen geführt wurden. Einer Schätzung zufolge liegen die Schäden von Cyberangriffen für die deutsche Wirtschaft bei 202,7 Mrd. Euro im Jahr 2022 (Bitkom e.V. 2022). 63 % der repräsentativ befragten Unternehmen berichten vom Diebstahl sensibler Daten, 55 % von der Sabotage digitaler Systeme und 57 % vom Ausspähen digitaler Kommunikation.

Aber auch Staat und Verwaltung sind Zielgruppen von Angriffen: So wurden sämtliche IT-Systeme einer Landkreisverwaltung in Sachsen-Anhalt im Juli 2021 standortübergreifend lahmgelegt. Dort wurde daraufhin bis Februar 2022 der erste digitale Katastrophenfall in Deutschland festgestellt. Der Vorfall beeinträchtigte insbesondere bürgernahe kommunale Verwaltungsprozesse wie beispielsweise das Auszahlen von Sozialleistungen (Heidtmann 2021).

Gezielt werden aber auch kritische Infrastrukturen des Energie- oder Transportsektors oder Institutionen des Bildungs- oder Gesundheitswesens attackiert. So beschreibt der „BSI Lagebericht“ (2023b) sogenannte „Advanced Persistent Threats“ als langfristig und mit großem Aufwand geplante Angriffe. Sie zielen oftmals sehr aufwendig auf die Sabotage oder Informationsbeschaffung einzelner großer Akteure ab und gewinnen speziell vor dem Hintergrund geopolitischer Spannungsfelder als Angriffsszenario an Bedeutung. Zielgruppen werden zunehmend Regierungseinrichtungen und NGOs, aber auch der Energie- und Pharmasektor sowie die Rüstungsindustrie. Hier wird deutlich, wie verwundbar auch kritische Infrastrukturen sind. Interessant ist der Zuwachs an cyberkrimineller Schattenwirtschaft, durch die immer mehr Dienstleistungen und spezialisiertere Werkzeuge für solche Angriffe zur Verfügung gestellt werden (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) 2023b).

Sabotageangriffe auf Medien oder einzelne Personen, wie beispielsweise auf Annalena Baerbock, mit dem Ziel, zu diskreditieren oder Desinformationen zu streuen, können als Beispiele für Angriffe auf Cybersicherheit herangezogen werden (Hate Aid 2022). Die Wahl Donald Trumps im Jahr 2016 oder auch das Brexit-Referendum wurden in Verbindung mit unzuverlässigen und irreführenden Informationen gebracht (Hoffmann 2023). In einem aktuelleren Fall sollen pro-russische Hacker versucht haben, Ukrainer in Europa mit einer Kampagne zu demoralisieren. Die Hacker nutzten nach Informationen eines IT-Sicherheitsunternehmens auch Domains mit Bezug zu Alexei Nawalny (Kolvenbach 2024). Solche Angriffe können erhebliche Auswirkungen auf die öffentliche Meinungsbildung und das Vertrauen in Informationen sowie die vermeintlich verbreitenden Institutionen und Personen haben.

Diese Beispiele verdeutlichen, dass Angriffe wirtschaftliche und staatliche Akteure sowie kritische Infrastrukturen, aber auch die Gesellschaft und einzelne Personen betreffen können. Gleichzeitig handelt es sich bei allen Akteursgruppen um hochgradig vernetzte Systeme mit wechselseitigen Abhängigkeiten.

### *Vielfältige Angriffsformen und die Rolle vernetzter Systeme und KI für Cybersicherheit*

Das Zusammenspiel komplexer Systeme und komplexer Software, die unsicher oder fehlerhaft konfiguriert sind, liefert immer mehr Einfallstore für Angriffe. Auch die tatsächliche Nutzung von Software bzw. die Menschen, die sie nutzen, können zusätzliche kritische Schwachstellen bedeuten. In diese Einfallstore lassen sich verschiedene Angriffsformen mit unterschiedlichen Bedrohungsszenarien klassifizieren (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) 2023b).

- ▶ „Ransomware“-Angriffe zielen überwiegend auf die Erpressung von Lösegeld ab. Hier werden Daten so verschlüsselt, dass sie nur durch die geforderten Zahlungen der Erpresser\*innen wieder nutzbar gemacht werden können.
- ▶ „Denial of Service (DoS)“- und „Distributed Denial of Service (DDoS)“-Angriffe zielen auf die Überlastung oder den Ausfall von Informationssystemen ab, indem Server gezielt mit einer Vielzahl von Anfragen geflutet werden. Es gibt verschiedene Formen des Angriffs, indem z. B. so viele E-Mails geschickt werden, dass der E-Mail-Account und entsprechende Server zusammenbrechen. Bei DDoS-Angriffen können durch verteilte Rechner besonders viele Netzressourcen auf einmal angegriffen werden.
- ▶ Bei „Supply-Chain-Attacken“ werden die Softwareprodukte von Lieferanten und Herstellern infiltriert, die dann von den Zielen, welche attackiert werden sollen heruntergeladen oder genutzt werden. Angreifer infizieren so über die Lieferkette der Organisation das gesamte Netzwerk. Dadurch können hochsensible Daten abgegriffen werden oder Systeme werden lahmgelegt; auch denkbar sind Lösegelderpressungen.
- ▶ Schadprogramme werden genutzt, um über verschiedene Wege die Systeme der Angriffsziele zu infiltrieren. Dies kann beispielsweise in Form

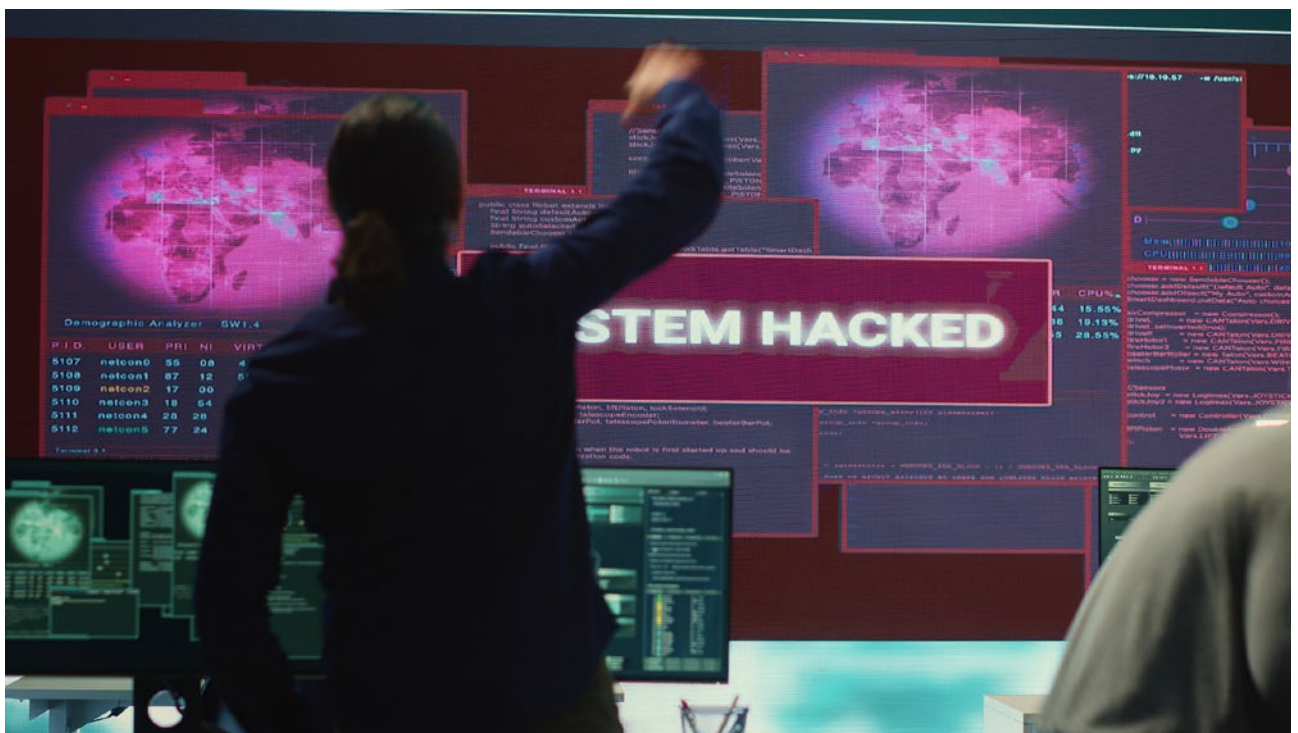
von Trojanern – als nützliches Programm getarntes Schadprogramm –, Viren (eine Infizierung mit dem Schadprogramm im Hintergrund eines Wirtsprogramms) oder „Würmern“, eigenständig lauffähigen Schadprogrammen, geschehen. Infizierte Geräte können von Cyberkriminellen zu Botnetzen ausgebaut werden, bei denen über das Internet vernetzte Geräte ebenfalls infiltriert werden. Dies führt gleichfalls zu kompromittierten Daten und Systemen oder kann Lösegeldforderungen auslösen.

- ▶ Mehr als die Hälfte der weltweit versandten E-Mails sind Spam. Spam kann nicht nur Werbung enthalten, sondern auch über E-Mail-Anhänge Schadprogramme installieren, oder beinhaltet Phishing bzw. Desinformationsverbreitung („Hoax“). Phishing zielt oftmals auf das Ausspionieren persönlicher Daten und Passwörter ab.
- ▶ Auch über Doxing und Datenleaks können Angreifende auf Identitäten und relevante Passwörter zugreifen. Doxing beschreibt das Sammeln und öffentliche Verfügbarmachen von zuvor gesammelten und personenbezogenen Daten.
- ▶ Bei Social-Engineering-Methoden nutzen Angreifende menschliche Eigenschaften und Gefühle wie Angst oder Zeitdruck aus, um ähnlich wie über

Trickbetrug auf gewünschte Daten zuzugreifen. Die Möglichkeiten zur Nutzung kompromittierter Daten sind vielfältig: Oftmals werden Zugänge zu Finanzdienstleistungen ausgespäht oder es wird darauf hingewirkt, Geld zu überweisen.

Ransomware ist die häufigste zu verzeichnende Angriffsform (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) 2022b; Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) 2023b). Betroffen von Angriffen und entsprechender Erpressung sind überwiegend Unternehmen. Während Angriffsformen häufig auf staatliche oder organisationale Akteure abzielen, werden auch Individuen Opfer von Cyberkriminalität. Mehr als jede vierte Person in Deutschland (29 %) gibt an, schon einmal Opfer von Cyberkriminalität gewesen zu sein; besonders häufig sind Betrugsfälle beim Online-Shopping oder Fremdzugriff auf einen Online-Account (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) 2023c).

Die Top-Bedrohungen je Zielgruppe beschreibt das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (2023b) entsprechend für die Gesellschaft mit Identitätsdiebstahl und Phishing, für die Wirtschaft mit Ransomware und Supply-Chain-Attacken und für Staat und Verwaltung mit Ransomware und Advanced Persistent Threats.



Durch weltweit agierende Angreifende und global agierende wirtschaftliche Akteure wird der Schutz von IT-Systemen und -Netzen immer mehr auch eine globale Herausforderung, mit globalen Implikationen. Dies wird auch bei Betrachtung aktueller internationaler politischer Entwicklungen deutlich: Allein im September 2023 registrierte das amerikanische Center for Strategic and International Studies 16 Cybersicherheits-signifikante Inzidenzen, die politisch motiviert sind (Center for Strategic & International Studies 2023). Auch die Weltraumsicherheit und Angriffe auf IT-Technik, die den Cyberraum betreffen, spielen eine zunehmende Rolle in der Betrachtung von Cybersicherheit (Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI) 2023).

Bei der Betrachtung der Angriffsformen und der Vernetzung von Systemen wird deutlich, dass durch die skizzierten Angriffsformen nicht nur ein Ziel attackiert wird, sondern betroffene Akteure oftmals zusammenhängen und sich durch die Vernetzung Kettenreaktionen ergeben. Kombiniert mit fortwährenden technologischen Entwicklungen sowie zunehmender Komplexität und Vernetzung von Systemen, bringt dies auch neu aufkommende Bedrohungsszenarien und Herausforderung mit sich. Dies wird beispielhaft deutlich bei der Betrachtung intelligenter vernetzter Gegenstände (Internet of Things). Gefahren für die Sicherheit nehmen zu, wenn infizierte Systeme sich über die Vernetzung von Gegenständen leicht zusammenschließen können und über dieses Netz – durch sogenannte Botnetze – missbraucht werden können (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) 2023a). Auch aktuelle Entwicklungen im Bereich der Nutzung neuronaler Netze und des maschinellen Lernens mit Blick auf Künstliche Intelligenz und generative Künstliche Intelligenz schaffen neue Herausforderungen für die Cybersicherheit: So können beispielsweise automatisierte Angriffe gestartet oder Deep Fakes gestreut werden, bei denen Fotos oder Videos und ebenso Text gezielt manipuliert werden, um Desinformationen zu verbreiten. Gleichzeitig besteht aber auch das Potenzial, durch Künstliche Intelligenz automatisiert sicherere Systeme zu bauen und Lücken zu identifizieren (Golden und Johnson 2017; Sabin 2023).

### *Blick in die Zukunft*

Angriffe auf die Cybersicherheit in den verschiedenen Bereichen werden häufiger, die Angriffsarten und Ziele werden diverser und effizienter. Insbesondere der

Markt für kriminelle Akteure wächst und Methoden entwickeln sich mit neuen technologischen Möglichkeiten stets weiter. So löste beispielweise die Verfügbarkeit und Nutzung generativer Künstlicher Intelligenz (KI) einen Anstieg in organisierten Phishing Kampagnen („phishing as-a-service“) aus (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) 2023b). Hier ist zu erwarten, dass diese Entwicklungen insbesondere Auswirkungen auf professionelle Schattenwirtschaftsdienstleistungen haben. Es entstehen stetig neue Geschäftsmodelle wie z. B. das des „Initial Access Brokers“, der Wissen über Zugänge (erlangt z. B. über Phishing oder über Schwachstellenkenntnisse) an Dritte verkauft.

Während durch KI die Quantität und Qualität der Cyberangriffe zunimmt, bieten neue technologische Entwicklungen hier aber auch Chancen, Sicherheitslücken aufzudecken und Angriffe zu erkennen. Unternehmen und staatliche Akteure reagieren und stellen sich auf, um entsprechende Maßnahmen zu ergreifen. Deutsche Unternehmen beispielsweise geben immer mehr Geld für die Gewährleistung der Cybersicherheit aus (Bitkom e.V. 2022). Nichtsdestotrotz sind die Cybersicherheitsstrategien vieler Unternehmen bisher rein präventiv und passen sich der steigenden Anzahl diverser Angriffe nicht mit entsprechenden Maßnahmen und reaktiven Notfallplänen an (Mair et al. 2023).

Cybersicherheit wird zukünftig für alle Akteure des gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Lebens immer wichtiger werden. Insbesondere Unternehmen oder staatliche Organisationen, die digitale, vernetzte Systeme und komplexe Software nutzen und anbieten sowie kritische Infrastrukturen oder Lieferketten managen, werden gefragt sein, sich künftig intensiver mit Aspekten der Cybersicherheit auseinanderzusetzen und mehr in das Feld zu investieren. So könnte Cybersicherheit für Unternehmen vom „Hygienefaktor“ zum Differenzierungsmerkmal werden (Mair et al. 2023).

Gleichzeitig wird aber immer wieder auf die Abhängigkeit von globalen Regularien und internationalen Governance-Strukturen hingewiesen. Hier prognostizierte Gartner, dass Staaten zukünftig umfangreichere Regelungen treffen werden, um Cyberkriminalität wie Ransomware-Erpressungen besser bekämpfen zu können (Kolaric o. J.). Auch geopolitische Einflüsse werden im Zusammenhang mit Cybersicherheit eine

immer größere Rolle spielen und es wird erwartet, dass feindliche Akteure nicht nur sabotieren, sondern Technologieumgebungen ebenso als Waffe einsetzen (siehe Kapitel 2.5) (Kolaric o. J.). Einzelpersonen werden zunehmend gefragt sein, Sicherheitskompetenzen zu entwickeln, um Angriffe zu erkennen, oder Medienkompetenzen, um Desinformationskampagnen zu entlarven. Neue Erkenntnisse sollen auch durch gezielte Forschungsförderungsprogramme wie der Bekanntmachung „Vertrauen in Demokratie und Staat: Digitale Desinformation erkennen und abwehren“ im Rahmen des Forschungsrahmens „Digital. Sicher. Souverän.“ erzielt werden (Bundeministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2022). Wirnsperger et al. (2020) beschreiben die zwei Aspekte a) Integration von Cybersicherheit in (aufkommenden) Technologien und b) globale Cyber-Machtverhältnisse als maßgebliche Treiber für die Entwicklung künftiger Cyberrisiken. Sie betonen damit ebenfalls die immer größere Abhängigkeit der Vernetzung von Systemen und globalen Akteuren.

Angesichts dieser Entwicklungen ergeben sich Fragestellungen, die zunehmend an Relevanz gewinnen: Welche Rolle spielen Angriffe auf kritischer Infrastrukturen, Unternehmen und Wertschöpfungsketten, aber auch Angriffe auf politische Institutionen oder Personen, zum Beispiel über Desinformationskampagnen mit Blick auf eine nachhaltige Zukunft? Wie stellen sich diese Entwicklungen in Zukunft aus der Perspektive der globalen Nachhaltigkeit dar und welche Rolle spielen hier nicht nur ökologische, sondern auch soziale Aspekte (siehe Kapitel 2.4)?

### Emerging Issues

Deutschland war 2023 Schauplatz einer Reihe weitreichender Cyberangriffe: So wurde im Oktober der kommunale IT-Dienstleister Südwestfalen-IT gehackt, was zum Ausfall der IT-Infrastruktur von 72 Kommunen in Nordrhein-Westfalen führte; im gleichen Zeitraum wurde auch das Uniklinikum Frankfurt Ziel eines Hackerangriffs. In beiden Fällen wurde der Betrieb der betroffenen Einrichtungen erheblich eingeschränkt, die vollständige Behebung ist teilweise nach wie vor nicht abgeschlossen (Müller 2024). Cyberattacken haben in den vergangenen Jahren, auch im Zuge der durch die Covid-19-Pandemie forcierten Digitalisierung, stark zugenommen. Es gibt dabei eine zunehmend große Anzahl von Akteur\*innen, die über den Willen und die Kapazitäten verfügen, derartige Angriffe durchzuführen (Möller 2023).

Diese haben nicht nur folgenreiche und kostspielige Auswirkungen auf Unternehmen, sondern bedrohen ebenfalls unmittelbar die Funktionsweise kritischer Infrastruktur, können Auswirkungen auf die öffentliche Daseinsvorsorge haben und zielen zum Teil auf die öffentliche und demokratische Meinungsbildung ab. Dabei können Cyberangriffe auch direkt zu Umweltschäden führen oder indirekte Umweltauswirkungen haben.

### 1. Angriffe auf (kritische) Infrastrukturen

Laut dem Gesetz über das Bundesamt für Sicherheit und Informationstechnik (BSIG) gehören zu kritischen Infrastrukturen „Einrichtungen, Anlagen oder Teile [...] die den Sektoren Energie, Informationstechnik und Telekommunikation, Transport und Verkehr, Gesundheit, Wasser, Ernährung, Finanz- und Versicherungswesen sowie Siedlungsabfallentsorgung angehören und von hoher Bedeutung für das Funktionieren des Gemeinwesens sind, weil durch ihren Ausfall oder ihre Beeinträchtigung erhebliche Versorgungsengpässe oder Gefährdungen für die öffentliche Sicherheit eintreten würden“ (BSIG § 2, Absatz 10; Deutscher Bundestag 2009).

Angriffe auf kritische Infrastrukturen kamen in den vergangenen Jahren immer wieder vor. Seit Beginn des russischen Angriffskrieges gegen die Ukraine gab es vermehrt gezielte Sabotageakte gegen kritische Versorgungsinfrastrukturen im europäischen Raum (Pawlak 2023). Zu nennen sind hier etwa die Sprengung der Nord-Stream-Gasleitungen in der Ostsee (Sanderson et al. 2023), die Beschädigung von Unterseekabeln vor Spitzbergen (Staalesen o.J.) und im Mittelmeer (King o.J.) sowie die Sabotage am Zugfunksystem der Deutschen Bahn (Deutsche Bahn 2022). Seit 2023 häufen sich im Ostseeraum Störungen des GPS-Ortungssystems, die den Schiff- und Flugverkehr beeinträchtigen und von Ermittler\*innen als hybride Kriegstaktik Russlands bewertet werden (Möller und Strüber 2024). Ende 2023 wurde zudem bekannt, dass das britische Kernkraftwerk Sellafield einem jahrelangen Cyberangriff ausgesetzt war, bei dem vermutlich Informationen zu sensiblen Aktivitäten, z. B. der Transport radioaktiver Abfälle oder die Überwachung von Leckagen von gefährlichem Material, abgegriffen wurden (Isaac und Lawson 2023).

Derartige Attacken können erhebliche negative Umweltwirkungen entfalten. Kritische Infrastrukturen befinden sich häufig in direkter Umgebung von Na-

turräumen, etwa Kraftwerke mit großem Kühlwasserbedarf oder Windparks (Couce-Vieira et al. 2020; Pawlak 2023). Direkte Beschädigungen, die durch Sabotage oder Cyberattacken auf die Schwächung oder dauerhafte Zerstörung solcher Infrastruktur abzielen, können deshalb gravierende Umweltbelastungen zur Folge haben. Die Sprengung der Nord-Stream-Gasleitungen hat laut Sanderson et al. (2023) zum Beispiel mehr als 250.000 t an giftigen Sedimenten aufgewirbelt und große Mengen an Methangas freigesetzt. Nicht nur die direkte Zerstörung kritischer Infrastruktur birgt hier Risiken. Vergangene Vorfälle haben gezeigt, dass auch Lücken in der digitalen Sicherheitsarchitektur schon durch einzelne Angriffe zu Umweltschäden führen können. Im Jahr 2000 wurden beispielsweise durch einen Hackerangriff auf eine Kläranlage in Australien über 800.000 l unbehandeltes Abwassers freigesetzt (Sayfayn und Madnick 2017; Couce-Vieira et al. 2020).

Trotz dieser bekannten Risiken sind kritische Infrastrukturen oft immer noch anfällig für Attacken. Insbesondere kritische Infrastruktur in maritimen Umgebungen ist gegenwärtig vielfach unzureichend gegen vorsätzliche Beschädigungen geschützt (Pawlak 2023). Doch auch urbane Infrastrukturen mit direktem Kontakt zu Umweltmedien, wie Klär- und Wasserwerke, sind oft vulnerabel gegenüber Angriffen (Demmig 2020). Das oben genannte Beispiel Selafeld zeigt, dass selbst eine Atomanlage, die in der Vergangenheit bereits Schauplatz des schwerwiegendsten nuklearen Zwischenfalls der britischen Geschichte war (Isaac und Lawson 2023), unzureichend gegen Cyberangriffe gesichert war.

Cybersicherheit stellt neben dem Schutz vor physischen Angriffen die wichtigste Form der Absicherung kritischer Infrastrukturen dar. Dies ist vor allem notwendig, da kritische Infrastruktur in der Regel hochtechnisiert und vernetzt ist. In vielen Industrien überwachen und steuern komplexe Netzwerke von Sensoren die Funktionsweise von Anlagen, beispielsweise den Durchfluss von Pipelines, den Wasserstand in Stauseen oder die Schieber, die Abwässer zurückhalten und ableiten (Couce-Vieira et al. 2020). Diese vernetzten Lösungen bieten Angriffsflächen für Cyberangriffe, die bei getrennten Systemen schwieriger umsetzbar wären; das hohe Maß an Überwachung durch Sensoren etc. macht Angriffe und Havarien gegebenenfalls aber auch leichter entdeckbar.

Es wird angenommen, dass die digitale Vernetzung kritischer Infrastruktur weiter zunehmen wird (Caradot et al. 2023), etwa im Kontext von Smart-City-Anwendungen. So kann die Vernetzung von Stromnetz und -zählern eine effizientere Steuerung des Energieverbrauchs ermöglichen (Dupree o.J.), und die Nachhaltigkeit der öffentlichen Infrastruktur und Daseinsvorsorge kann durch die Vernetzung und Integration städtischer Infrastruktur verbessert werden (Mühlichen 2020). Der daraus resultierende verstärkte Informationsaustausch bringt zwangsläufig steigende Risiken für die Cybersicherheit von öffentlicher Infrastruktur und den Datenschutz mit sich. Insbesondere die vernetzten Strukturen von Smart Cities erhöhen nicht nur die Wahrscheinlichkeit und mögliche Intensität schädlicher Kaskadeneffekte, sondern führen ebenso dazu, dass Sicherheitsverletzungen im Netz eines Betreibers automatisch eine Bedrohung für andere Betreiber darstellen (Kalinin et al. 2021; Caradot et al. 2023).

In der Zukunft werden sich deshalb veränderte und verschärfte Ansprüche an Cybersicherheit entwickeln, die nicht nur eine erhöhte Wachsamkeit gegenüber Bedrohungen von lokaler kritischer Infrastruktur erfordern, sondern auch gegenüber regional und global ausgestalteten Systemen wie den Netzen an Unterseedatenkabeln, Pipelines der Energieversorgung sowie Offshore-Energieinstallationen, den jeweiligen Transfer- und Transportrouten und den entsprechenden Anlande- und Verteilerstationen (Pawlak 2023).

Ein Kernkonzept ist dabei die Resilienz von IT-Systemen: Während es bei der Resistenz darum geht, Angriffe komplett abzuwehren, geht es bei Resilienz darum, den Schaden eines Angriffs zu minimieren. Dabei folgt das Konzept der IT-Resilienz dem „Assume Breach“-Ansatz, der postuliert, dass ein erfolgreicher Angriff auf das eigene System keine Ob-, sondern eine Wann-Frage ist (Herpig 2023). Die zunehmende Digitalisierung und Vernetzung kritischer Infrastruktur bedeutet in Verbindung mit immer ausgeklügelteren Angriffsmöglichkeiten, dass Cybersicherheit zunehmend Resilienz in den Blick nehmen muss (Demmig 2020; Mühlichen 2020). Ein mögliches Ziel könnte dabei sein, durch den Aufbau redundanter Strukturen die möglichen Konsequenzen eines Ausfalls einzelner Systembestandteile so gering wie möglich zu halten (Pawlak 2023; S. 161).



Das Beispiel eines Cyberangriffs auf die Deutsche Windtechnik im April 2022 (Deutsche Windtechnik AG 2022) lässt erkennen, wie die Resilienz von kritischer erneuerbarer Energieinfrastruktur bereits während der Planung und des Aufbaus von physisch-digitalen Systemen sichergestellt werden kann. So können die Auswirkungen von Angriffen minimiert werden, die darauf abzielen, diese Systeme temporär oder langfristig auszuschalten (Pawlak 2023). Obwohl der Angriff dafür sorgte, dass die Kommunikation zu 2.000 Windrädern in der Nordsee für zwei Tage abgeschaltet werden musste, verursachte die Attacke keine nennenswerten Schäden (Deutsche Windtechnik AG 2022). Das konnte einerseits durch die Dezentralität des IT-Systems des Betreuungsunternehmens erreicht werden, wodurch dem Angriff nahezu isoliert begegnet werden konnte. Andererseits gestattete die Konfiguration der Windkraftanlagen einen autonomen Weiterbetrieb auch bei Verlust der Kommunikation, wodurch die fortlaufende Einspeisung von Energie aufrechterhalten werden konnte (Pawlak 2023).

In der EU gilt seit 2022 die „Richtlinie über die Resilienz kritischer Einrichtungen“ (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2022). Auch die Bundesregierung legte den Schutz kritischer Infrastruktur sowie die Stärkung der Cybersicherheit durch Staat, Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft als wichtige Bestandteile ihrer 2023

beschlossenen Nationalen Sicherheitsstrategie fest (Bundesregierung 2023f). Zur gesetzlichen Verankerung des besonderen Schutzes kritischer Infrastruktur plant das Bundesinnenministerium zudem 2024 die Verabschiedung des sogenannten Kritis-Dachgesetzes. Mit diesem soll ein einheitliches Schutzniveau der relevanten Infrastrukturen erreicht werden, das gegenwärtig aufgrund der Vielzahl von staatlichen, kommunalen und privaten Betreiber\*innen noch sehr uneinheitlich aufgestellt ist (Kleine und Barthel 2023).

## *2. Angriffe auf Unternehmen und Wertschöpfungsketten*

Deutschland zählt zu den Ländern, die weltweit am stärksten von Cyberangriffen betroffen sind. Bereits im Jahr 2020 betrug der volkswirtschaftliche Schaden durch Cyberkriminalität 1,6 % des BIP (Hauff und Reller 2020). Die ohnehin seit Jahren angespannte Bedrohungslage im Cyberraum hat sich seit 2020 noch einmal deutlich verstärkt, auch, weil im Zuge der Covid-19-Pandemie eine rapide und sprunghafte Digitalisierung in verschiedenen Arbeitsbereichen stattfand. Dadurch ergaben sich neue Einfallstore für Cyberangriffe (Dreißigacker et al.; Möller 2023).

Die Covid-19-Pandemie und ihr Digitalisierungsschub haben darüber hinaus neue Abhängigkeiten von Informationstechniken geschaffen, deren Ausfall für

Organisationen und Unternehmen unter Umständen existenzbedrohend sind. Gleichzeitig bestehen, vor allem bei KMU, nach wie vor Wissenslücken und Unsicherheiten darüber, wie sie sich gegen digitale Bedrohungen wappnen können (Petretto und Heckler 2021). Obwohl die Bedrohungen durch Cyberangriffe immer vielfältiger werden, stellen Angriffe mit Ransomware aktuell immer noch eine der größten Bedrohungen der IT-Sicherheit von Unternehmen dar und beeinträchtigen ganze Wertschöpfungsketten nachhaltig (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) 2023b). Hinzu kommen neue Methoden wie das Social Engineering, das gezielt auf menschliche Schwachstellen abzielt und verschiedene Formen der Manipulation einsetzt, um z. B. Angestellte dazu zu bringen, sensible oder geheime Informationen ihres Unternehmens preiszugeben (Ardagna et al. 2022).

Fehlende oder mangelhafte Cybersicherheit und ein noch nicht genug ausgeprägtes Bewusstsein von Unternehmen für die Risiken von Cyberangriffen sind dabei auch unter dem Aspekt problematisch, dass das digitale Zeitalter neue Einfallstore und Möglichkeiten der Industriespionage eröffnet. Laut BMI (BMI o.J.) versuchen fremde Nachrichtendienste, Informationen über neue Technologien und Forschungsergebnisse zu beschaffen, um der eigenen Wirtschaft Kosten für Forschung und Entwicklung zu ersparen. Neben dem Einsatz klassischer Mittel und Methoden der Spionage hat die zunehmende elektronische Vernetzung zu neuartigen und erhöhten Risiken im Cyberraum geführt. Interne und externe Sicherheitsrisiken in der realen und Cyberwelt erfordern deshalb einen ganzheitlichen Wirtschaftsschutz, der dabei ebenso die Gefahren von Industriespionage in den Blick nimmt.

Cyberangriffe auf Unternehmen und Wertschöpfungsketten sind auch aus Umweltsicht gefährlich. Zum einen können sie Havarien mit potenziell schwerwiegenden Umweltfolgen auslösen, zum Beispiel Bränden, Explosionen und der Freisetzung von Gefahrenstoffen (siehe Emerging Issue 1; Iaiani et al. 2021). Zum anderen verursachen Cyberangriffe hohe Kosten – sowohl in Form von entstandenen Schäden als auch in Form von Investitionen in Cybersicherheit, die Unternehmen im Rahmen der Gefahrenabwehr tätigen müssen. Zwischen September 2023 und September 2024 entstand deutschen Unternehmen durch Cyberangriffe ein wirtschaftlicher Schaden in Höhe von 178,6 Mrd. Euro; das sind 30 Mrd. Euro mehr als

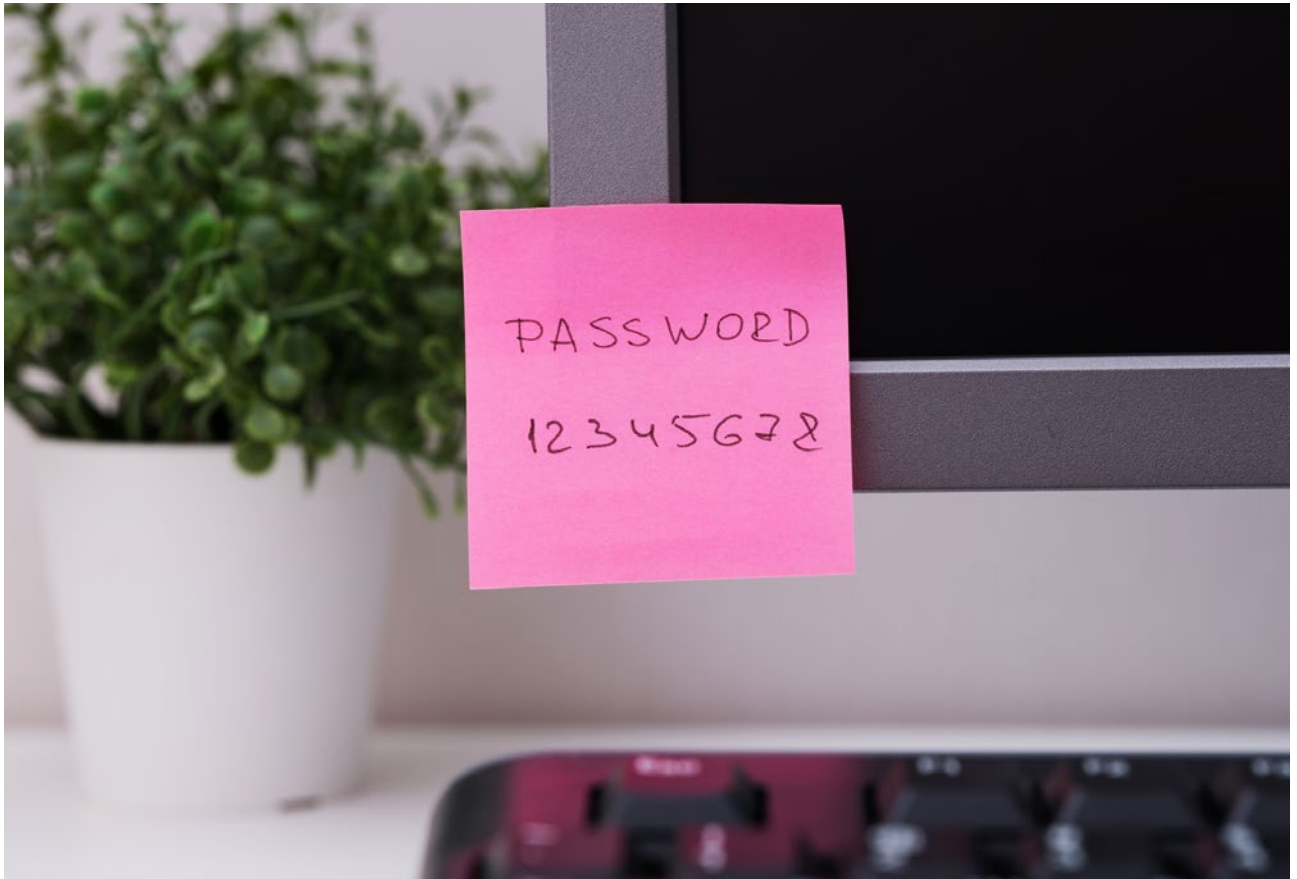
im Vorjahr (Bitkom e.V. 2024). Da viele Cyberangriffe und auch die damit verbundenen Schäden in Unternehmen aus verschiedenen Gründen nicht an das BSI gemeldet werden, geht Demary (2022) von einer hohen zusätzlichen Dunkelziffer aus. Um Klimaneutralität bis zur Mitte des Jahrhunderts zu erreichen, beziffert die KfW den geschätzten Investitionsbedarf des privaten Unternehmenssektors auf circa 120 Mrd. Euro pro Jahr (KfW Research 2023; siehe Kapitel 2.7). Cyberattacken verursachen bei Unternehmen im Mittel also fast doppelt so hohe Kosten, wie sie zur Erreichung der Klimaneutralität investieren müssten. Cyberangriffe behindern somit nicht nur die technologische Seite der Nachhaltigkeitstransformation, indem sie Unternehmen durch Cyberspionage und die Störung von Produktionsketten wirtschaftlich schädigen, sondern wirken auch als Investitionshemmnisse. Die hohen Kosten für Cybersicherheit und -resilienz belasten Unternehmen und verhindern Investitionen, die ansonsten in Nachhaltigkeit und Umweltschutz fließen könnten.

### *3. Angriffe auf politische Institutionen*

Cyberangriffe auf Institutionen des deutschen Staates haben in den letzten Jahren an Intensität gewonnen. Diese gehen dabei sowohl von staatlichen als auch privaten Akteuren aus und verfolgen verschiedene Motive.

Staatliche Institutionen sehen sich, ebenso wie Unternehmen oder Privatpersonen, zunehmend mit Angriffen mit erpresserischer Absicht konfrontiert, z. B. durch den Einsatz von Ransomware (Möller 2023). Im Jahr 2021 hat eine deutsche Kommune zum ersten Mal wegen eines Cyberangriffs den Katastrophenfall ausgerufen. Der Landkreis Anhalt-Bitterfeld wurde durch einen Ransomware-Angriff so weit lahmgelegt, dass unter anderem die Auszahlung von Sozial- und Unterhaltsleistungen vorübergehend nicht mehr möglich war (Heinrich Böll Stiftung 2023). Dabei war dieser Angriff auf den Landkreis nicht primär darauf ausgelegt, Schäden im Verwaltungsapparat der Kommune zu verursachen, sondern darauf, eine Lösegeldsumme zur Freigabe erbeuteter Daten zu erpressen.

Das Bundesamt für Verfassungsschutz (BfV) warnt zudem vor zielgerichteten Cyberangriffen ausländischer Nachrichtendienste auf die deutsche Politik. Gezielte Cyberangriffe werden auch im Kontext hybrider Kampagnen ausländischer Geheimdienste eingesetzt, in denen verschiedene Maßnahmen orchestriert wer-



den, um ein Zielland zu destabilisieren (Möller 2023). Staatliche Akteure können meist auf eine Fülle von Ressourcen – u. a. monetär und technisch – zurückgreifen, um komplexe Cyberangriffe mit hoch entwickelten Methoden durchzuführen, beispielsweise Spionageangriffe (Möller 2023). Derartige Angriffe auf politische Institutionen können dazu beitragen, das gesellschaftliche Vertrauen in Staat und Regierung zu untergraben: Studien weisen darauf hin, dass bereits die Wahrnehmung, eine kritische Dienstleistung könnte durch einen Cyberangriff eingeschränkt werden, zu Unsicherheit und Unruhe in der Bevölkerung führen kann (Shandler und Gomez 2023).

Aus Umweltsicht sind Angriffe auf politische Institutionen ein praktisches Problem: Sie können negative Folgen für staatliche oder kommunale Aufgaben der Umweltverwaltung haben und damit beispielsweise die Umsetzung von Naturschutzmaßnahmen behindern. Im Falle des Angriffs auf die IT des Landkreises Anhalt-Bitterfeld wurde mehr als ein Jahr nach dem Angriff bekannt, dass der Landkreis dauerhaft den Zugriff auf eine der größten Umweltdatenbanken Deutschlands verloren hat, in der Messdaten zu tausenden Altlastverdachtsflächen in einem ehemaligen DDR-Chemiekomplex gespeichert waren (Roth 2023).

Der Cyberangriff hat bedeutende Informationen zu Umweltbelastungen unzugänglich gemacht, die erneut zusammengetragen werden müssen, was das lokale Umweltmanagement vor erhebliche Herausforderungen stellt sowie Kosten in Millionenhöhe verursacht (Roth 2023).

Anhand eines weiteren Beispiels zeigt sich, wie Cyberattacken gezielt genutzt werden können, um das Vertrauen in öffentliche Institutionen sowie in die Wissenschaft zu erodieren und damit auch die gesellschaftliche Akzeptanz von Klima- und Umweltschutzmaßnahmen zu untergraben: Im Jahr 2009 wurden im Rahmen eines Cyberangriffs auf ein Klimaforschungsinstitut einer Universität im Vereinigten Königreich massenhaft Dokumente und vertrauliche E-Mails gestohlen und selektiv im Internet veröffentlicht, um den Eindruck von Betrug zu erwecken. Der als „Climategate“ bekannte Datendiebstahl erfolgte durch einen ausgeklügelten und sorgfältig abgestimmten Angriff und fand kurz vor der UN-Klimakonferenz in Kopenhagen statt, um wissenschaftliche Erkenntnisse zum Klimawandel und ihre Urheber zu diskreditieren (Schnabel 2009; Leiserowitz et al. 2013; McKie o.J.). Dies hat laut Medienberichten massiv der öffentlichen Politikgestaltung im Vereinig-

ten Königreich und in anderen westlichen Ländern geschadet und führte auch dazu, dass diejenigen Argumente vermehrt in westlichen Medien thematisiert wurden, die den Klimawandel leugnen (Schnabel 2009; McKie o.J.). In den USA ging als Folge von Climategate die gesamtgesellschaftliche Überzeugung vom Klimawandel, die Risikowahrnehmung und das Vertrauen in die Wissenschaft messbar zurück (Leiserowitz et al. 2013). Der Cyberangriff auf das Forschungsinstitut hatte damit einen erheblichen Einfluss auf die öffentliche Wahrnehmung des globalen Klimawandels und das Vertrauen in die Wissenschaft.

Angriffe wie dieser könnten auch staatliche Stellen wie Umweltbehörden treffen und dabei erheblichen gesellschaftlichen Schaden anrichten: Laut Shandler und Gomez (2023) verringern Cyberangriffe, die auf öffentliche Institutionen oder Strukturen der öffentlichen Daseinsvorsorge abzielen, tendenziell das Vertrauen der Bevölkerung in den Staat. Cybersicherheit von politischen Institutionen ist damit nicht nur aus umweltpolitischer, sondern grundsätzlich aus demokratischer Perspektive unabdingbar, und Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz von IT-Systemen sind notwendig, um zu verhindern, dass Cyberattacken die politischen Systeme und letztlich die Gesellschaft destabilisieren.

#### 4. Angriffe auf die Meinungsbildung

Die massive Welle von online verbreiteten Falschinformationen und Verschwörungstheorien während der Covid-19-Pandemie hat gezeigt, dass Krisenzeiten mit unsicherer Informationslage im digitalen Zeitalter bewusst ausgenutzt werden, um Unsicherheit in der Bevölkerung zu verbreiten, die gesellschaftliche Spaltung voranzutreiben und das Vertrauen in staatliche Maßnahmen zu untergraben. Seit 2020 ist ein starker Rückgang des Vertrauens der deutschen Bevölkerung in die Demokratie zu verzeichnen. Gleichzeitig sprechen immer mehr Bürger\*innen dem Staat die Handlungsfähigkeit bei der Erfüllung seiner Aufgaben und dem Lösen von Problemen ab (siehe Kapitel 2.6). Digitale Angriffe auf die Meinungsbildung und den gesellschaftlichen Diskurs richten sich oft gezielt gegen einzelne politisch aktive Personen, beinhalten aber ebenfalls gezielte Desinformationen zu bestimmten Themenkomplexen. Die verwendeten Angriffsmuster und -strategien sind dabei teilweise schon lang etabliert, gewinnen im Internet aber an Dynamik, Reich-

weite und durch technische Innovationen der digitalen Welt (siehe Kapitel 2.8) neue Möglichkeiten.

Angriffe auf private Personen und Amtsträger\*innen gewinnen gegenwärtig vor allem durch sogenannte Deep Fakes eine neue Dimension. Hierbei handelt es sich um Bild-, Ton- oder Videoaufnahmen, die mittels Künstlicher Intelligenz beliebig verfremdet werden können, um Menschen in Kontexten abzubilden oder ihnen Aussagen zuzuschreiben, die ihr politisches oder soziales Standing untergraben könnten (Doss et al. 2023). So wurde der Klimaaktivistin Greta Thunberg die Forderung nach einem Einsatz von „veganen Granaten“ in bewaffneten Konflikten in den Mund gelegt, um ihr Engagement für die Umwelt durch Überspitzung lächerlich zu machen. Zwar wurde das betreffende Video ursprünglich zu satirischen Zwecken erstellt, der entsprechende Hinweis wurde jedoch bei der Weiterverbreitung in den sozialen Netzwerken teilweise absichtlich entfernt (Bart 2023). Fortschritte im Bereich der KI lassen vermuten, dass derartige Bilder und Videos zukünftig immer leichter produzierbar und gleichzeitig immer schwieriger von realen Aufnahmen zu unterscheiden sein werden. Schon 2023 konnten 27 bis 50 % der Proband\*innen einer Studie authentische Videos und Deep Fakes nicht unterscheiden (Doss et al. 2023); zukünftig könnte dieser Prozentsatz noch weiter steigen.

Neben Personen geraten auch ganze Themenkomplexe immer wieder in den Fokus von Desinformationskampagnen. Im wissenschaftlichen Kontext wird dabei zwischen Wissenschaftsleugnung („science denialism“; etwa Leugnung des Klimawandels, des Holocausts oder der Nützlichkeit von Impfstoffen) und Pseudoscientismen, beispielsweise Homöopathie oder Kreationismus, unterschieden; beide Varianten der Pseudowissenschaft schaden der Gesellschaft und/oder der Umwelt (Hirvonen und Karisto 2022). Es ist bekannt, dass durch politische Gegner von Klimaschutzmaßnahmen, etwa autokratische Regimes oder Anhänger demokratiefeindlicher Bewegungen (siehe Kapitel 2.4), gestreute Fehlinformationen das Vertrauen der Öffentlichkeit in die wissenschaftliche Expertise untergraben, politische Entscheidungsfindungsprozesse behindern sowie die Umsetzung effektiver Lösungen für die Klimakrise sabotieren (Calliess 2021; Berger 2022). Laut IPCC hat Desinformation in der Vergangenheit bereits dazu beigetragen, dass dringende Maßnahmen gegen den Klimawandel dadurch verzögert wurden (Freiling und Matthes 2023).

In der digitalen Welt verbreiten sich derartige Desinformationen rasant, und die in Kapitel 2.8 umrissenen Trends des Internets der Zukunft bieten vielfältige Indizien, dass sich bestehende Probleme weiter verschärfen könnten. So können etwa pseudowissenschaftliche Artikel zur Unterminierung von Klimaschutzmaßnahmen mithilfe von KI-Anwendungen in großer Zahl und mit geringem Aufwand produziert und in sogenannten „predatory journals“ (wörtlich „Raubjournale“) gegen Bezahlung und ohne wissenschaftlich eigentlich erforderlichen Review-Prozess veröffentlicht werden (Krawczyk und Kulczycki 2021). Dies verschafft Gegner\*innen solcher Maßnahmen ein vermeintliches wissenschaftliches Fundament in gesellschaftlichen und politischen Debatten. Auch außerhalb des wissenschaftlichen Kontextes lassen sich KI-erzeugte „Belege“ für Desinformationen immer schwieriger identifizieren bzw. erfordert ihre Entkräftung immer höheren Aufwand. In sozialen Medien werden Fehlinformationen zum Klimawandel häufiger geteilt als verifizierte, wissenschaftlich fundierte Inhalte, und erreichen somit eine größere Verbreitung (King et al. 2022).

Sowohl die Art der gestreuten Fehlinformationen als auch die Strategien zur Verbreitung verändern sich laufend. So wurde der Klimawandel in der Vergangenheit oft offen geleugnet. Im Laufe der Zeit hat sich dies in verschiedene, auf den ersten Blick weniger konfrontative Strategien verlagert. Beispielsweise finden Behauptungen, die Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen als Bedrohung der Wirtschaft oder nationalen Sicherheit bezeichnen oder dem Klimawandel positive Folgen wie höhere Ernteerträge bestimmter Pflanzen zuschreiben, vermehrt Zulauf (Berger 2022; Berger et al. 2023). Die Komplexität der Herausforderungen, die durch den Klimawandel entstehen, wird dabei bewusst genutzt, um Zweifel an der Notwendigkeit von Klimaschutzmaßnahmen zu säen oder um Forschungsergebnisse zu diskreditieren (Berger et al. 2023). Hierbei wird von sogenannten „Deny, Delay and Diffuse“-Taktiken – leugnen, verzögern und zerstreuen – gesprochen, die darauf abzielen, durch öffentliche Meinungsbeeinflussung politische Maßnahmen und Regulierungen zum Klimawandel zu unterbinden (Berger et al. 2023), indem die wissenschaftliche Faktenbasis angezweifelt, politisches Handeln verzögert und der gesellschaftliche

Diskurs auf andere Themen gelenkt wird (King et al. 2022). Zu den gängigen Argumenten dieser Taktiken zählen etwa Whataboutism („Warum sollten wir Maßnahmen gegen den Klimawandel ergreifen, wenn Land X viel mehr Emissionen erzeugt?“) oder Doomism: „Alle Maßnahmen kommen zu spät, der Klimawandel ist unaufhaltbar“ (Lamb et al. 2020).

Digitale Angriffe auf die Meinungsbildung geschehen koordiniert und zielgerichtet. Urheber\*innen und Multiplikator\*innen solcher Attacken können dabei sowohl andere Staaten und Geheimdienste, aber auch Individuen aus dem Inland sein, die gegenläufige politische Ziele verfolgen (siehe Kapitel 2.4). Die Umsetzung umweltpolitischer Ziele wie Transformation, Klima- und Naturschutz ist in demokratischen Systemen an den Rückhalt in der Gesellschaft gebunden, der auf diese Weise reduziert werden soll. Wirkungsvoller Umweltschutz bedeutet daher zunehmend auch, diesen Angriffen durch Vorbeugung und Resilienz angemessen begegnen zu können.

Politik und Zivilgesellschaft stellen sich dem Problem schon heute mit einer Vielzahl von Projekten und Präventionsangeboten entgegen. So fördert das BMBF seit 2022 eine Reihe von Forschungsprojekten, die sich um das Erkennen, Verstehen und Bekämpfen von Fake News drehen (Bundministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2022). Auch die Europäische Kommission fördert eine Vielzahl von Projekten zur Bekämpfung von Desinformation (Europäische Kommission (EK) o.J.), und die Bertelsmann Stiftung betreibt seit Januar 2024 das Beteiligungsprojekt „Forum gegen Fakes – Gemeinsam für eine starke Demokratie“<sup>44</sup>, in dem gemeinsam mit Bürger\*innen Empfehlungen für den Umgang mit Desinformationen für die Politik erarbeitet werden sollen (Bertelsmann Stiftung 2024).

### Fazit für Umweltpolitik und -forschung

Die zunehmende Vernetzung aller Lebensbereiche führt dazu, dass auch Cyberangriffe in den verschiedensten Formen möglich (und wahrscheinlicher) werden und Cybersicherheit somit ein immer relevanteres Konzept wird, dessen Ansätze je nach Anwendung passend gewählt werden müssen.

<sup>44</sup> <https://forum-gegen-fakes.de/>

Angriffe auf politische Institutionen und die gezielte Beeinflussung der Meinungsbildung haben direkte Auswirkungen auf das Vertrauen in den Staat und dessen Umweltschutzmaßnahmen. Cyberangriffe können dabei nicht nur physische Schäden anrichten, sondern auch das gesellschaftliche Vertrauen in die Regierung untergraben. Besonders kritisch ist die gezielte Desinformation im Kontext von Umweltschutzthemen. Beispiele wie Climatedgate zeigen, wie Cyberangriffe genutzt werden können, um gesellschaftliche Spaltung zu verstärken und das Vertrauen in wissenschaftliche Erkenntnisse zum Klimawandel zu erschüttern. In diesem Kontext ist eine verstärkte Sensibilisierung innerhalb der Gesellschaft sowie der Institutionen erforderlich, um die Auswirkungen von Angriffen auf politische Institutionen und die Meinungsbildung zu minimieren und sich möglichst ganzheitlich dagegen zu wappnen.

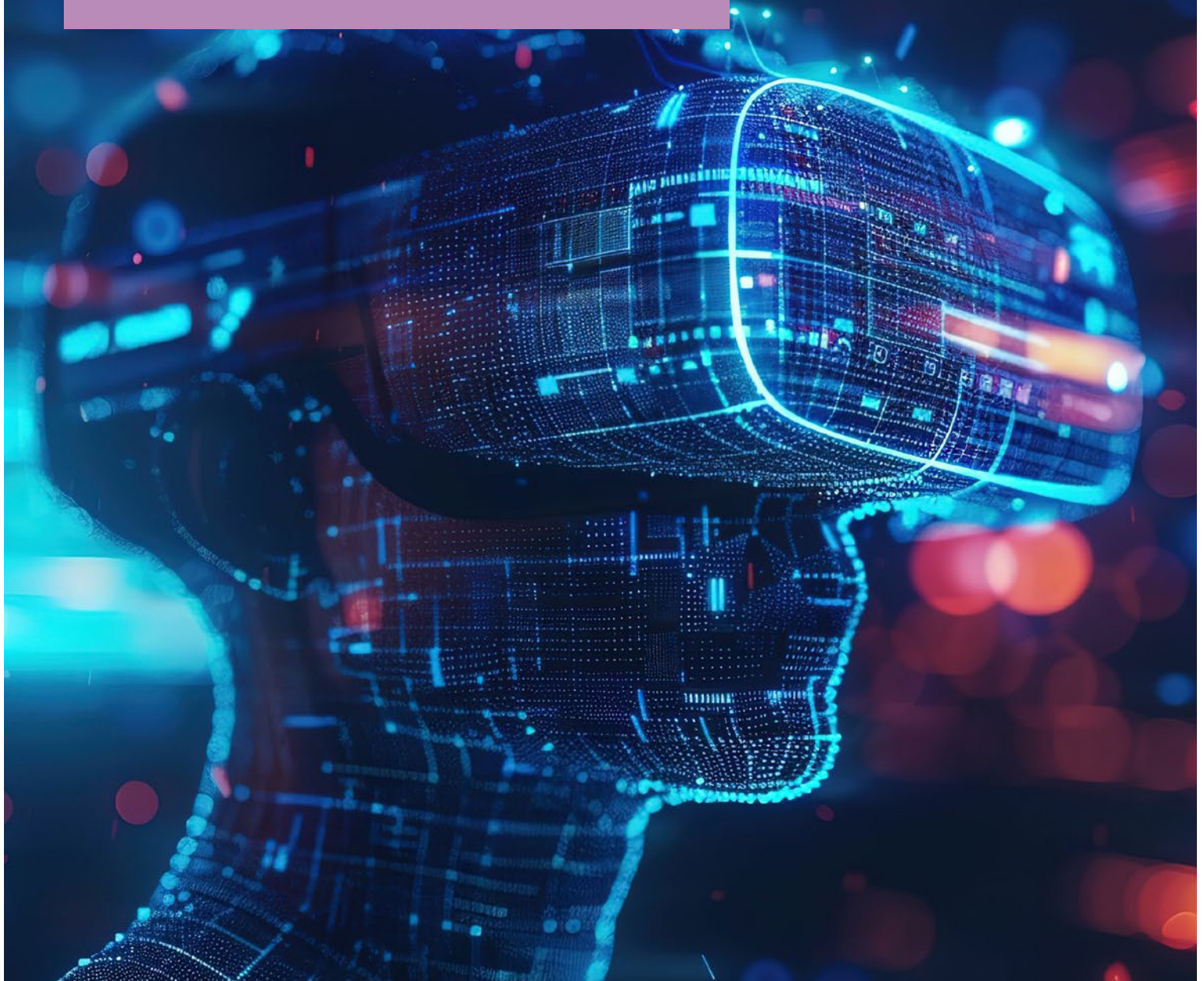
Die Wechselwirkung zwischen Cyberangriffen und Umweltaspekten erfordert in Zukunft die Integration beider Themen in politischen Strategien, um Umweltschäden zu vermeiden, die Arbeitsfähigkeit von Umweltverwaltungen zu erhalten sowie das Vertrauen in staatliche Institutionen wiederherzustellen und zu stärken und gesellschaftliche Akzeptanz für Umweltschutzmaßnahmen zu fördern. Eine erfolgreiche Integration von Cybersicherheit und Umweltschutz bedeutet dabei, nicht nur die Integrität von Daten und Technologien zu schützen, sondern auch sicherzustellen, dass die Auswirkungen von Cyberangriffen auf die Umwelt begrenzt werden (Sühlmann-Faul und Rammler 2022). Umgekehrt muss ebenfalls in den Blick rücken, wie Klimawandel und eine sich verändernde natürliche Umgebung die Cybersicherheit bedrohen, wenn etwa Extremwetterereignisse kritische Infrastrukturen beschädigen und Cyberkriminelle entstehende Schwachstellen ausnutzen (Arntz 2020).

Da alle beschriebenen Angriffsmuster in Zukunft durch weitere Vernetzung mutmaßlich zunehmen werden, wird Resilienz zu einem immer wichtigeren Ansatz des Umgangs mit Cyberattacken, um im Falle eines Angriffs die negativen Folgen so gering wie möglich zu halten. Die Bandbreite der möglichen Maßnahmen reicht dabei vom Vorhalten redundanter Infrastruktur, um Ausfälle zu verhindern (siehe Emerging Issue 1), über verbesserte Regulation von Online-Plattformen und ihre Moderation von Desinformation bis hin zu Sensibilisierung und Medienkompetenz. Die meisten dieser Ansätze berühren den

Umweltbereich nur indirekt; die Rolle des Umweltressorts könnte aber sein, zum einen die Umweltdimension von Cyberangriffen in der ressortübergreifenden Zusammenarbeit weiter herauszuarbeiten. Zum anderen könnte es durch umfassende Öffentlichkeitsarbeit die Verbreitung von Umweltthemen und wissenschaftlich fundierten Inhalten fördern.

# 3

## Ausblick



### 3 Ausblick

Der vorliegende Bericht stellt neun ausgewählte Zukunftsthemen des 2022 gestarteten dritten Horizon Scanning-Zyklus vor, die als wesentliche Trends mit potenziellen Umweltwirkungen und dementsprechend Anknüpfungspunkten für das Umweltressort identifiziert wurden.

Der Prozess war geprägt von den Nachwirkungen der Corona-Pandemie sowie vom (Angriffs-)Krieg Russlands auf die Ukraine. Während bei einigen der neun breit gefächerten Zukunftsthemen die Anknüpfungspunkte zur Umweltpolitik auf den ersten Blick erkennbar sind, wie z. B. beim Thema „Meerwasserentsalzung“, erschließen sich die Bezüge zur Umweltpolitik bei anderen beleuchteten Trends, wie z. B. beim Thema „Cybersicherheit“ oder auch bei gesellschaftlichen Trends, wie z. B. „Demokratie in Gefahr“, erst auf den zweiten Blick.

Die identifizierten Zukunftsthemen lassen sich den übergeordneten Themenfeldern der strategischen Vorausschau im Umweltressort zuordnen (siehe Abbildung 13). Die Themenfelder der strategischen Vorausschau stehen für diejenigen Bereiche, in denen das Umweltressort künftig neue und für die eigene Arbeit relevante Entwicklungen aufspüren möchte. Sie dienen im Horizon Scanning-Prozess als Suchräume, in denen nach schwachen Signalen gescannt wurde (siehe Kapitel 1.2).

#### *Umweltpolitische Anknüpfungspunkte der Zukunftsthemen*

Für das Umweltressort ist eine frühzeitige Identifikation von neuen Themen, Trends und sich abzeichnenden Veränderungen wichtiger Bestandteil einer vorausschauenden und gestaltungsorientierten Umweltpolitik. Damit wird die strategische Handlungsfähigkeit des Ressorts gestärkt, um proaktiv auf künftige Gefährdungen von Mensch und Umwelt reagieren sowie Chancen zur Verbesserung des Umweltzustandes besser nutzen zu können. Das Horizon Scanning erfüllt eine wichtige Funktion für das Umweltressort, indem es

- ▶ neue sozioökonomische und technologische Entwicklungen frühzeitig erkennt und beschreibt,
- ▶ die oftmals noch unscharfen Themen und Entwicklungen plausibilisiert, strukturiert

und somit für die weitere Bearbeitung und Umsetzung zugänglich macht,

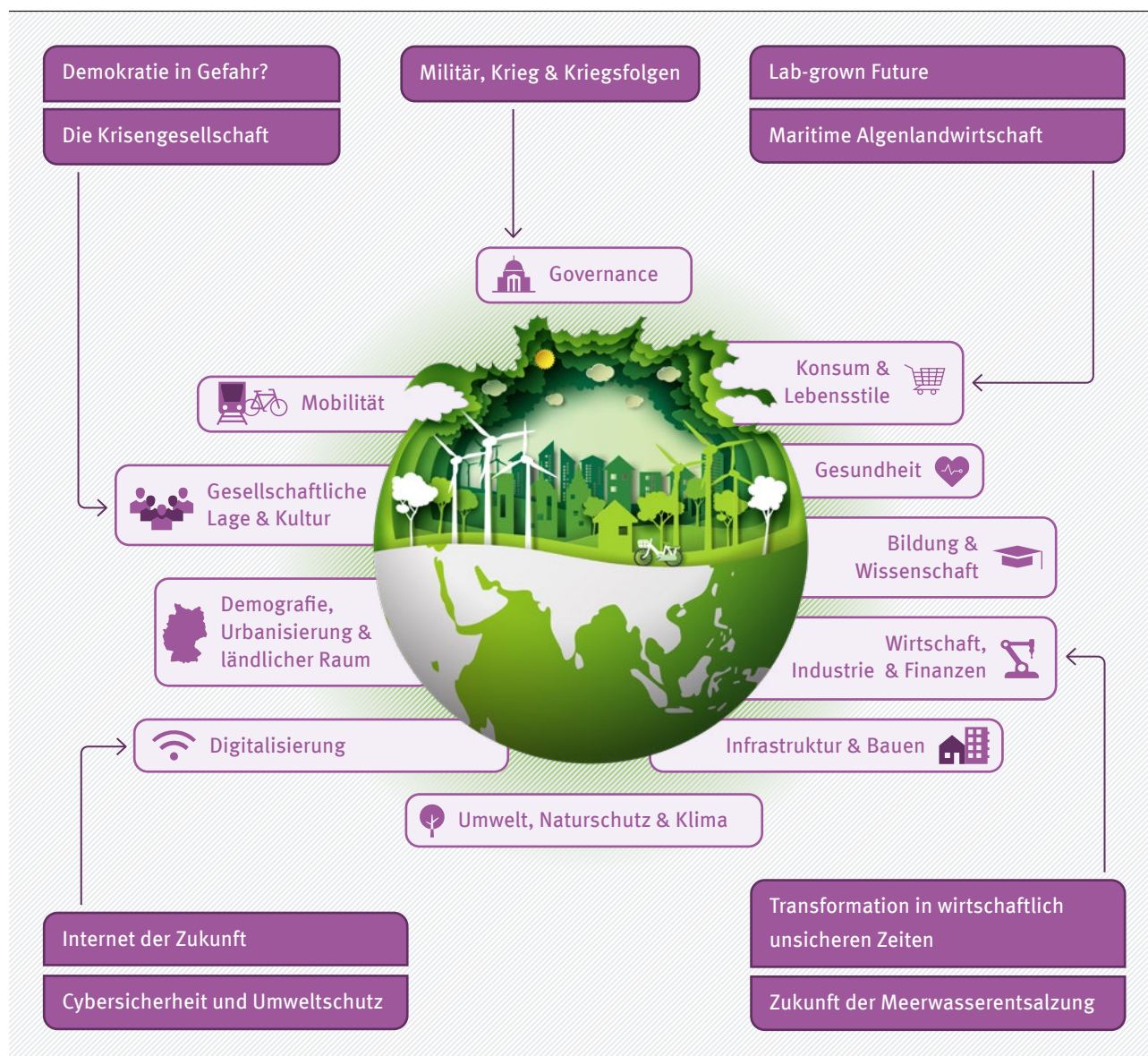
- ▶ Art und Umfang von deren Auswirkungen auf Mensch und Umwelt abschätzt,
- ▶ erste Hinweise auf die Dringlichkeit und Handlungsrelevanz der Themen in der politischen Prioritätensetzung formuliert.

Die im Bericht vorgestellten neun Zukunftsthemen haben bislang nicht bzw. nicht in dem hier dargestellten Zuschnitt Eingang in umweltpolitisches Handeln gefunden. Die Auseinandersetzung mit den Umweltwirkungen der einzelnen Zukunftsthemen hat zahlreiche Hinweise gegeben, wo umweltpolitische Anknüpfungspunkte bestehen, die im Rahmen von Umweltforschung und -politik aufgegriffen und weiter betrachtet werden können. Erste Anknüpfungspunkte sind, ausgehend von den jeweiligen themenspezifischen Fazits, im folgendem vorgestellt:

- ▶ **Lab-grown Future:** Die Lab-grown Future umfasst mehr als nur In-vitro-Fleisch. Immer mehr Lebensmittel (z. B. Fisch, Eier, Milch) und Materialien (z. B. Leder, Holz, Baumwolle) werden im Labor in Zellfabriken produziert, ebenso wie Chemikalien, Energie und Kraftstoffe. Produktionsverfahren der Lab-grown Future können bei optimaler Implementierung zu einer Reduktion von Treibhausgasemissionen, Flächen- und Wasserverbrauch sowie Tierleid beitragen, da die Produktion von Lebensmitteln und Materialien aus der konventionellen Landwirtschaft in ein kontrolliertes Laborumfeld verlagert wird. Gleichzeitig verursachen die hochtechnisierten Herstellungsverfahren neue Probleme für die Umwelt, insbesondere bezüglich ihres Energie- und Ressourcenverbrauchs. Eine vollständige Substitution konventioneller Produktion ist angesichts des hohen Produktionsaufwands nicht zu erwarten; vielmehr könnte punktuelle Substitution positive Umweltwirkungen entfalten. Um die Lab-grown Future nachhaltig zu gestalten, sind umfassende Umweltbewertungen über den gesamten Lebenszyklus der neuen Produkte notwendig. Reboundeffekte müssen vermieden und die Lab-grown Future in eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsstrategie ein-

Abbildung 13

### Zuordnung der Zukunftsthemen zu den Themenfeldern der strategischen Vorausschau des Umweltressorts



Quelle: eigene Darstellung; <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/portal-zukunftsthemen-zukunftsthemen>

gebettet werden, die Suffizienz und die Reduktion des Konsums in den Vordergrund stellt.

- **Zukunft der Meerwasserentsalzung:** Süßwasserknappheit ist bereits heute an vielen Orten der Welt ein drängendes Thema. Aufgrund der nahezu unerschöpflichen Ressource Meerwasser bietet die Meerwasserentsalzung ein großes Potenzial, der Süßwasserknappheit entgegenzuwirken. Meerwasserentsalzung hat verschiedene Auswirkungen auf die Umwelt. Zum einen ist der Energiebedarf sehr hoch, der derzeit meist durch fossile Brennstoffe gedeckt wird und zu

hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen führt. Zum anderen fallen hochkonzentrierte Solen an, die oft zusätzliche Chemikalien und Schwermetalle enthalten. Ihre Einleitung ins Meer gefährdet Ökosysteme durch Sauerstoffzehrung und Schadstoffanreicherung. Drittens können Wasserentnahme und -einleitung marine Lebewesen beeinträchtigen. Außerdem werden bei der Herstellung der Anlagen Ressourcen verbraucht. Für die Umweltpolitik ergeben sich daraus eine Reihe von Ansatzpunkten: Die Dekarbonisierung der Entsalzungsanlagen durch den Einsatz erneuerbarer Energien ist unabdingbar, die Entsorgung der Sole sollte streng reguliert

und gleichzeitig die Erforschung innovativer Verfahren zur Soleverwertung gefördert werden. Darüber hinaus müssen die Auswirkungen auf marine Ökosysteme minimiert und die Meerwasserentsalzung in ein nachhaltiges Wassermanagement integriert werden, das Wassereinsparung und alternativen Wasserquellen Vorrang einräumt.

- ▶ **Maritime Algenlandwirtschaft:** Algen existieren seit Milliarden von Jahren auf der Erde und werden seit langem vom Menschen genutzt. In jüngster Zeit eröffnen sich jedoch neue Nutzungspotenziale für Makroalgen, die als nachhaltige Quelle für Nahrungsmittel, Rohstoffe und Produkte für den Gesundheitssektor dienen können. Algenfarmen bieten große Potenziale für den Umwelt- und Klimaschutz: Sie können CO<sub>2</sub> binden, die Wasserqualität verbessern, zum Küstenschutz beitragen und durch die Substitution landwirtschaftlicher Produkte den Druck auf terrestrische Ökosysteme verringern. Sie bergen aber auch Risiken für marine Ökosysteme. So können Algenfarmen natürliche Algenbestände gefährden, die Biodiversität negativ beeinflussen und durch den hohen Energiebedarf bei der Weiterverarbeitung, z. B. Trocknung, negative Umweltwirkungen verursachen. Das Umweltressort könnte die Entwicklung der neuen Algenlandwirtschaft von Anfang an begleiten und mitgestalten. Die Modellierung ökologischer Effekte im Vorfeld und ein kontinuierliches Monitoring während des Betriebs von Algenfarmen könnten helfen, negative Auswirkungen auf marine Ökosysteme zu minimieren. Da eine marine Algenproduktion in Wechselwirkung mit bereits bestehenden landwirtschaftlichen Strukturen steht, bietet sich eine ressortübergreifende Strategie an, um Synergiepotenziale zu nutzen und Rebound-Effekte zu vermeiden. Das Umweltressort könnte zudem Verbraucher\*innen über die Potenziale einer nachhaltigen Algenlandwirtschaft informieren und über die öffentliche Beschaffung die Nachfrage mitgestalten.
- ▶ **Demokratie in Gefahr?:** Antidemokratische Kräfte gewinnen weltweit an Einfluss und gefährden demokratische Systeme, mit negativen Auswirkungen auf die Umwelt- und Klimapolitik. Antidemokratische Tendenzen und die Verbreitung von Desinformation, insbesondere im Zusammenhang mit dem Klimawandel, untergraben das Vertrauen in demokratische Prozesse und wissenschaftliche

Erkenntnisse. Sie erschweren die internationale Zusammenarbeit und behindern die Umsetzung von Umwelt- und Klimaschutzmaßnahmen. Das Erstarken populistischer Parteien in Deutschland gefährdet umweltpolitische Fortschritte und kann zu einer Blockadehaltung gegenüber Umweltinitiativen führen. Das Umweltressort kann einen wichtigen Beitrag zur Stärkung von Demokratie und Umweltschutz leisten. Durch internationale Zusammenarbeit kann die Transparenz von Umweltverantwortlichkeiten verbessert werden. Auf nationaler Ebene sollte das Umweltressort durch verstärkte Kommunikationsmaßnahmen zu Umwelt- und Klimaschutz sowie zu den Folgen antidemokratischer Entwicklungen Desinformation entgegenwirken. Die Förderung von Informationskampagnen und Angeboten zum Faktencheck sowie die Stärkung von Bürgerbeteiligungsmodellen können die demokratische Basis des Umweltschutzes stärken.

- ▶ **Militär, Krieg und Kriegsfolgen:** Kriege und militärische Konflikte haben verheerende Auswirkungen auf Umwelt und Natur, sowohl während der Kampfhandlungen als auch in der Nachkriegszeit. Umweltzerstörung wird als Kriegsstrategie eingesetzt, beispielsweise durch den Einsatz umweltverändernder Technologien oder die gezielte Zerstörung kritischer Infrastrukturen. Die zunehmende Technisierung des Militärs führt zudem zu einem hohen Ressourcenverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Das Umweltressort kann sich für einen besseren Schutz der Umwelt in Kriegs- und Nachkriegssituationen einsetzen, indem es sich für die Schließung von Regulierungslücken in internationalen Abkommen und die Entwicklung von Sanktionsmechanismen bei Verstößen einsetzt. Wichtig ist auch die Förderung der Forschung zu den Umweltfolgen von Kriegen und zu nachhaltigen Militärtechnologien. Das Umweltressort kann die Zusammenarbeit mit NGOs und zivilgesellschaftlichen Organisationen unterstützen und sich für eine ressortübergreifende Strategie zur Stärkung der Krisenfestigkeit der Klima- und Umweltpolitik einsetzen.
- ▶ **Die Krisengesellschaft:** Die deutsche Gesellschaft befindet sich in einer Phase der Polykrise, die zu Stress, Erschöpfung und Vertrauensverlust in politische Institutionen führt. Viele Menschen fühlen sich verunsichert und überfordert angesichts

von Krisen wie Klimawandel, Krieg, Pandemie und Inflation. Die Reaktionen auf die Polykrise sind vielfältig: Manche Menschen reagieren mit Krisenresignation und -verdrängung, ziehen sich ins Private zurück und wenden sich von gesellschaftlichen und politischen Themen ab. Andere wiederum engagieren sich verstärkt in Protestbewegungen, wie Fridays for Future oder der Letzten Generation, um auf die Dringlichkeit der Krisen aufmerksam zu machen. Auch in der Arbeitswelt nehmen Stress und krankheitsbedingte Fehlzeiten zu, was die Produktivität und die Umsetzung der Nachhaltigkeitstransformation beeinträchtigen kann. Durch transparente Kommunikation, die Förderung von Bürgerbeteiligung (z. B. Bürgerdialoge, Bürgerhaushalte) und den Aufbau von Systemvertrauen (z. B. durch konsistente Umweltpolitik und Erfolgskommunikation) kann das Umweltressort dazu beitragen, Ängste abzubauen und Zuversicht zu stärken. Auch der konstruktive Dialog mit Protestbewegungen wie Fridays for Future und die Berücksichtigung ihrer Anliegen sind wichtig, um Frustration und Polarisierung abzubauen. Das Umweltressort kann sich auch für widerstandsfähige Arbeitsmodelle einsetzen, die die Produktivität und das Wohlbefinden in der Arbeitswelt verbessern, z. B. durch die Förderung von Heimarbeit und flexiblen Arbeitszeiten.

- ▶ Transformation in wirtschaftlich unsicheren Zeiten: Die deutsche Wirtschaft steht vor der Herausforderung der Transformation hin zu einer sozial-ökologischen Marktwirtschaft, die jedoch durch wirtschaftliche Unsicherheiten, hohe Investitionsbedarfe und die Frage nach einer gerechten Verteilung der Transformationskosten erschwert wird. Sinkende Einkommen und Vermögen bei Bürger\*innen können die Akzeptanz für die sozial-ökologische Transformation und die Investitionsfähigkeit in private Klimaschutzmaßnahmen beeinträchtigen. Unternehmen stehen unter wirtschaftlichem Druck und müssen trotz Unsicherheiten in Klimaschutz und Innovationen investieren. Der Staat sieht sich mit einem schrumpfenden Staatshaushalt konfrontiert, was die staatliche Investitionsfähigkeit in die Transformation einschränkt. Das Umweltressort kann einen wichtigen Beitrag zur sozialverträglichen Gestaltung der Transformation leisten, indem es die Verteilungseffekte von umweltpolitischen Instrumenten berücksichtigt und Ausgleichsme-

chanismen schafft. Die Förderung von KMU und die energetische Sanierung von Mietwohnungen sind Beispiele für zielgerichtete Maßnahmen. Das Umweltressort sollte sich aktiv am verteilungspolitischen Diskurs beteiligen und die wirtschaftliche Bedeutung der Umweltpolitik hervorheben. Die Weiterentwicklung von Exportförderprogrammen für Umwelttechnologien und der Aufbau eines Netzwerks von Unterstützer\*innen in der Wirtschaft können die Transformation zusätzlich vorantreiben.

- ▶ Internet der Zukunft: Das Internet der Zukunft wird durch Innovationen wie 5G, Edge Computing, Extended Reality und künstliche Intelligenz (KI) immer immersiver und vermischt physische und virtuelle Welten. Neue Endgeräte wie VR-/AR-Brillen, haptische Anzüge und KI-gestützte Anwendungen ermöglichen ein neues Nutzungserlebnis. Die Herstellung und der Betrieb der neuen Hardware verursachen einen erheblichen Ressourcen- und Energieverbrauch und tragen zur Entstehung von Elektronikschrott bei. Die neuen datenintensiven Inhalte und Anwendungen erhöhen den Datenverkehr und damit den Energiebedarf der Netzinfrastuktur. Gleichzeitig bietet das Internet der Zukunft auch Chancen für die Umweltbildung und die Vermittlung von Umweltthemen, z. B. durch immersive Naturerlebnisse oder die Visualisierung von Klimawandelfolgen. Das Umweltressort sollte ein detailliertes Monitoring der Umweltwirkungen des Internets der Zukunft etablieren, um Chancen und Risiken besser abschätzen zu können. Wichtige umweltpolitische Ansatzpunkte sind die Förderung energie- und ressourceneffizienter Hardware, die Förderung von Reparaturmöglichkeiten und Recyclingmethoden sowie die Nutzung erneuerbarer Energien für den Betrieb der Technologien. Das Umweltressort sollte sich darüber hinaus in ressortübergreifender Zusammenarbeit für eine nachhaltige Gestaltung des Internets der Zukunft einsetzen.
- ▶ Cybersicherheit und Umweltschutz: Cyberangriffe nehmen zu und bedrohen immer mehr kritische Infrastrukturen, Unternehmen, politische Institutionen und die öffentliche Meinungsbildung. Die zunehmende Vernetzung und Digitalisierung vergrößert die Angriffsfläche und eröffnet neue Möglichkeiten für Cyberkriminelle. Cyberangriffe können erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt

haben. Angriffe auf kritische Infrastrukturen wie Kraftwerke oder Kläranlagen können zu Havarien führen und Schadstoffe freisetzen. Cyberangriffe auf Unternehmen können die Produktion von Umwelttechnologien stören und Investitionen in den Klimaschutz behindern, und Angriffe auf politische Institutionen und die Verbreitung von Desinformation können das Vertrauen in Umweltpolitik und Wissenschaft untergraben (z. B. „Climategate“). Das Umweltressort sollte die Cybersicherheit kritischer Infrastrukturen im Umweltbereich stärken und sich für eine bessere Regulierung von Online-Plattformen einsetzen, um die Verbreitung von Desinformation einzudämmen. Wichtig sind auch die Sensibilisierung der Bevölkerung für die Risiken von Cyber-Angriffen und die Förderung der Medienkompetenz. Auch die Entwicklung einer dezidierten Cybersicherheitsstrategie durch und für das Umweltressort kann eine Maßnahme sein, um die Resilienz des Umweltressorts gegen Cyberangriffe zu erhöhen. Zudem kann sich das Umweltressort in ressortübergreifender Zusammenarbeit für die Integration von Umwelt- und Cybersicherheitsaspekten einsetzen.

#### *Querbezüge zu gesellschaftlichen Dynamiken*

Untereinander weisen die Zukunftsthemen zahlreiche Querbezüge auf, d. h., die verschiedenen identifizierten Entwicklungen, die in den jeweiligen Emerging Issues herausgearbeitet sind, beeinflussen sich gegenseitig. Dies kann sowohl eine sich stärkende Beziehung als auch ein bremsender Einfluss sein. Solche Querbezüge sind in den Kapiteln der jeweiligen Zukunftsthemen ausführlich dargestellt.

Im Rahmen dieses Horizon Scanning-Berichts wurde bereits Wechselwirkungen zwischen den neun dargestellten Zukunftsthemen auf Ebene der Trendkapitel durch Querverweise auf die jeweils verwandten Kapitel gekennzeichnet. Im Folgenden werden die themenübergreifenden Entwicklungen herausgestellt, die die „großen“ gesellschaftlich-politischen Dynamiken unserer Zeit darstellen, die alle identifizierten Trends betreffen und bei der Gestaltung der Zukunft ebendieser Entwicklungen berücksichtigt werden sollten.

- ▶ Vertrauensverlust in Demokratien und radikalisierte Gesellschaften: Ein zentrales Problem, das viele der beschriebenen Trends und Entwicklungen zusammenführt, ist der Vertrauensverlust in

demokratische Institutionen. Dieser wird durch Desinformation verstärkt – u. a. im Kontext (a) sozialer Netzwerke –, die bestehende Unsicherheiten und Ängste ausnutzt. Besonders gefährlich ist, dass Desinformation zu einer Radikalisierung bestimmter gesellschaftlicher Gruppen führt, die zunehmend nach Sündenböcken suchen – aktuell oft „die Grünen“ oder „die Umweltpolitik“ aber auch „die Migranten“. Diese Radikalisierung untergräbt den gesellschaftlichen Konsens und blockiert notwendige Reformen, u. a. im Bereich der ökologischen Transformation. Eine gezielte Strategie, die Transparenz, Dialog und Aufklärung in den Vordergrund stellt, ist unerlässlich, um das Vertrauen in die Demokratie zu stärken und gesellschaftliche Spaltungen zu überwinden.

- ▶ Wahrnehmung von Bedrohung und Ängsten in der Polykrise: Der fortschreitende Klimawandel und andere tiefgreifende gesellschaftliche Veränderungen erhöhen den Druck auf Individuen und Gemeinschaften. Dieser Veränderungsdruck erzeugt Ängste und Unsicherheiten, die durch das ständige Erleben von Krisen – seien es wirtschaftlicher Abschwung, Pandemien oder geopolitische Konflikte – verschärft werden, und kann in einer „Krisengesellschaft“ enden. Menschen fühlen sich bedroht und reagieren zunehmend defensiv oder ablehnend auf notwendige Transformationen. Hervorzuheben ist hier beispielsweise die Ablehnung von (sozialen) nachhaltigen Innovationen, die als Bedrohung für etablierte Strukturen gesehen werden. Um diesen Ängsten zu begegnen, ist es entscheidend, politische Maßnahmen transparent zu gestalten und die Bevölkerung aktiv in den Transformationsprozess einzubeziehen, um so Bedrohungswahrnehmungen zu entschärfen und Vertrauen in die Politik aufzubauen.

Die Wechselwirkungen zwischen steigender Ungleichheit, Vertrauensverlust, Desinformation, und der Krisenerfahrung führen zu einer zunehmend radikalisierten und fragmentierten Gesellschaft. Dies erfordert ein grundsätzliches Umdenken in der Art und Weise, wie politische Maßnahmen, insbesondere im Bereich der Umwelt- und Klimapolitik, gestaltet und kommuniziert werden. Dazu sollte ein Prozess angestoßen werden, die Kommunikation umweltpolitischer Maßnahmen neu zu denken und sich dabei aller möglicher Ideen aus verschiedensten Bereichen (Digitalisierung, Marketing, Psychologie und Neuro-

wissenschaften usw.) zu bedienen. So können Umweltforschung und umweltpolitische Maßnahmen in Zukunft vielleicht so kommuniziert werden, dass gesellschaftliche Ängste treffsicher genommen werden, gesellschaftlicher Zusammenhalt gefördert wird und ein positives Narrativ über unsere künftige nachhaltige Zukunft gesellschaftlich verankert werden, an dem aktiv und gemeinsam die sozial-ökologische Transformation gestaltet wird.

### *Nächste Schritte*

Mit Abschluss des dritten Horizon Scanning-Zyklus liegt dem Umweltressort ein kompakter Überblick über neun neu aufkommende und umweltrelevante Zukunftsthemen vor. Im nächsten Schritt gilt es, diese Ergebnisse zu analysieren und in strategische Umweltpolitik umzusetzen. Dies kann beispielsweise durch den Austausch über die Themen in verschiedenen Formaten wie Workshops, Fachgesprächen oder Konferenzbeiträgen erfolgen. Insbesondere Themen, die sich in einem frühen Entwicklungsstadium befinden und in denen Wissenslücken hinsichtlich möglicher Umweltwirkungen bestehen, können im Rahmen vertiefender Analysen durch das Umweltressort weiterbearbeitet werden. Mit Methoden der strategischen Vorausschau, wie beispielsweise der Trendanalyse oder Szenario-Entwicklung, können konkrete Hinweise für umweltpolitische Gestaltungsoptionen entwickelt werden.

Die Entscheidung, ob und wie die vorgestellten Zukunftsthemen weiterbearbeitet werden, sollte themenspezifisch und referatsübergreifend, ggf. auch ressortübergreifend getroffen werden. Möglicherweise werden einige Themen nicht weiterverfolgt oder ihre Bearbeitung wird an andere fachverantwortliche Stellen verlagert. Der Horizon Scanning-Prozess dient auch dazu, bewusste Entscheidungen über Nichtbearbeitung von Themen zu fällen. Die Welt entwickelt sich weiter und damit vielleicht oder wahrscheinlich auch viele der in diesem Bericht dargestellten Themen. Es ist auch denkbar, dass die vorgestellten Themen in zukünftigen Horizon Scanning-Zyklen des Umweltressorts erneut zu berücksichtigen, insbesondere, wenn sich neue umweltrelevante Aspekte offenbaren.

# Quellenverzeichnis

## 1 Einleitung

### 1.1 Identifizierung und Genese der Zukunftsthemen

Allianz Trade (2023): The new risk frontier in finance: biodiversity loss. Concepts, challenges and a first quantitative case study on pollination. Allianz Trade. [https://www.allianz-trade.com/content/dam/onemarketing/aztrade/allianz-trade\\_com/en\\_gl/erd/publications/pdf/2023\\_02\\_28\\_Biodiversity.pdf](https://www.allianz-trade.com/content/dam/onemarketing/aztrade/allianz-trade_com/en_gl/erd/publications/pdf/2023_02_28_Biodiversity.pdf), Stand: 01.11.2024.

Behrendt, S.; Zieschank, R.; van Nouhys, J.; Scharp, M. (2015): „Horizon Scanning“ und Trendmonitoring als ein Instrument in der Umweltpolitik zur strategischen Früherkennung und effizienten Politikberatung. Texte. Band 106/2015. Umweltbundesamt (UBA). [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_106\\_2015\\_horizon\\_scanning\\_und\\_trendmonitoring\\_als\\_instrument\\_in\\_der\\_umweltpolitik.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_106_2015_horizon_scanning_und_trendmonitoring_als_instrument_in_der_umweltpolitik.pdf), Stand: 01.11.2024.

Cuhls, K.; van der Giessen, A.; Toivanen, H.; Erdmann, L.; Warnke, P.; Tolvanen, M.; Seiffert, L. (2015): Models of Horizon Scanning. How to integrate Horizon Scanning into European Research and Innovation Policies. <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccv/2015/Models-of-Horizon-Scanning.pdf>, Stand: 01.11.2024.

European Environment Agency (2023): Economic losses from weather- and climate-related extremes in Europe. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/economic-losses-from-climate-related>, Stand: 01.11.2024.

European Environment Agency (2024): Leitartikel – Europa auf den Klimawandel vorbereiten. <https://www.eea.europa.eu/de/articles/leitartikel-europa-auf-den-klimawandel-vorbereiten>, Stand: 27.09.2024.

Hungerland, T.; Meißner, L.; Czerniak-Wilmes, J.; Kind, S.; Bogenstahl, C. (2023): Sustainable Cooling – nachhaltige Kühlungsstrategien. TAB-Kurzstudie. Band 4. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000158817>, Stand: 01.11.2024. doi:10.5445/IR/1000158817.

Jetzke, T.; Abel, S.; Meißner, L.; Richter, S.; Michelmann, J.; Ziegler, O.; Domröse, L.; Knörzer, U.; Olliges, J.; Keppner, B. (2023): Von Quantencomputing über die Zukunft der Innenstädte bis zu einer neuen Weltordnung. Ergebnisse des zweiten Horizon Scanning-Zyklus für das Umweltressort. Umweltbundesamt (UBA). [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb\\_umweltrelevante\\_zukunftsthemen\\_von\\_quantencomputing\\_ueber\\_die\\_zukunft\\_der\\_innenstaedte\\_bis\\_zu\\_einer\\_neuen\\_weltordnung.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb_umweltrelevante_zukunftsthemen_von_quantencomputing_ueber_die_zukunft_der_innenstaedte_bis_zu_einer_neuen_weltordnung.pdf), Stand: 01.11.2024.

Jetzke, T.; Richter, S.; Abel, S.; Keppner, B.; Kahlenborn, W.; Weiß, D. (2021): Von Blockchain über Raumfahrt bis zu virtuellen Welten. Ergebnisse des ersten Horizon Scanning-Zyklus für das Umweltressort. Umweltbundesamt (UBA). [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/vdi\\_br\\_uba\\_report\\_horizon\\_scanning\\_web-bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/vdi_br_uba_report_horizon_scanning_web-bf.pdf), Stand: 01.11.2024.

Jetzke, T.; Richter, S.; Ferdinand, J.-P.; Schaat, S. (2019a): Künstliche Intelligenz im Umweltbereich. Anwendungsbeispiele und Zukunftsperspektiven im Sinne der Nachhaltigkeit. Texte. Band 56/2019. Umweltbundesamt (UBA). [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-06-04\\_texte\\_56-2019\\_uba\\_ki\\_fin.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-06-04_texte_56-2019_uba_ki_fin.pdf), Stand: 01.11.2024.

Keppner, B.; Kahlenborn, W.; Weiß, D.; Richter, S.; Jetzke, T.; Bovenschulte, M. (2020): Trendanalyse – eine Methode für Umweltforschung und –politik. Texte. Band 58/2020. Umweltbundesamt (UBA). [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-05-06\\_texte\\_58-2020\\_methodenpapier\\_trendanalyse-umweltwirkungen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-05-06_texte_58-2020_methodenpapier_trendanalyse-umweltwirkungen.pdf), Stand: 01.11.2024.

Umweltbundesamt (UBA) (2016): Horizon Scanning 2.0 - Etablierung eines Horizon Scanningsystems. Umweltbundesamt (UBA). <https://www.umweltbundesamt.de/horizon-scanning-20-etablierung-eines-horizon>, Stand: 01.11.2024.

Umweltbundesamt (UBA) (2024): Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#gesamtwirtschaftliche-bedeutung-der-umweltkosten>, Stand: 25.10.2024.

van Veen, B. L.; Ortt, J. (2021): Unifying weak signals definitions to improve construct understanding. *Futures* 134, S. 102837. doi:10.1016/j.futures.2021.102837.

## 2 Zukunftsthemen

### 2.1 Lab-grown Future

Albert Schweitzer Stiftung (2019): Fleisch und Milch als Auslaufmodell. <https://albert-schweitzer-stiftung.de/aktuell/fleisch-milch-auslaufmodell>, Stand: 01.11.2024.

Alvaro, C. (2019): Lab-Grown Meat and Veganism: A Virtue-Oriented Perspective. *J Agric Environ Ethics* 32 (1), S. 127–141. doi:10.1007/s10806-019-09759-2.

Appelhans, J.; Böttcher, C.; Keßler, K.; Mielke, C.; Nowack, A.; Purr, K.; Schwetje, A.; Sorg, D.; Tambk, J. (2022): Unterschätztes Treibhausgas Methan. Quellen, Wirkungen, Minderungsoptionen. Umweltbundesamt (UBA). [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba\\_pos\\_methanminderung\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_pos_methanminderung_bf.pdf), Stand: 01.11.2024.

Atalah, J.; Sanchez-Jerez, P. (2020): Global assessment of ecological risks associated with farmed fish escapes. *Global Ecology and Conservation* 21. doi:10.1016/j.gecco.2019.e00842.

Augustin, M. A.; Hartley, C. J.; Maloney, G.; Tyndall, S. (2023): Innovation in precision fermentation for food ingredients. *Critical reviews in food science and nutrition*, S. 1–21. doi:10.1080/10408398.2023.2166014.

Banks, M.; Johnson, R.; Giver, L.; Bryant, G.; Guo, M. (2022): Industrial production of microbial protein products. *Current Opinion in Biotechnology* 75, S. 102707. doi:10.1016/j.copbio.2022.102707.

Barrantes, A. M. (2019): Lab-grown Futures. Design exploration for the development of fungi as a leather-like material. Master of Arts Thesis. Aalto.

- Beckwith, A. L.; Borenstein, J. T.; Velásquez-García, L. F. (2021): Tunable plant-based materials via in vitro cell culture using a *Zinnia elegans* model. *Journal of Cleaner Production* 288, S. 125571. doi:10.1016/j.jclepro.2020.125571.
- Beckwith, A. L.; Borenstein, J. T.; Velásquez-García, L. F. (2022): Physical, mechanical, and microstructural characterization of novel, 3D-printed, tunable, lab-grown plant materials generated from *Zinnia elegans* cell cultures. *Materials Today* 54, S. 27–41. doi:10.1016/j.mattod.2022.02.012.
- Berry, K. (o.J.): Lab-grown wood could be future of furniture. <https://www.bbc.com/news/science-environment-56270691>, Stand: 01.11.2024.
- BLUU GmbH (2023): Bluu Seafood. <https://www.bluu.bio/>, Stand: 01.11.2024.
- Bologna, M.; Aquino, G. (2020): Deforestation and world population sustainability: a quantitative analysis. *Scientific Reports* 10 (1). doi:10.1038/s41598-020-63657-6.
- Boukid, F.; Ganeshan, S.; Wang, Y.; Tülbek, M. Ç.; Nickerson, M. T. (2023): Bioengineered Enzymes and Precision Fermentation in the Food Industry. *International Journal of Molecular Sciences* 24 (12), S. 10156. doi:10.3390/ijms241210156.
- Bowie, J. U.; Sherkanov, S.; Korman, T. P.; Valliere, M. A.; Opgenorth, P. H.; Liu, H. (2020): Synthetic Biochemistry: The Bio-inspired Cell-Free Approach to Commodity Chemical Production. *Trends in Biotechnology* 38 (7), S. 766–778. doi:10.1016/j.tibtech.2019.12.024.
- Buchmann, K. (2022): Control of parasitic diseases in aquaculture. *Parasitology* 149 (14), S. 1985–1997. doi:10.1017/S0031182022001093.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (o. J.): Planetare Belastbarkeitsgrenzen. <https://www.bmu.de/themen/nachhaltigkeit/integriertes-umweltprogramm-2030/planetare-belastbarkeitsgrenzen>, Stand: 01.11.2024.
- Bundesvereinigung der Deutschen Ernährungsindustrie (BVE) (2023): Präzisionsfermentation: Die Zukunft der industriellen Molekülproduktion? <https://www.bve-online.de/themen/nachhaltigkeit/praezisionsfermentation>, Stand: 01.11.2024.
- Campbell, B. M.; Beare, D. J.; Bennett, E. M.; Hall-Spencer, J. M.; Ingram, J. S. I.; Jaramillo, F.; Ortiz, R.; Ramankutty, N.; Sayer, J. A.; Shindell, D. (2017): Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecology and Society* 22 (4). doi:10.5751/ES-09595-220408.
- Canon, G. (2023): Down to Earth: Is this lab-grown fish the future of seafood? We put it to the taste test. [www.theguardian.com/environment/2023/jun/15/lab-grown-fish-finless-foods](http://www.theguardian.com/environment/2023/jun/15/lab-grown-fish-finless-foods), Stand: 21.02.2024.
- Carter, M.; Cohen, M.; Eastham, L.; Gertner, D.; Ignaszewski, E.; Leman, A.; Murray, S.; O'Donnell, M.; Pierce, B.; Voss, S. (2022): 2022 State of the Industry Report | Fermentation: Meat, seafood, eggs, and dairy. The global fermentation industry focused on animal-free alternatives to conventional proteins continued to break new ground in 2022. Scientific advances, new products and prototypes, manufacturing facilities, and partnerships brought the world more meat, seafood, eggs, and dairy made via microorganisms—a nature-inspired technology primed to transform the future of food. <https://gfi.org/wp-content/uploads/2023/01/State-of-the-Industry-Report-Fermentation-2022.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Clomburg, J. M.; Crumbley, A. M.; Gonzalez, R. (2017): Industrial biomanufacturing: The future of chemical production. *Science* (New York, N.Y.) 355 (6320). doi:10.1126/science.aag0804.
- Corradini, P.; Gallo, S.; Gesualdi, F. (2016): A Tough Story of Leather. A journey into the tanning industry via the Santa Croce District. <https://labourbehindthelabel.org/wp-content/uploads/2016/11/FAIR-CYS-long-report-ENG-nov-EDITION.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Crowther, T. W.; Glick, H. B.; Covey, K. R.; Bettigole, C.; Maynard, D. S.; Thomas, S. M.; Smith, J. R.; Hintler, G.; Duguid, M. C.; Amattulli, G.; Tuanmu, M.-N.; Jetz, W.; Salas, C.; Stam, C.; Piotta, D.; Tavani, R.; Green, S.; Bruce, G.; Williams, S. J.; Wiser, S. K.; Huber, M. O.; Hengeveld, G. M.; Nabuurs, G.-J.; Tikhonova, E.; Borchardt, P.; Li, C.-F.; Powrie, L. W.; Fischer, M.; Hemp, A.; Homeier, J.; Cho, P.; Vibrans, A. C.; Umunay, P. M.; Piao, S. L.; Rowe, C. W.; Ashton, M. S.; Crane, P. R.; Bradford, M. A. (2015): Mapping tree density at a global scale. *Nature* 525 (7568), S. 201–205. doi:10.1038/nature14967.
- Deutscher Bundestag (2020): Tierproduktfreie Milch. Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages. <https://www.bundestag.de/resource/blob/805264/b5962eb6f5efe74d-1b26919388bc4abb/WD-8-057-20-pdf-data.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Drugmand, J.-C.; Schneider, Y.-J.; Agathos, S. N. (2012): Insect cells as factories for biomanufacturing. *Biotechnology Advances* 30 (5), S. 1140–1157. doi:10.1016/j.biotechadv.2011.09.014.
- Dudley, Q. M.; Karim, A. S.; Jewett, M. C. (2015): Cell-free metabolic engineering: biomanufacturing beyond the cell. *Biotechnology Journal* 10 (1), S. 69–82. doi:10.1002/biot.201400330.
- Dwyer, O. (2023): Food waste makes up 'half' of global food system emissions. [www.carbonbrief.org/food-waste-makes-up-half-of-global-food-system-emissions/](http://www.carbonbrief.org/food-waste-makes-up-half-of-global-food-system-emissions/), Stand: 01.11.2024.
- Eberle, U.; Mumm, N. (2021): So schmeckt Zukunft. Ein kulinarischer Kompass für eine gesunde Ernährung. *corpus – corporate sustainability GmbH*. [www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Landwirtschaft/kulinarischer-kompass-so-schmeckt-zukunft-methodenbericht.pdf](http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Landwirtschaft/kulinarischer-kompass-so-schmeckt-zukunft-methodenbericht.pdf), Stand: 01.11.2024.
- El Wali, M.; Rahimpour Golroudbary, S.; Kraslawski, A.; Tuomisto, H. L. (2024): Transition to cellular agriculture reduces agriculture land use and greenhouse gas emissions but increases demand for critical materials. *Commun Earth Environ* 5 (1), S. 1–17. doi:10.1038/s43247-024-01227-8.
- Europäische Kommission (EK) (2003): Verordnung (EG) Nr. 1829/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. September 2003 über genetisch veränderte Lebensmittel und Futtermittel. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=celex%3A32003R1829>, Stand: 01.11.2024.
- Europäische Kommission (EK) (2015): Verordnung (EU) 2015/2283 des Europäischen Parlaments und des Rates über neuartige Lebensmittel, zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 1169/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 258/97 des Europäischen Parlaments und des Rates und der Verordnung (EG) Nr. 1852/2001 der Kommission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32015R2283>, Stand: 01.11.2024.
- European Parliamentary Research Service (EPRS) (2023): EU protein strategy. Briefing. [https://www.europarl.europa.eu/think-tank/en/document/EPRS\\_BRI\(2023\)751426](https://www.europarl.europa.eu/think-tank/en/document/EPRS_BRI(2023)751426), Stand: 01.11.2024.

- Ewing, T. A.; Nouse, N.; van Lint, M.; van Haveren, J.; Hugenholtz, J.; van Es, D. S. (2022): Fermentation for the production of biobased chemicals in a circular economy: a perspective for the period 2022–2050. *Green Chemistry* 24 (17), S. 6373–6405. doi:10.1039/D1GC04758B.
- FDA (2022): FDA Completes First Pre-Market Consultation for Human Food Made Using Animal Cell Culture Technology. <https://www.fda.gov/food/cfsan-constituent-updates/fda-completes-first-pre-market-consultation-human-food-made-using-animal-cell-culture-technology>, Stand: 01.11.2024.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2020a): Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report. doi:10.4060/ca9825en.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO); IFAD; UNICEF; WFP; WHO: The state of food security and nutrition in the world. Transforming food systems for affordable healthy diets. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://worldveg.tind.io/record/73706/>, Stand: 01.11.2024.
- Garrison, G. L.; Biermacher, J. T.; Brorsen, B. W. (2022): How much will large-scale production of cell-cultured meat cost? *Journal of Agriculture and Food Research* 10 (100358). doi:10.1016/j.jafr.2022.100358.
- Good Food Institute (GFI) (2023): Manufacturing capacity landscape and scaling strategies for fermentation-derived protein / June 2023. [https://gfi.org/wp-content/uploads/2023/01/SCI23024\\_FERM-manufacturing-capacity-analysis\\_Final.pdf](https://gfi.org/wp-content/uploads/2023/01/SCI23024_FERM-manufacturing-capacity-analysis_Final.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Graf, P.; Lohmann, B. (2021): Mikrobielle Zellfabriken – die Spitzenkräfte der Biotechnologie. <https://biooekonomie.de/themen/dossiers/mikrobielle-zellfabriken-die-spitzenkraefte-der-biotechnologie#dossier-page-13>, Stand: 01.11.2024.
- Haller, L.; Moakes, S.; Niggli, U.; Riedel, J.; Stolze, M.; Thompson, M. (2020): Entwicklungsperspektiven der ökologischen Landwirtschaft in Deutschland. UBA. Texte. Band 32/2020. Umweltbundesamt (UBA). [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-03-17\\_texte\\_32-2020\\_oekologische-landwirtschaft.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-03-17_texte_32-2020_oekologische-landwirtschaft.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Hartmann, H.; Bastos, A.; Das, A. J.; Esquivel-Muelbert, A.; Hammond, W. M.; Martínez-Vilalta, J.; McDowell, N. G.; Powers, J. S.; Pugh, T. A. M.; Ruthrof, K. X.; Allen, C. D. (2022): Climate Change Risks to Global Forest Health: Emergence of Unexpected Events of Elevated Tree Mortality Worldwide. *Annual Review of Plant Biology* 73 (Volume 73, 2022), S. 673–702. doi:10.1146/annurev-arplant-102820-012804.
- Hembrick-Holloman, V.; Samuel, T.; Mohammed, Z.; Jeelani, S.; Rangari, V. K. (2020): Ecofriendly production of bioactive tissue engineering scaffolds derived from egg- and sea-shells. *Journal of Materials Research and Technology* 9 (6), S. 13729–13739. doi:10.1016/j.jmrt.2020.09.093.
- Hiessl, S.; Rübberdt, K. (2023): Potenziale der Präzisionsfermentation für Niedersachsen. LI Food - Landesinitiative Ernährungswirtschaft in Niedersachsen; DIL Technologie GmbH. [www.li-food.de/fileadmin/user\\_upload/Dateien/LIFood\\_Fermentation2023.pdf](http://www.li-food.de/fileadmin/user_upload/Dateien/LIFood_Fermentation2023.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Hüsing, B.; Wydra, S.; Aichinger, H. (2017): Weiße Gentechnologie. <https://www.bpb.de/themen/umwelt/bioethik/33741/wei%C3%9F-gentechnologie/>, Stand: 01.11.2024.
- International Energy Agency (IEA) (2024): Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>, Stand: 01.11.2024.
- Jakab, K.; Marga, F.; Kaesser, R.; Chuang, T.-H.; Varadaraju, H.; Cassingham, D.; Lee, S.; Forgacs, A.; Forgacs, G. (2019): Non-medical applications of tissue engineering: biofabrication of a leather-like material. *Materials Today Sustainability* 5, S. 100018. doi:10.1016/j.mtsust.2019.100018.
- Jetzke, T.; Dassel, K. (2023): Potenziale und Herausforderungen einer zellkulturbasierten Fleischproduktion. Themenkurzprofil. Band 62. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000156303>, Stand: 01.11.2024. doi:10.5445/IR/1000156303.
- Jetzke, T.; Richter, S.; Keppner, B.; Domröse, L.; Wunder, S.; Ferrari, A. (2019b): Die Zukunft im Blick: Fleisch der Zukunft. Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen von pflanzlichen Fleischersatzprodukten, essbaren Insekten und In-vitro-Fleisch. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-25\\_trendanalyse\\_fleisch-der-zukunft\\_web\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-25_trendanalyse_fleisch-der-zukunft_web_bf.pdf), Stand: 11.12.2023.
- Lau, B. (2023): Lab-Grown Leather: A Sustainable Solution to the Fashion Industry? *Earth.org*. <https://earth.org/lab-grown-leather/#>, Stand: 01.11.2024.
- Lobitz, R.; Rösch, R. (2023): Fisch: Verbraucherschutz. Kann Fisch unbedenklich verzehrt werden? [www.bzfe.de/lebensmittel/vom-acker-bis-zum-teller/fisch/fisch-verbraucherschutz/](http://www.bzfe.de/lebensmittel/vom-acker-bis-zum-teller/fisch/fisch-verbraucherschutz/), Stand: 01.11.2024.
- López-Carr, D. (2021): A Review of Small Farmer Land Use and Deforestation in Tropical Forest Frontiers: Implications for Conservation and Sustainable Livelihoods. *Land* 10 (11), S. 1113. doi:10.3390/land10111113.
- MacLeod, M. J.; Hasan, M. R.; Robb, D. H. F.; Mamun-Ur-Rashid, M. (2020): Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture. *Scientific Reports* 10 (1). doi:10.1038/s41598-020-68231-8.
- Maggiore, A.; Afonso, A.; Barrucci, F.; Sanctis, G. de (2020): Climate change as a driver of emerging risks for food and feed safety, plant, animal health and nutritional quality. *EFSA* 17 (6), 1881E. doi:10.2903/sp.efsa.2020.EN-1881.
- Markets and Markets (2022): Precision Fermentation Ingredients Market. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/precision-fermentation-market-30824914.html>, Stand: 01.11.2024.
- MaterialDistrict (2019): The World's first microbe-grown headset. <https://materialdistrict.com/article/microbe-grown-headset/>, Stand: 01.11.2024.
- Menhart, D. (2023): Fleisch ohne Leid und Verzicht? [www.faz.net/aktuell/wissen/medizin-ernaehrung/die-debatte-zu-fleisch-aus-dem-labor-alternative-ohne-tierleid-18960103-p4.html](http://www.faz.net/aktuell/wissen/medizin-ernaehrung/die-debatte-zu-fleisch-aus-dem-labor-alternative-ohne-tierleid-18960103-p4.html), Stand: 01.11.2024.
- Müller-Degenhardt, F. (2021): Im Labor gezüchtetes Holz: Die Rettung unserer Wälder? <https://www.qiio.de/im-labor-gezuechtes-holz-die-rettung-unserer-waelder/>, Stand: 01.11.2024.
- Mundell, I. (2022): Fashion industry collaboration to create lab-grown fur. Luxury fashion house Fendi, part of LVMH, wants a sustainable alternative to fur. Researchers from Imperial and Central Saint Martins are on the case. Imperial College London. <https://www.imperial.ac.uk/news/238531/fashion-industry-collaboration-create-lab-grown/>, Stand: 01.11.2024.

- Nguyen, A. D.; Lee, E. Y. (2021): Engineered Methanotrophy: A Sustainable Solution for Methane-Based Industrial Biomanufacturing. *Trends in Biotechnology* 39 (4), S. 381–396. doi:10.1016/j.tibtech.2020.07.007.
- Notarnicola, B.; Puig, R.; Raggi, A.; Fullana, P.; Tassielli, G.; Camillis, C. de; Rius, A. (2011): Life cycle assessment of Italian and Spanish bovine leather production systems. *Afinidad LXVII* (553). <https://core.ac.uk/download/pdf/39151928.pdf>, Stand: 19.12.2023.
- Parker, R. W. R.; Blanchard, J. L.; Gardner, C.; Green, B. S.; Hartmann, K.; Tyedmers, P. H.; Watson, R. A. (2018): Fuel use and greenhouse gas emissions of world fisheries. *Nature Clim Change* 8 (4), S. 333–337. doi:10.1038/s41558-018-0117-x.
- Rasala, B. A.; Mayfield, S. P. (2015): Photosynthetic biomanufacturing in green algae; production of recombinant proteins for industrial, nutritional, and medical uses. *Photosynth Res* 123 (3), S. 227–239. doi:10.1007/s11120-014-9994-7.
- Rasor, B. J.; Vögeli, B.; Landwehr, G. M.; Bogart, J. W.; Karim, A. S.; Jewett, M. C. (2021): Toward sustainable, cell-free biomanufacturing. *Current Opinion in Biotechnology* 69, S. 136–144. doi:10.1016/j.copbio.2020.12.012.
- Rathore, A. S.; Nikita, S.; Thakur, G.; Mishra, S. (2023): Artificial intelligence and machine learning applications in biopharmaceutical manufacturing. *Trends in Biotechnology* 41 (4), S. 497–510. doi:10.1016/j.tibtech.2022.08.007.
- Reketat, A. (2022): Precision Fermentation: Revolution für die Lebensmittelproduktion? [https://utopia.de/ratgeber/precision-fermentation-revolution-fuer-die-lebensmittelproduktion\\_419791/](https://utopia.de/ratgeber/precision-fermentation-revolution-fuer-die-lebensmittelproduktion_419791/), Stand: 01.11.2024.
- Renn, O. (o.J.): Die große Verunsicherung. Zur Resonanz grüner Gentechnik in der deutschen Bevölkerung. <https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/apuz/gentechnik-2022/512109/die-grosse-verunsicherung/>, Stand: 01.11.2024.
- Reynolds, M.; Fassler, J. (2023): Insiders Reveal Major Problems at Lab-Grown-Meat Startup Upside Foods. Billion-dollar cultivated-meat startup Upside Foods wants you to think the breakthrough chicken filets it sells are made in a futuristic factory. A WIRED investigation tells a different story. *Wired*. <https://www.wired.com/story/upside-foods-lab-grown-chicken/>, Stand: 01.11.2024.
- Rollin, J. A.; Tam, T. K.; Zhang, Y.-H. P. (2013): New biotechnology paradigm: cell-free biosystems for biomanufacturing. *Green Chem.* 15 (7), S. 1708. doi:10.1039/C3GC40625C.
- Ronchetti, F.; Springer, L.; Purnhagen, K. P. (2024): Executive Summary. In: *The Regulatory Landscape in the EU for Dairy Products Derived from Precision Fermentation. An Analysis on the Example of Cheese.* – SpringerBriefs in Law and Regulation & Innovation. S. 1–2. doi:10.1007/978-3-031-49692-9\_1.
- Sandström, V.; Valin, H.; Krisztin, T.; Havlík, P.; Herrero, M.; Kastner, T. (2018): The role of trade in the greenhouse gas footprints of EU diets. *Global Food Security* 19, S. 48–55. doi:10.1016/j.gfs.2018.08.007.
- Sinke, P.; Swartz, E.; Sanctorem, H.; van der Giesen, C.; Odegard, I. (2023): Ex-ante life cycle assessment of commercial-scale cultivated meat production in 2030. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 28 (3), S. 234–254. doi:10.1007/s11367-022-02128-8.
- Smith, E.; Etienne, J.; Montanari, F. (2024): Alternative protein sources for food and feed. *Study*. Brussels.
- Statista GmbH (2023a): Holz - Weltweit | Statista Marktprognose. <https://de.statista.com/outlook/io/verarbeitendes-gewerbe/materielle-produkte/holz/weltweit>, Stand: 17.12.2023.
- Statista GmbH (2024a): Milk - Worldwide. <https://www.statista.com/outlook/io/agriculture/milk/worldwide>, Stand: 01.11.2024.
- Stephens, N.; Sexton, A. E.; Driessen, C. (2019): Making Sense of Making Meat: Key Moments in the First 20 Years of Tissue Engineering Muscle to Make Food. *Frontiers in sustainable food systems* 3, S. 45. doi:10.3389/fsufs.2019.00045.
- Treich, N. (2021): Cultured Meat: Promises and Challenges. *Environmental and Resource Economics* 79 (1), S. 33–61. doi:10.1007/s10640-021-00551-3.
- Trinh, J. (2023): Should we be eating bluefin tuna? [www.latimes.com/food/story/2023-05-03/should-i-eat-bluefin-tuna-what-experts-say](http://www.latimes.com/food/story/2023-05-03/should-i-eat-bluefin-tuna-what-experts-say), Stand: 01.11.2024.
- Tubb, C.; Seba, T. (2019): Rethinking Food and Agriculture 2020-2030. <https://static1.squarespace.com/static/585c3439be65942f022bbf9b/t/5d7fe0e83d-119516bfc0017e/1568661791363/RethinkX+Food+and+Agriculture+Report.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Udugama, I. A.; Lopez, P. C.; Gargalo, C. L.; Li, X.; Bayer, C.; Germaey, K. V. (2021): Digital Twin in biomanufacturing: challenges and opportunities towards its implementation. *Syst Microbiol and Biomanuf* 1 (3), S. 257–274. doi:10.1007/s43393-021-00024-0.
- UN News (2024): Growing or shrinking? What the latest trends tell us about the world's population. <https://news.un.org/en/story/2024/07/1151971>, Stand: 01.11.2024.
- Varanasi, A. (2023): Can Cotton Grown Inside Bioreactors Become A Sustainable Reality In The Future? *synbiobeta*. <https://www.synbiobeta.com/read/can-cotton-grown-inside-bioreactors-become-a-sustainable-reality-in-the-future>, Stand: 01.11.2024.
- Waltz, E.; Nature Biotechnology (2022): This Mushroom Leather Is Being Made into Hermès Handbags. *Scientific American*. <https://www.scientificamerican.com/article/this-mushroom-leather-is-being-made-into-hermes-handbags/>, Stand: 01.11.2024.
- Watson, J. E. M.; Evans, T.; Venter, O.; Williams, B.; Tulloch, A.; Stewart, C.; Thompson, I.; Ray, J. C.; Murray, K.; Salazar, A.; McAlpine, C.; Potapov, P.; Walston, J.; Robinson, J. G.; Painter, M.; Wilkie, D.; Filardi, C.; Laurance, W. F.; Houghton, R. A.; Maxwell, S.; Grantham, H.; Samper, C.; Wang, S.; Laestadius, L.; Runtig, R. K.; Silva-Chávez, G. A.; Ervin, J.; Lindenmayer, D. (2018): The exceptional value of intact forest ecosystems. *Nature Ecology & Evolution* 2 (4), S. 599–610. doi:10.1038/s41559-018-0490-x.
- Whiley, J. (2023): Yes, Lab-Grown Meat Is Vegan. [www.wired.com/story/lab-grown-meat-vegan-ethics-environment/](http://www.wired.com/story/lab-grown-meat-vegan-ethics-environment/), Stand: 01.11.2024.
- World Wide Fund for Nature (WWF) (2022): Ungewollter Beifang. [www.wwf.de/themen-projekte/meere-kuesten/fischerei/ungewollter-beifang](http://www.wwf.de/themen-projekte/meere-kuesten/fischerei/ungewollter-beifang), Stand: 01.11.2024.
- Zhang, Y.-H. P.; Sun, J.; Ma, Y. (2017): Biomanufacturing: history and perspective. *Journal of industrial microbiology & biotechnology* 44 (4-5), S. 773–784. doi:10.1007/s10295-016-1863-2.

## 2.2 Zukunft der Meerwasserentsalzung

- Alharbi, T.; Alfaifi, H.; Almadani, S. A.; El-Sorogy, A. (2017): Spatial distribution and metal contamination in the coastal sediments of Al-Khafji area, Arabian Gulf, Saudi Arabia. *Environ Monit Assess* 189 (12), S. 634. doi:10.1007/s10661-017-6352-1.

- Al-Mamun, A.; Ahmad, W.; Baawain, M. S.; Khadem, M.; Dhar, B. R. (2018): A review of microbial desalination cell technology: Configurations, optimization and applications. *Journal of Cleaner Production* 183, S. 458–480. doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.054.
- Asendorpf, D. (2023): Elixier der Zukunft. *Die Zeit* (22). <https://www.zeit.de/2023/22/wasserstoff-gewinnung-varianten-energie-wende>, Stand: 01.11.2024.
- Behrens, C. (2017): Wie Dubai dem Meer Trinkwasser abringt. <https://www.sueddeutsche.de/wissen/meerwasserentsalzung-wie-dubai-dem-meer-trinkwasser-abringt-1.3630919>, Stand: 01.11.2024.
- Blue Economy Observatory (2021): Desalination. [https://blue-economy-observatory.ec.europa.eu/eu-blue-economy-sectors/desalination\\_en?prefLang=et](https://blue-economy-observatory.ec.europa.eu/eu-blue-economy-sectors/desalination_en?prefLang=et), Stand: 01.11.2024.
- Boo, C.; Billinge, I. H.; Chen, X.; Shah, K. M.; Yip, N. Y. (2020): Zero Liquid Discharge of Ultrahigh-Salinity Brines with Temperature Swing Solvent Extraction. *Environmental Science & Technology* 54 (14), S. 9124–9131. doi:10.1021/acs.est.0c02555.
- Boretti, A.; Rosa, L. (2019): Reassessing the projections of the World Water Development Report. *npj Clean Water* 2 (1). doi:10.1038/s41545-019-0039-9.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=11](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=11), Stand: 01.11.2024.
- Bundesregierung (2023a): Wasser ist für uns Lebenswichtig. Nationale Wasserstrategie. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/nationale-wasserstrategie-2171158>, Stand: 01.11.2024.
- Bundschuh, J.; Kaczmarczyk, M.; Ghaffour, N.; Tomaszewska, B. (2021): State-of-the-art of renewable energy sources used in water desalination: Present and future prospects. *Desalination* 508, S. 115035. doi:10.1016/j.desal.2021.115035.
- Caldera, U.; Breyer, C. (2023): Afforesting arid land with renewable electricity and desalination to mitigate climate change. *Nature Sustainability* 6 (5), S. 526–538. doi:10.1038/s41893-022-01056-7.
- Chandler, D. L. (2019): Turning desalination waste into a useful resource. Process developed at MIT could turn concentrated brine into useful chemicals, making desalination more efficient. Massachusetts Institute of Technology (MIT). <https://news.mit.edu/2019/brine-desalination-waste-sodium-hydroxide-0213>, Stand: 01.11.2024.
- Climate-ADAPT (2023): Entsalzung. Adaptation Option. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/de/metadata/adaptation-options/desalination>, Stand: 01.11.2024.
- Del Villar, A.; Melgarejo, J.; García-López, M.; Fernández-Aracil, P.; Montano, B. (2023): The economic value of the extracted elements from brine concentrates of Spanish desalination plants. *Desalination* 560, S. 116678. doi:10.1016/j.desal.2023.116678.
- dpa (2023): Bürger sparen ein: Berlins Stromverbrauch leicht gesunken. <https://www.berlin.de/aktuelles/8133950-958090-buerger-sparen-ein-berlins-stromverbrauch.html#:~:text=Die%20Berlinerinnen%20und%20Berliner%20haben,Stromnetz%20Berlin%20am%20Dienstag%20mitteilte>, Stand: 01.11.2024.
- El Kharraz, J. (2020): Regional Study: „Desalination as an alternative to alleviate water scarcity and a climate change adaptation option in the MENA region“. Konrad-Adenauer-Stiftung. [https://www.kas.de/documents/264147/264196/kas\\_remena\\_studie\\_meerwasserentsalzung\\_web.pdf](https://www.kas.de/documents/264147/264196/kas_remena_studie_meerwasserentsalzung_web.pdf), Stand: 11.12.2023.
- Elsaid, K.; Kamil, M.; Sayed, E. T.; Abdelkareem, M. A.; Wilberforce, T.; Olabi, A. G. (2020a): Environmental impact of desalination technologies: A review. *Science of The Total Environment* 748, S. 141528. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141528.
- Elsaid, K.; Sayed, E. T.; Abdelkareem, M. A.; Mahmoud, M. S.; Ramadan, M.; Olabi, A. G. (2020b): Environmental impact of emerging desalination technologies: A preliminary evaluation. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8 (5), S. 104099. doi:10.1016/j.jece.2020.104099.
- Elsner, C. (2023): Ozeane - die neue Quelle für Trinkwasser. <https://www.zdf.de/nachrichten/wissen/meer-wasser-entsalzung-trinkwasser-100.html>, Stand: 01.11.2024.
- Europäische Kommission (EK) (2020a): Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. Document 52020DC0301. Europäische Kommission (EK). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301>, Stand: 11.12.2023.
- European Environment Agency (2021): Water resources across Europe — confronting water stress: an updated assessment. EEA Report. Band 12/2021. [https://www.eea.europa.eu/publications/water-resources-across-europe-confronting/at\\_download/file](https://www.eea.europa.eu/publications/water-resources-across-europe-confronting/at_download/file), Stand: 01.11.2024.
- Ewusi-Mensah, D.; Huang, J.; Chaparro, L. K.; Rodenas, P.; Ramírez-Moreno, M.; Ortiz, J. M.; Esteve-Núñez, A. (2021): Algae-Assisted Microbial Desalination Cell: Analysis of Cathode Performance and Desalination Efficiency Assessment. *Processes* 9 (11), S. 2011. doi:10.3390/pr9112011.
- Glade, H.; Spinnler, M.; Taprogge, D. (2022): Atlas zur Meerwasserentsalzung. Eine Zusammenfassung von 22 Technologien nach neuartigem Klassifizierungsansatz. [https://www.dgmt.org/files/dgmt/downloads/Publikationen/Atlas\\_zur\\_Wasserentsalzung\\_DE.pdf](https://www.dgmt.org/files/dgmt/downloads/Publikationen/Atlas_zur_Wasserentsalzung_DE.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Global Clean Water Desalination Alliance (2015): Global Clean Water Desalination Alliance. H2O minus CO<sub>2</sub>.
- Global Water Desalination Alliance (2015): H2O minus CO<sub>2</sub>. Concept Paper. [https://www.diplomatie.gouv.fr/IMG/pdf/global\\_water\\_desalination\\_alliance\\_1dec2015\\_cle8d61cb.pdf](https://www.diplomatie.gouv.fr/IMG/pdf/global_water_desalination_alliance_1dec2015_cle8d61cb.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Goergen, R. (2022): The future of desalination. Royal Geographical Society. <https://geographical.co.uk/science-environment/the-future-of-desalination>, Stand: 01.11.2024.
- Gujjala, L. K. S.; Dutta, D.; Sharma, P.; Kundu, D.; Vo, D.-V. N.; Kumar, S. (2022): A state-of-the-art review on microbial desalination cells. *Chemosphere* 288, S. 132386. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.132386.
- Haddad, B.; Heck, N.; Paytan, A.; Potts, D. (2018): Social Issues and Public Acceptance of Seawater Desalination Plants. In: *Sustainable Desalination Handbook*. S. 505–525. doi:10.1016/B978-0-12-809240-8.00014-9.

- Hernandez, M.; West, R. (2022): Smart desalination plant solutions integrate renewable energy to boost processes and sustainability. *Smart Water Magazine*. <https://blog.se.com/industry/machine-and-process-management/2022/07/13/smart-desalination-plant-solutions-integrate-renewable-energy-to-boost-processes-and-sustainability/>, Stand: 01.11.2024.
- Hossein Davood Abadi Farahani, Mohammad; Vatanpour, V.; Hooshang Taheri, A. (2020): Desalination - Challenges and Opportunities. doi:10.5772/intechopen.77449.
- Ibrahim, Y.; Ismail, R. A.; Ogungbenro, A.; Pankratz, T.; Banat, F.; Arafat, H. A. (2021): The sociopolitical factors impacting the adoption and proliferation of desalination: A critical review. *Desalination* 498, S. 114798. doi:10.1016/j.desal.2020.114798.
- Imoro, A. Z.; Mensah, M.; Buamah, R. (2021): Developments in the microbial desalination cell technology: A review. *Water-Energy Nexus* 4, S. 76–87. doi:10.1016/j.wen.2021.04.002.
- International Desalination Association (2011): Desalination at a Glance. <https://idadesal.org/wp-content/uploads/2021/06/desalination-at-a-glance.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- International Energy Agency (IEA) (2023): Global hydrogen demand in the Net Zero Scenario, 2022-2050. International Energy Agency (IEA). <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-in-the-net-zero-scenario-2022-2050>, Stand: 01.11.2024.
- Johnson, S. (2021): The Future of Water Scarcity in Europe. <https://spheresofinfluence.ca/the-future-of-water-scarcity-in-europe/>, Stand: 01.11.2024.
- Jones, E.; Qadir, M.; van Vliet, M. T.; Smakhtin, V.; Kang, S. (2019): The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of The Total Environment* 657, S. 1343–1356. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.12.076.
- Kainrath, V. (2023): Zu wenig, zu viel, zu verseucht: Die Welt im Sog der Wasserkrise. <https://www.derstandard.de/story/2000144805022/zu-wenig-zu-viel-zu-verseucht-die-welt-im-sog>, Stand: 01.11.2024.
- Lanjewar, S.; Mukherjee, A.; Muzamil Rehman, L.; Roy, A. (2020): Blue Energy and Its Potential: The Membrane Based Energy Harvesting. In: *Advances in Membrane Technologies*. doi:10.5772/intechopen.86953.
- Lee, K.; Jepson, W. (2021): Environmental impact of desalination: A systematic review of Life Cycle Assessment. *Desalination* 509, S. 115066. doi:10.1016/j.desal.2021.115066.
- Lim, Y. J.; Goh, K.; Goto, A.; Zhao, Y.; Wang, R. (2023): Uranium and lithium extraction from seawater: challenges and opportunities for a sustainable energy future. *J. Mater. Chem. A* 11 (42), S. 22551–22589. doi:10.1039/D3TA05099H.
- Macher, J. (2023): Durstig? Meer trinken! <https://www.zeit.de/wissen/umwelt/2023-06/entsalzungsanlagen-technologie-duerre-meerwasser-kosten>, Stand: 01.11.2024.
- Morillo, J.; Usero, J.; Rosado, D.; El Bakouri, H.; Riaza, A.; Bernaola, F.-J. (2014): Comparative study of brine management technologies for desalination plants. *Desalination* 336, S. 32–49. doi:10.1016/j.desal.2013.12.038.
- Mrasek, V. (2019): Entsalzungsanlagen für Meerwasser. Sole-Rückstände viel größer als gedacht. <https://www.deutschlandfunk.de/entsalzungsanlagen-fuer-meerwasser-sole-rueckstaende-viel-100.html>, Stand: 01.11.2024.
- Nasrollahi, M.; Motevali, A.; Banakar, A.; Montazeri, M. (2023): Comparison of environmental impact on various desalination technologies. *Desalination* 547, S. 116253. doi:10.1016/j.desal.2022.116253.
- Nassrullah, H.; Anis, S. F.; Hashaikeh, R.; Hilal, N. (2020): Energy for desalination: A state-of-the-art review. *Desalination* 491, S. 114569. doi:10.1016/j.desal.2020.114569.
- Oron, G.; Appelbaum, S.; Guy, O. (2023): Reuse of brine from inland desalination plants with duckweed, fish and halophytes toward increased food production and improved environmental control. *Desalination* 549, S. 116317. doi:10.1016/j.desal.2022.116317.
- Paál, G. (2020): Wie funktioniert Wasserentsalzung? <https://www.swr.de/wissen/1000-antworten/wie-funktioniert-meerwasserentsalzung-100.html>, Stand: 01.11.2024.
- Panagopoulos, A.; Haralambous, K.-J.; Loizidou, M. (2019): Desalination brine disposal methods and treatment technologies - A review. *The Science of the total environment* 693, S. 133545. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.07.351.
- Pervov, A. G.; Andrianov, A. P.; Danilycheva, M. N. (2018): Preliminary evaluation of new green antiscalants for reverse osmosis water desalination. *Water Supply* 18 (1), S. 167–174. doi:10.2166/ws.2017.106.
- Pistocchi, A.; Bleninger, T.; Breyer, C.; Caldera, U.; Dorati, C.; Ganoira, D.; Millán, M. M.; Paton, C.; Poullis, D.; Herrero, F. S.; Sapiano, M.; Semiat, R.; Sommariva, C.; Yuce, S.; Zaragoza, G. (2020): Can seawater desalination be a win-win fix to our water cycle? *Water Research* 182, S. 115906. doi:10.1016/j.watres.2020.115906.
- Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (2023): CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2023 auf Rekordniveau. <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/co2-emissionen-im-jahr-2023-auf-rekordniveau>, Stand: 01.11.2024.
- PRODES (2010): Guidelines for the regulation of desalination. Deliverable 6.2. [https://www.prodes-project.org/fileadmin/Files/D6\\_2\\_Legislation\\_Guidelines.pdf](https://www.prodes-project.org/fileadmin/Files/D6_2_Legislation_Guidelines.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Ramirez, K.; Weiss, T.; Kirk, T.; Gamage, C. (o.J.): Hydrogen Reality Check: Distilling Green Hydrogen's Water Consumption. Water access and requirements for green hydrogen production can be effectively managed if intentional sourcing, project siting, and efficient use is prioritized. RMI Innovation Center. <https://rmi.org/hydrogen-reality-check-distilling-green-hydrogens-water-consumption/#:~:text=Per%20chemistry%20fundamentals%2C%209%20liters,20%20L%2Fkg%20is%20needed,> Stand: 01.11.2024.
- Regional Program Energy Security and Climate Change Middle East and North Africa (KAS – REMENA) (2020): „Desalination as an alternative to alleviate water scarcity and a climate change adaptation option in the MENA region“. [www.kas.de/documents/264147/264196/kas\\_remena\\_studie\\_meerwasserentsalzung\\_web.pdf](http://www.kas.de/documents/264147/264196/kas_remena_studie_meerwasserentsalzung_web.pdf), Stand: 22.02.2024.
- Research and Markets (2022): Global Desalination Market, (2022 to 2027). Industry Trends, Growth, Insight, Impact of COVID-19 and Opportunity Company Analysis. <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/05/10/2439389/28124/en/Global-Desalination-Market-2022-to-2027-Industry-Trends-Growth-Insight-Impact-of-COVID-19-and-Opportunity-Company-Analysis.html>, Stand: 01.11.2024.

- Roser, A. (1994): Meerwasserentsalzung Nach Aristoteles(?) Ein Zwischenbericht. *Hermes* 122 (3), S. 300–308. <http://www.jstor.org/stable/4477022>.
- Rossignolo, J. A.; Felicio Peres Duran, A. J.; Bueno, C.; Martinnelli Filho, J. E.; Savastano Junior, H.; Tonin, F. G. (2022): Algae application in civil construction: A review with focus on the potential uses of the pelagic *Sargassum* spp. biomass. *Journal of Environmental Management* 303, S. 114258. doi:10.1016/j.jenvman.2021.114258.
- Sánchez, A. S.; Nogueira, I.; Kalid, R. A. (2015): Uses of the reject brine from inland desalination for fish farming, *Spirulina* cultivation, and irrigation of forage shrub and crops. *Desalination* 364, S. 96–107. doi:10.1016/j.desal.2015.01.034.
- Shokri, A.; Sanavi Fard, M. (2023): A comprehensive overview of environmental footprints of water desalination and alleviation strategies. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 20 (2), S. 2347–2374. doi:10.1007/s13762-022-04532-x.
- Statista GmbH (2002): Prozentuale Verteilung der Entsalzungskapazität nach Regionen im Jahr 2002. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36709/umfrage/verteilung-der-entsalzungskapazitaet-nach-weltregionen-in-2002/>, Stand: 01.11.2024.
- Stratmann, K. (2021): Schattenseite des Hoffnungsträgers: Produktion von Wasserstoff könnte Ressourcen gefährden. *Handelsblatt*. <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/klimaneutralitaet-schattenseite-des-hoffnungstraegers-produktion-von-wasserstoff-koennte-ressourcen-gefaehrden/27063644.html>, Stand: 01.11.2024.
- Tak, S. S.; Shetye, O.; Muley, O.; Jaiswal, H.; Malik, S. N. (2022): Emerging technologies for hydrogen production from wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy* 47 (88), S. 37282–37301. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.06.225.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) (2014): The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000225741>, Stand: 01.11.2024.
- United Nations Environment Programme (UNEP) (o.J.): Goal 6: Ensure access to water and sanitation for all. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/>, Stand: 01.11.2024.
- Versorgungsbetriebe Helgoland (2023): Das Wasserwerk. <https://www.vbhelgoland.de/technik/wasserwerk/>, Stand: 01.11.2024.
- Voutchkov, N. (2020): How Can We Make Desalination More Reliable, Efficient and Sustainable? *Advances in Oceanography & Marine Biology* 1 (4). doi:10.33552/AOMB.2020.01.000520.
- WeAreWater Foundation (o.J.): Desalination and its challenges. WeAreWater Foundation. <https://www.wearewater.org/en/insights/desalination-and-its-challenges/>, Stand: 01.11.2024.
- 2.3 Maritime Algenlandwirtschaft**
- Albrecht, M. (2023a): A Norwegian seaweed utopia? Governmental narratives of coastal communities, upscaling, and the industrial conquering of ocean spaces. *Maritime Studies* 22, S. 1–12. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40152-023-00324-2>, Stand: 01.11.2024.
- Alfred-Wegener-Institut (AWI) (2023): Neues Start-up entwickelt Algenfarmen zur Züchtung von Makroalgen. <https://www.awi.de/ueber-uns/service/presse/presse-detailansicht/neue-awi-ausgruendung-liefert-klimaschonende-grundstoffe-fuer-die-industrie.html>, Stand: 01.11.2024.
- Ammar, E. E.; Aioub, A. A. A.; Elesawy, A. E.; Karkour, A. M.; Mouhamed, M. S.; Amer, A. A.; EL-Shershaby, N. A. (2022): Algae as Bio-fertilizers: Between current situation and future prospective. *Saudi Journal of Biological Sciences* 29 (5), S. 3083–3096. doi:10.1016/j.sjbs.2022.03.020.
- Barsanti, L.; Gualtieri, P. (2018): Is exploitation of microalgae economically and energetically sustainable? *Algal Research* 31, S. 107–115. doi:10.1016/j.algal.2018.02.001.
- BettaFish (2022): Tuna Alternative Products – BettaFish. <https://bettafish.co/de/products>, Stand: 01.11.2024.
- Bullen, C. D.; Driscoll, J.; Burt, J.; Stephens, T.; Hessing-Lewis, M.; Greg, E. J. (2024): The potential climate benefits of seaweed farming in temperate waters. *Sci Rep* 14 (1), S. 15021. doi:10.1038/s41598-024-65408-3.
- Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (2023): Werden Algen auch bei uns erzeugt? Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). <https://www.landwirtschaft.de/landwirtschaft-verstehen/wie-funktioniert-landwirtschaft-heute/innovation-und-technik/werden-algen-auch-bei-uns-erzeugt>, Stand: 01.11.2024.
- BusinessPortal Norwegen (2020): Norwegen will mit Algen neue Meeresindustrie entwickeln. BusinessPortal Norwegen. <https://businessportal-norwegen.com/2020/11/13/norwegen-will-mit-algen-neue-meeresindustrie-entwickeln/>, Stand: 01.11.2024.
- Campbell, I.; Macleod, A.; Sahlmann, C.; Neves, L.; Funderud, J.; Øverland, M.; Hughes, A. D.; Stanley, M. (2019): The Environmental Risks Associated With the Development of Seaweed Farming in Europe - Prioritizing Key Knowledge Gaps. *Frontiers in Marine Science* 6. doi:10.3389/fmars.2019.00107.
- Catarino, M. D.; Fernandes, I.; Oliveira, H.; Carrascal, M.; Ferreira, R.; Silva, A. M. S.; Cruz, M. T.; Mateus, N.; Cardoso, S. M. (2021): Antitumor Activity of *Fucus vesiculosus*-Derived Phlorotannins through Activation of Apoptotic Signals in Gastric and Colorectal Tumor Cell Lines. *International Journal of Molecular Sciences* 22 (14), S. 7604. doi:10.3390/ijms22147604.
- Chauton, M. S.; Forbord, S.; Mäkinen, S.; Sarno, A.; Slizyte, R.; Mozuraityte, R.; Standal, I. B.; Skjermo, J. (2021): Sustainable resource production for manufacturing bioactives from micro- and macroalgae: Examples from harvesting and cultivation in the Nordic region. *Physiologia Plantarum* 173 (2), S. 495–506. doi:10.1111/ppl.13391.
- Costello, C.; Cao, L.; Gelcich, S.; Cisneros-Mata, M. Á.; Free, C. M.; Froehlich, H. E.; Golden, C. D.; Ishimura, G.; Maier, J.; Macadam-Somer, I.; Mangin, T.; Melnychuk, M. C.; Miyahara, M.; Moor, C. L. de; Naylor, R.; Nøstbakken, L.; Ojea, E.; O'Reilly, E.; Parma, A. M.; Plantinga, A. J.; Thilsted, S. H.; Lubchenco, J. (2020): The future of food from the sea. *Nature* 588 (7836), S. 95–100. doi:10.1038/s41586-020-2616-y.
- Cotas, J.; Lomartire, S.; Gonçalves, A. M. M.; Pereira, L. (2024): From Ocean to Medicine: Harnessing Seaweed's Potential for Drug Development. *IJMS* 25 (2), S. 797. doi:10.3390/ijms25020797.

- Demmer, A.; Paál, G. (2023): Algenblüten weltweit – Symptom einer Erd-Krise. SWR2. <https://www.swr.de/swr2/wissen/algenblueten-weltweit-symptom-einer-erd-krise-swr2-wis-sen-2023-08-15-102.html>.
- Diaz, C. J.; Douglas, K. J.; Kang, K.; Kolarik, A. L.; Malinowski, R.; Torres-Tiji, Y.; Molino, J. V.; Badary, A.; Mayfield, S. P. (2023): Developing algae as a sustainable food source. *Frontiers in Nutrition* 9. doi:10.3389/fnut.2022.1029841.
- Duarte, C. M.; Bruhn, A.; Krause-Jensen, D. (2022): A seaweed aquaculture imperative to meet global sustainability targets. *Nature Sustainability* 5 (3), S. 185–193. [https://ideas.repec.org/a/nat/natsus/v5y2022i3d10.1038\\_s41893-021-00773-9.html](https://ideas.repec.org/a/nat/natsus/v5y2022i3d10.1038_s41893-021-00773-9.html), Stand: 01.11.2024.
- Enzing, C.; Ploeg, M.; Barbarosa, M.; Sijtsma, L. (2014): Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe. JRC Scientific and Policy Reports. Europäische Kommission (EK). <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/e35cfe33-3a16-46c7-8145-903c10bb430c/language-en>, Stand: 01.11.2024. doi:10.2791/3339.
- Europäische Kommission (EK) (2022): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen - Für einen starken und nachhaltigen Algensektor in der EU. [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12780-Blaue-Biowirtschaft-fur-einen-starken-und-nachhaltigen-Algensektor-in-der-EU\\_de](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12780-Blaue-Biowirtschaft-fur-einen-starken-und-nachhaltigen-Algensektor-in-der-EU_de), Stand: 01.11.2024.
- Faber, A. (2019): Energiegewinnung – Algen als Biokraftwerke. Deutschlandfunk. <https://www.deutschlandfunkkultur.de/energiegewinnung-algen-als-biokraftwerke-100.html>, Stand: 01.11.2024.
- Ferdouse, F.; Holdt, S.; Smith, R.; Murúa, P.; Yang, Z. (2018): The global status of seaweed production, trade and utilization. GLOBEFISH research programme. Band vol. 124.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (o. J.): Algae can play a greater role in food security and nutrition. <https://www.fao.org/fishery/en/news/41391>, Stand: 01.11.2024.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2020b): The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca9229en>, Stand: 01.11.2024. doi:10.4060/ca9229en.
- Fortune Business Insights (2021): Commercial Seaweed Market Size, Share, Growth | Forecast, 2028. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/commercial-seaweed-market-100077>, Stand: 01.11.2024.
- Fraunhofer-Gesellschaft (2022): Algen als Lebensmittel - Grün isst die Zukunft. <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/gruen-isst-die-zukunft.html>, Stand: 01.11.2024.
- Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB (Fraunhofer IGB) (o. J.): Algen. Nachhaltige Rohstoffquelle für Wertstoffe und Energie. [https://www.igb.fraunhofer.de/content/dam/igb/documents/brochures/nachhaltige-chemie/algen/1703\\_BR\\_algen\\_de.pdf](https://www.igb.fraunhofer.de/content/dam/igb/documents/brochures/nachhaltige-chemie/algen/1703_BR_algen_de.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Grand View Research (2021): Commercial Seaweed Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Brown, Red, Green), By Application (Human Consumption, Animal Feed, Agriculture), By Form (Leaf, Powdered, Flakes), By Region, And Segment Forecasts, 2022 - 2030. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/commercial-seaweed-market>, Stand: 01.11.2024.
- Guiry, M.; Guiry, W. (2023): AlgaeBase. Listing the World's Algae. National University of Ireland, Galway. <https://www.algaebase.org/>, Stand: 01.11.2024.
- Hungerland, T.; Meißner, L.; Abel, S.; Nögel, L.; Czerniak-Wilmes, J. (2024): Innovative Antriebe und Kraftstoffe für einen klimaverträglicheren Luftverkehr. TAB-Kurzstudie. Band 6. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000170399>, Stand: 01.11.2024. doi:10.5445/IR/1000170399.
- Icking, J.; Menn, C.; Bundeszentrum für Ernährung (BZfE) (2022): Algen – Vielfalt aus dem Meer. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). <https://www.bzfe.de/lebensmittel/trendlebensmittel/algen/>, Stand: 01.11.2024.
- Karthik, T.; Jayasri, M. A. (2023): Systematic study on the effect of seaweed fertilizer on the growth and yield of *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek (Mung bean). *Journal of Agriculture and Food Research* 14, S. 100748. doi:10.1016/j.jafr.2023.100748.
- Khan, N.; Sudhakar, K.; Mamat, R. (2023): Seaweed farming: A perspectives of genetic engineering and nano-technology application. *Heliyon* 9 (4), e15168. doi:10.1016/j.heliyon.2023.e15168.
- Kind, S. (2022): Maritime Landwirtschaft. Themenkurzprofil. Band 55. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000150231>, Stand: 01.11.2024.
- Kinley, R. D.; Martinez-Fernandez, G.; Matthews, M. K.; Nys, R. de; Magnusson, M.; Tomkins, N. W. (2020): Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed. *Journal of Cleaner Production* 259, S. 120836. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120836.
- Koesling, M.; Kvadsheim, N. P.; Halfdanarson, J.; Emblemavåg, J.; Rebours, C. (2021): Environmental impacts of protein-production from farmed seaweed: Comparison of possible scenarios in Norway. *Journal of Cleaner Production* 307, S. 127301. doi:10.1016/j.jclepro.2021.127301.
- Lenton, T. M.; McKay, D. I. A.; Loriani, S.; Abrams, J. F.; Lade, S. J.; Donges, J. F.; Buxton, J. E.; Bailey, E.; Laybourn L.; Ghadiali, A.; Dyke, J. G. (2023): Global Tipping Points. Report 2023. <https://global-tipping-points.org/>, Stand: 01.11.2024.
- Li-Beisson, Y.; Thelen, J. J.; Fedosejevs, E.; Harwood, J. L. (2019): The lipid biochemistry of eukaryotic algae. *Progress in Lipid Research* 74, S. 31–68. doi:10.1016/j.plipres.2019.01.003.
- Mac Monagail, M.; Cornish, L.; Morrison, L.; Araújo, R.; Critchley, A. T. (2017): Sustainable harvesting of wild seaweed resources. *European Journal of Phycology* 52 (4), S. 371–390. doi:10.1080/09670262.2017.1365273.
- Machado, L.; Magnusson, M.; Paul, N. A.; Kinley, R.; Nys, R. de; Tomkins, N. (2016): Identification of bioactives from the red seaweed *Asparagopsis taxiformis* that promote antimethanogenic activity in vitro. *J Appl Phycol* 28 (5), S. 3117–3126. doi:10.1007/s10811-016-0830-7.

- Mellor, C.; Embling, R.; Neilson, L.; Randall, T.; Wakeham, C.; Lee, M. D.; Wilkinson, L. L. (2022): Consumer Knowledge and Acceptance of “Algae” as a Protein Alternative: A UK-Based Qualitative Study. *Foods* 11 (12), S. 1703. doi:10.3390/foods11121703.
- Mouritsen, O. G.; Rhatigan, P.; Cornish, M. L.; Critchley, A. T.; Pérez-Lloréns, J. L. (2021): Saved by seaweeds: phyconomic contributions in times of crises. *J Appl Phycol* 33 (1), S. 443–458. doi:10.1007/s10811-020-02256-4.
- Norwegian Seaweed Association (o. J.): Seaweed and Europe. <https://www.norseaweed.no/en/tangogeuropa>, Stand: 01.11.2024.
- Onwezen, M. C.; Bouwman, E. P.; Reinders, M. J.; Dagevos, H. (2021): A systematic review on consumer acceptance of alternative proteins: Pulses, algae, insects, plant-based meat alternatives, and cultured meat. *Appetite* 159, S. 105058. doi:10.1016/j.appet.2020.105058.
- Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) (2019): Global Material Resources Outlook to 2060. Economic Drivers and Environmental Consequences. [www.oecd-ilibrary.org/environment/global-material-resources-outlook-to-2060\\_9789264307452-en](http://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-material-resources-outlook-to-2060_9789264307452-en), Stand: 23.02.2024. doi:10.1787/9789264307452-en.
- Pejic-Pulkowski, S. (o. J.): Was Sie über Algen wissen sollten. GEO. <https://www.geo.de/natur/oekologie/4203-rtkl-algen-was-sie-ueber-algen-wissen-sollten>, Stand: 01.11.2024.
- Pereira, L.; Cotas, J. (2024): Seaweed: a sustainable solution for greening drug manufacturing in the pursuit of sustainable healthcare. *Explor Drug Sci.* 2 (1), S. 50–84. doi:10.37349/eds.2024.00036.
- Rauner, M. (2022): Algen als Superfood und Klimaretter – Irlands Gemüsegärten im Meer. SWR2. <https://www.swr.de/swr2/wissen/algen-als-superfood-und-klimaretter-irlands-gemuese-gaerten-im-meer-102.html>, Stand: 21.11.2023.
- Reef Resilience Network (o. J.): Schalentiere & Algen | Widerstandsfähigkeit des Riffs. <https://reefresilience.org/de/management-strategies/aquaculture/farming-culture-methods/shellfish-seaweed/>, Stand: 07.12.2023.
- Rodionova, M. V.; Poudyal, R. S.; Tiwari, I.; Voloshin, R. A.; Zhar-mukhamedov, S. K.; Nam, H. G.; Zayadan, B. K.; Bruce, B. D.; Hou, H.; Allakhverdiev, S. I. (2017): Biofuel production: Challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (12), S. 8450–8461. doi:10.1016/j.ijhydene.2016.11.125.
- Ross, F. W.; Boyd, P. W.; Filbee-Dexter, K.; Watanabe, K.; Ortega, A.; Krause-Jensen, D.; Lovelock, C.; Sondak, C. F.; Bach, L. T.; Duarte, C. M.; Serrano, O.; Beardall, J.; Tarbuck, P.; Macreadie, P. I. (2023): Potential role of seaweeds in climate change mitigation. *Science of The Total Environment* 885, S. 163699. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.163699.
- Schleuning, R. (2023): NASA-Satelliten zeigen steigenden Algenbefall der Meere. *European Scientist*. <https://www.europeanscientist.com/de/von-der-redaktion-ausgewaehlt/nasa-satelliten-zeigen-steinigenden-algenbefall-der-meere/>, Stand: 21.11.2023.
- Schröter-Schlaack, C.; Aicher, C. (2019): Das Potenzial algenbasierter Kraftstoffe für den Lkw-Verkehr. Sachstandsbericht zum Monitoring „Nachhaltige Potenziale der Bioökonomie - Biokraftstoffe der 3. Generation“. TAB-Arbeitsbericht. Band 181. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). [www.tab-beim-bundestag.de/news-2019-10-10-klimaneutraler-lkw-verkehr-dank-algenkraftstoffen.php](http://www.tab-beim-bundestag.de/news-2019-10-10-klimaneutraler-lkw-verkehr-dank-algenkraftstoffen.php), Stand: 01.11.2024.
- Soler-Vila, A.; Edwards, M.; Whelan, S.; Hanniffy, D.; Heesch, S.; Hernández-Kantún, J.; Moniz, M.; Quéguineur, B.; Ratcliff, J.; Wan, A.; Guiry, M. D. (2022): Macroalgae Fact Sheets. Irish Seaweed Consultancy.
- Spillias, S.; Valin, H.; Batka, M.; Sperling, F.; Havlík, P.; Leclère, D.; Cottrell, R. S.; O’Brien, K. R. (2023): Reducing global land-use pressures with seaweed farming. *Nature Sustainability* 6, S. 380–390. [www.nature.com/articles/s41893-022-01043-y](http://www.nature.com/articles/s41893-022-01043-y), Stand: 01.11.2024.
- Statista GmbH (2022): Fleischersatzprodukte in Deutschland 2021 | Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1301042/umfrage/umfrage-zu-den-beliebtesten-arten-von-fleischersatzprodukten-in-deutschland/>, Stand: 01.11.2024.
- Steiner, J. (2020): Multitalent Mikroalge – Gesund, grün, vielseitig. SWR2. <https://www.swr.de/swr2/wissen/multitalent-mikroalge-gesund-gruen-vielseitig-100.html>, Stand: 21.11.2023.
- Stuhlemmer (2023): Mikroalgen: Umweltfreundliche und gesunde Fischalternative. Universität Hohenheim, Fakultät Agrarwissenschaften. [https://agrar.uni-hohenheim.de/detailansicht-extern?tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=60281&cHash=c0b1c4d1b-719ce91aef565f35531fd0](https://agrar.uni-hohenheim.de/detailansicht-extern?tx_ttnews%5Btt_news%5D=60281&cHash=c0b1c4d1b-719ce91aef565f35531fd0), Stand: 01.11.2024.
- Stumberger, R. (2020): Baustoffe der Zukunft: Carbonfasern und Kunststoffe aus Algen. <https://www.dabonline.de/2020/07/07/baustoffe-der-zukunft-carbonfasern-und-kunststoffe-aus-algen-algentechnikum-plastik/>, Stand: 01.11.2024.
- Sudhakar, K.; Mamat, R.; Samykano, M.; Azmi, W. H.; Ishak, W.; Yusaf, T. (2018): An overview of marine macroalgae as bioresource. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91, S. 165–179. doi:10.1016/j.rser.2018.03.100.
- Sudhakar, M. P.; Maurya, R.; Mehariya, S.; Karthikeyan, O. P.; Dharani, G.; Arunkumar, K.; Pereda, S. V.; Hernández-González, M. C.; Buschmann, A. H.; Pugazhendhi, A. (2024): Feasibility of bioplastic production using micro- and macroalgae - A review. *Environmental Research* 240, S. 117465. doi:10.1016/j.envres.2023.117465.
- Taubert, A.; Jakob, T.; Wilhelm, C. (2019): Glycolate from microalgae: an efficient carbon source for biotechnological applications. *Plant biotechnology journal* 17 (8), S. 1538–1546. doi:10.1111/pbi.13078.
- The Seaweed Company (o. J.): Capturing the value of seaweed. <https://www.theseaweedcompany.com/>, Stand: 01.11.2024.
- Uhrig, S. (2020): Vitamin B12 – alles, was du wissen musst. <https://www.quarks.de/gesundheit/ernaehrung/vitamin-b12-und-vegane-ernaehrung/>, Stand: 01.11.2024.
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2023): Seaweed Farming. Assessment on the Potential of Sustainable Upscaling for Climate, Communities and the Planet. [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/42642/seaweed\\_farming\\_climate.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/42642/seaweed_farming_climate.pdf?sequence=3&isAllowed=y), Stand: 01.11.2024.
- V, G. S.; M, D. K.; Pugazhendi, A.; Bajhaiya, A. K.; Gugulothu, P.; J, R. B. (2021): Biofuel production from Macroalgae: present scenario and future scope. *Bioengineered* 12 (2), S. 9216–9238. doi:10.1080/21655979.2021.1996019.
- Valderrama, D. (Hrsg.) (2013): Social and economic dimensions of carrageenan seaweed farming. Rome.

- Valero, M.; Guillemin, M.-L.; Destombe, C.; Jacquemin, B.; Gachon, C. M.; Badis, Y.; Buschmann, A. H.; Camus, C.; Faugeron, S. (2017): Perspectives on domestication research for sustainable seaweed aquaculture. *pip* 4 (1), S. 33–46. doi:10.1127/pip/2017/0066.
- van den Burg, S. W. K.; Röckmann, C.; Banach, J. L.; van Hoof, L. (2020): Governing Risks of Multi-Use: Seaweed Aquaculture at Offshore Wind Farms. *Frontiers in Marine Science* 7. doi:10.3389/fmars.2020.00060.
- Vega, J.; Álvarez-Gómez, F.; Güenaga, L.; Figueroa, F. L.; Gómez-Pinchetti, J. L. (2020): Antioxidant activity of extracts from marine macroalgae, wild-collected and cultivated, in an integrated multi-trophic aquaculture system. *Aquaculture* 522, S. 735088. doi:10.1016/j.aquaculture.2020.735088.
- Verbraucherzentrale (2023): Spirulina – viel Grün und wenig dahinter. <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/lebensmittel/nahrungsergaenzungsmittel/spirulina-viel-gruen-und-wenig-dahinter-21053>, Stand: 01.11.2024.
- Vijn, S.; Compart, D. P.; Dutta, N.; Foukis, A.; Hess, M.; Hristov, A. N.; Kalscheur, K. F.; Kebreab, E.; Nuzhdin, S. V.; Price, N. N.; Sun, Y.; Tricarico, J. M.; Turzillo, A.; Weisbjerg, M. R.; Yarish, C.; Kurt, T. D. (2020): Key Considerations for the Use of Seaweed to Reduce Enteric Methane Emissions From Cattle. *Front. Vet. Sci.* 7. doi:10.3389/fvets.2020.597430.
- Vincent, A.; Stanley, A.; Ring, J. (2020): Hidden champion of the ocean. Seaweed as a growth engine for a sustainable European future. *Seaweed for Europe*. [https://www.seaweedeurope.com/wp-content/uploads/2020/10/Seaweed\\_for\\_Europe-Hidden\\_Champion\\_of\\_the\\_ocean-Report.pdf](https://www.seaweedeurope.com/wp-content/uploads/2020/10/Seaweed_for_Europe-Hidden_Champion_of_the_ocean-Report.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Viva Maris (o. J.): Home | Viva Maris. <https://www.viva-maris.de/>, Stand: 01.11.2024.
- Wu, J.; Rogers, S. W.; Schaumann, R.; Price, N. N. (2023): A Comparison of Multiple Macroalgae Cultivation Systems and End-Use Strategies of *Saccharina latissima* and *Gracilaria tikvahiae* Based on Techno-Economic Analysis and Life Cycle Assessment. *Sustainability* 15 (15), S. 12072. doi:10.3390/su151512072.
- Yaacob, N. S.; Abdullah, H.; Ahmad, M. F.; Maniyam, M. N.; Sjahrir, F. (2022): Chapter 17 - Microalgae biotechnology: Emerging biomedical applications. In: *Algal Biotechnology. Integrated Algal Engineering for Bioenergy, Bioremediation, and Biomedical Applications*. S. 335–346. San Diego. doi:10.1016/B978-0-323-90476-6.00017-0.
- Zhang, S.; Zhang, L.; Xu, G.; Li, F.; Li, X. (2022): A review on biodiesel production from microalgae: Influencing parameters and recent advanced technologies. *Frontiers in Microbiology* 13. doi:10.3389/fmicb.2022.970028.
- Zhao, Y.; Bourgougnon, N.; Lanoisellé, J.-L.; Lendormi, T. (2022): Biofuel Production from Seaweeds: A Comprehensive Review. *Energies* 15 (24), S. 9395. doi:10.3390/en15249395.
- 2.4 Demokratie in Gefahr?**
- Bank, A.; Josua, M. (2017): Gemeinsam stabiler: wie autoritäre Regime zusammenarbeiten. *GIGA Focus Global*. Band 2. German Institute for Global and Area Studies (GIGA). <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0168-ssoa-52222-9>, Stand: 01.11.2024.
- Bauer, M. W. (2023): Public Administration Under Populist Rule: Standing Up Against Democratic Backsliding. *International Journal of Public Administration*, S. 1–13. doi:10.1080/01900692.2023.2243400.
- Bundesregierung (2024): Das Ringen um die Wahrheit im Superwahljahr 2024. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/umgang-mit-desinformation/desinformation-wahlen-2253208>, Stand: 09.04.2024.
- Bundeszentrale für politische Bildung (bpb) (o.J.): Internationale Organisationen - 24 x Deutschland. <https://www.bpb.de/themen/politisches-system/24-deutschland/40496/internationale-organisationen/>, Stand: 08.11.2023.
- Bundeszentrale für politische Bildung (bpb) (o.J.): NATO-Norderweiterung: Der Beitritt Finnlands. <https://www.bpb.de/kurz-knapp/hintergrund-aktuell/520424/nato-norderweiterung-der-beitritt-finnlands/>, Stand: 08.11.2023.
- CAAD (2023): Climate Mis-/Disinformation Backgrounder. *Climate Action Against Disinformation*. [https://caad.info/wp-content/uploads/2023/09/Climate-Mis-\\_Disinformation-Backgrounder.pdf](https://caad.info/wp-content/uploads/2023/09/Climate-Mis-_Disinformation-Backgrounder.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Climate Action Tracker (2024): Climate Action Tracker. <https://climateactiontracker.org/>, Stand: 01.11.2024.
- Climate Rights International (CRI) (2024): Regierungen in westlichen Demokratien greifen immer härter gegen Klimademonstranten durch. <https://cri.org/regierungen-in-westlichen-demokratien-greifen-immer-harter-gegen-klimademonstranten-durch/>, Stand: 28.10.2024.
- Cohen, S. (2021): Political Stability and Environmental Sustainability. *Columbia Climate School*. <https://news.climate.columbia.edu/2021/01/11/political-stability-environmental-sustainability/>, Stand: 01.11.2024.
- Council of the European Union: General Secretariat of the Council (2024): Forward look 2024 – Managing uncertainty. *Publications Office of the European Union*. <https://data.europa.eu/doi/10.2860/021759>, Stand: 01.11.2024. doi:10.2860/340994.
- dbb beamtenbund und tarifunion (2023): Bürgerbefragung Öffentlicher Dienst 2023. [https://www.dbb.de/fileadmin/user\\_upload/globale\\_elemente/pdfs/2023/forsa\\_2023.pdf](https://www.dbb.de/fileadmin/user_upload/globale_elemente/pdfs/2023/forsa_2023.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Decker, F.; Best, V.; Fischer, S.; Küppers, A. (2019): Vertrauen in Demokratie. Wie zufrieden sind die Menschen in Deutschland mit Regierung, Staat und Politik? *Friedrich-Ebert-Stiftung*. <https://library.fes.de/pdf-files/fes/15621-20190822.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Economist Intelligence Unit (EIU) (2014): Democracy index 2013. *Democracy in limbo*. The Economist Intelligence Unit Limited.
- Economist Intelligence Unit (EIU) (2015): Democracy Index 2014. *Democracy and its discontents*. The Economist Intelligence Unit Limited.
- Economist Intelligence Unit (EIU) (2016): Democracy Index 2015. *Democracy in an age of anxiety*. The Economist Intelligence Unit Limited.
- Economist Intelligence Unit (EIU) (2017): Democracy Index 2016. *Revenge of the “deplorables”*. The Economist Intelligence Unit Limited.
- Economist Intelligence Unit (EIU) (2018): Democracy Index 2017. *Free speech under attack*. The Economist Intelligence Unit Limited.
- Economist Intelligence Unit (EIU) (2019): Democracy Index 2018: *Me too? Political participation, protest and democracy*. The Economist Intelligence Unit Limited.

- Economist Intelligence Unit (EIU) (2020): Democracy Index 2019. A year of democratic setbacks and popular protest. The Economist Intelligence Unit Limited.
- Economist Intelligence Unit (EIU) (2021): Democracy Index 2020. In sickness and in health? The Economist Intelligence Unit Limited.
- Economist Intelligence Unit (EIU) (2022): Democracy Index 2021. The China challenge. The Economist Intelligence Unit Limited.
- Economist Intelligence Unit (EIU) (2023): Democracy Index 2022. Frontline democracy and the battle for Ukraine. The Economist Intelligence Unit Limited.
- Economist Intelligence Unit (EIU) (2024): Democracy Index 2023. Age of Conflict. The Economist Intelligence Unit Limited.
- Eitze, J.; Schrey, D.; Mourier, L. (2020): Autokratie vs. Demokratie. Wer leistet den besseren Klimaschutz? <https://www.klimareporter.de/gesellschaft/wer-leistet-den-besseren-klimaschutz>, Stand: 01.11.2024.
- European Commission (2023): Standard Eurobarometer 99- Spring 2023. Public opinion in the European Union. <https://europa.eu/eurobarometer/surveys/detail/3052>, Stand: 01.11.2024.
- Fratzscher, M. (2023): Das AfD-Paradox: Die Hauptleidtragenden der AfD-Politik wären ihre eigenen Wähler\*innen. DIW aktuell (88). [https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw\\_01.c.879721.de/diw\\_aktuell\\_88.pdf](https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.879721.de/diw_aktuell_88.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Friedrich-Ebert-Stiftung (2023a): Glossar zu Themen der Zeitenwende: Neue Weltordnung - Entwicklung & aktueller Stand. <https://www.fes.de/wissen/neue-weltordnung>, Stand: 01.11.2024.
- Fuhr, L.; Taylor, S. (2017): Wie Korruption den Klimawandel anheizt. <https://www.boell.de/de/2017/03/31/wie-korruption-den-klimawandel-anheizt>, Stand: 01.11.2024.
- Gidron, N.; Hall, P. A. (2017): The politics of social status: economic and cultural roots of the populist right. *The British Journal of Sociology* 68 Suppl 1, S57-S84. doi:10.1111/1468-4446.12319.
- Götz, S.; Kirchner, S. (2016): Die Umweltpolitik der Alternative für Deutschland (AfD). Eine politische Analyse. Heinrich Böll Stiftung. [https://www.boell.de/sites/default/files/2016-02\\_die\\_umweltpolitik\\_der\\_afd.pdf](https://www.boell.de/sites/default/files/2016-02_die_umweltpolitik_der_afd.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Gross, S. (2023): Die heiße Luft der Autokratie. *Internationale Politik Special* (4), S. 42–45. <https://internationalepolitik.de/de/die-heisse-luft-der-autokratie>, Stand: 01.11.2024.
- Hartmann, H. (2022): Autokratisierung und der Niedergang internationaler Zusammenarbeit. BTI. <https://blog.bti-project.de/2022/03/10/autokratisierung-und-der-niedergang-internationaler-zusammenarbeit/>, Stand: 01.11.2024.
- Jacob, K.; Schaller, S.; Carius, A. (Hrsg.) (2020): Populismus und Klimapolitik in Europa. In: *Die Europawahl 2019*. doi:10.1007/978-3-658-29277-5\_25.
- Kaiser, J.; Rhomberg, M. (2016): Questioning the Doubt: Climate Skepticism in German Newspaper Reporting on COP17. *Environmental Communication* 10, S. 556–574. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:143251700>, Stand: 31.10.2023.
- Kekic, L. (2007): The Economist Intelligence Unit's index of democracy.
- Kielon, K. (2024): Ist der Green Deal nach dem Rechtsruck in der EU gefährdet? Mitteldeutscher Rundfunk (MDR). <https://www.mdr.de/wissen/umwelt-klima/klimapolitik-nach-europawahl-rechtsruck-green-deal-100.html>, Stand: 31.10.2024.
- Klee, S.; Midulla, C. (2023): Wie Desinformation die Klimapolitik in der EU bedrohen kann. <https://iep-berlin.de/de/projekte/zukunft-der-europaischen-integration/radar/public-debate/>, Stand: 01.11.2024.
- Körper-Stiftung (2023): Demokratie in der Krise 2023. <https://koerber-stiftung.de/projekte/staerkung-der-demokratie/vertrauensverlust-in-die-demokratie/>, Stand: 01.11.2024.
- Kulin, J.; Sevä, I. J. (2020): Who do you trust? How trust in partial and impartial government institutions influences climate policy attitudes. *Climate Policy* 2021 (Volume 21 - Issue 1), S. 33–46. doi:10.1080/14693062.2020.1792822.
- Maerz, S. F. (2023): Episodes of regime transformation. *Journal of Peace Research*. <https://doi.org/10.1177/00223433231168192>.
- Matlach, P.; Janulewicz, Ł. (2021): Kalter Wind von Rechts: Wie rechte Parteien und Akteur:innen die Klimakrise zu ihren Gunsten missbrauchen Eine Analyse über falsche Fakten, Feindbilder und Desinformationsnarrative im Umfeld der Bundestagswahl 2021. [https://www.isdglobal.org/wp-content/uploads/2021/12/ISD\\_Analyse\\_Kalter-Wind-Klimadebatte-2021.pdf](https://www.isdglobal.org/wp-content/uploads/2021/12/ISD_Analyse_Kalter-Wind-Klimadebatte-2021.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Maurer, M.; Jandura, O.; Vowe, G. (2023): Wie wir ohne Panik aus dem brennenden Haus kommen. Konstruktiver Klimajournalismus mindert Angst und Resignation. In: *Klima(wandel)kommunikation : Im Spannungsfeld von Wissenschaft, Medien und öffentlicher Meinung*.
- Melton, T.; Marktanner, M. (2021): The Impact of Democracy vs. Autocracy on Environmental Degradation. <https://www.kennesaw.edu/coles/centers/markets-economic-opportunity/docs/melton-final.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Nitsche, S. (2024): Demokratiekrise im Huckepack der Klimakrise? <https://www.tu.berlin/forschen/demokratiekrise-im-huckepack-der-klimakrise>, Stand: 01.11.2024.
- North Atlantic Treaty Organization (NATO) (2023): Allies Command Transformation Strategic Foresight Analysis 2023. North Atlantic Treaty Organization (NATO). [https://www.act.nato.int/wp-content/uploads/2024/05/SFA2023\\_rev2.pdf](https://www.act.nato.int/wp-content/uploads/2024/05/SFA2023_rev2.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Rechkemmer, A. (2007): Globalisierung und internationale Umweltpolitik. *Online Akademie*. <https://library.fes.de/pdf-files/akademie/online/50339.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Ruttloff, D.; Haak, J.; Groos, L.; Moch, M.; Mittler, N.; Tophoven-Sedrakyan, T.; Borucki, I. (2023): Desinformation, Hassrede und Fake News – Wie viel Negativität verbreiteten die Parteien im Wahlkampf auf Social Media? In: *Bundestagswahl 2021*. S. 1–42. Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-35758-0\_22-1.
- Schaller, S.; Carius, A. (2019): Convenient Truths. Mapping climate agendas of right-wing populist parties in Europe. *adelphi consult GmbH*. <https://adelphi.de/system/files/mediathek/bilder/Convenient%20Truths%20-%20Mapping%20climate%20agendas%20of%20right-wing%20populist%20parties%20in%20Europe%20-%20adelphi.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Schulze, F.; Wolff, F.; Barth, R. (2008): Umweltrecht ohne Umsetzer? Die Strukturreformen in den Umweltverwaltungen ausgewählter Bundesländer und ihre Herausforderungen. *Öko-Institut e.V.* <https://www.oeko.de/oekodoc/813/2008-256-de.pdf>, Stand: 01.11.2024.

- Shafy, S. (2024): Stirbt die Demokratie in diesem Jahr? Zeit Online. <https://www.zeit.de/politik/2024-01/freiheitliche-demokratie-wahlen-usa-europa-deutschland>, Stand: 01.11.2024.
- Sinha, A.; Sedai, A. K.; Kumar, A.; Nepal, R. (2023): Are Autocracies Bad for the Environment? Global Evidence from Two Centuries of Data. *The Energy Journal* 44 (2), S. 47–78. doi:10.5547/01956574.44.2.asin.
- Töller, A. E. (2022): Machen Parteien in der Umweltpolitik einen Unterschied? *Zeitschrift für Vergleichende Politikwissenschaft* (15), S. 447–476. doi:10.1007/s12286-021-00501-9.
- Transparency International Deutschland e.V. (2021): Scheinwerfer – Das Magazin gegen Korruption (2021): Klimakiller Korruption. Transparency International Deutschland e.V. [https://www.transparency.de/fileadmin/Redaktion/Publikationen/2021/Scheinwerfer\\_93\\_Klima.pdf](https://www.transparency.de/fileadmin/Redaktion/Publikationen/2021/Scheinwerfer_93_Klima.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Umweltbundesamt (UBA) (2023): Meinungsbildung im digitalen Zeitalter. <https://www.umweltbundesamt.de/meinungsbildung-im-digitalen-zeitalter>, Stand: 11.03.2024.
- Wainwright, J.; Mann, G. (2020): *Climate Leviathan. A Political Theory of Our Planetary Future*. London.
- Wolling, J.; Becker, M.; Schumann, C. (Hrsg.) (2023): *Klima(wandel)kommunikation : Im Spannungsfeld von Wissenschaft, Medien und öffentlicher Meinung*.
- 2.5 Militär, Krieg und Kriegsfolgen**
- Auernheimer, G. (2022): Krieg schädigt Umwelt und Klima. <https://www.hintergrund.de/globales/umwelt/krieg-schaedigt-umwelt-und-klima/>, Stand: 01.11.2024.
- Aviation Media & IT GmbH (2022): Marine schießt Drohne mit Lasersystem ab. <https://www.aero.de/news-43803/Marine-schiesst-Drohne-mit-Lasersystem-ab.html>, Stand: 01.11.2024.
- Bohnenstengel, K. (2021): Science-Fiction-Waffen stehen vor der Tür. *Marineforum*, S. 27–31. <https://dmkn.de/wp-content/uploads/2021/05/Laserwaffen.pdf>, Stand: 14.11.2023.
- Bosch, T.; Vinke, K. (2022): Klimapolitik in der Nationalen Sicherheitsstrategie: Wie die Bundesregierung trotz Russlands Angriffs-krieg Kurs Halten kann. DGAP Policy Brief. Band 31. Deutsche Gesellschaft für Auswärtige Politik e.V. (DGAP). [https://dgap.org/system/files/article\\_pdfs/dgap-policy%20brief-2022-31-dt.pdf](https://dgap.org/system/files/article_pdfs/dgap-policy%20brief-2022-31-dt.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Bundesministerium der Verteidigung (BMVG) (2022): Nachhaltigkeitsbericht 2022 des Bundesministeriums der Verteidigung und der Bundeswehr. Berichtzeitraum 2020-2021. Bundesministerium der Verteidigung (BMVG). <https://www.bmvg.de/resource/blob/5561086/9aac6bb5bcd64e90a0552a3705878987/download-nachhaltigkeitsbericht-2022-data.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Bundesministerium der Verteidigung (BMVG) (2023): Verteidigungsetat 2024 wächst um 1,7 Milliarden Euro. NATO-Quote wird erreicht. <https://www.bmvg.de/de/aktuelles/gruenes-licht-im-kabinett-verteidigungsetat-2024-5648648>, Stand: 01.11.2024.
- Bundesregierung (2022): 100 Milliarden Euro für eine leistungsstarke Bundeswehr. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/sicherheit-und-verteidigung/sondervermoegen-bundeswehr-2047518>, Stand: 01.11.2024.
- Bundesregierung (2023b): Nationale Wasserstoffstrategie - Energie aus klimafreundlichem Gas. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/wasserstoff-technologie-1732248>, Stand: 02.11.2023.
- Bundeswehr (o.J.): U-Boot-Klasse 212 A. Leise Jäger in der Tiefe: Die U-Boot-Klasse 212A. Bundeswehr. <https://www.bundeswehr.de/de/ausrustung-technik-bundeswehr/seesysteme-bundeswehr/u-boot-klasse-212-a>, Stand: 01.11.2024.
- Bundeszentrale für politische Bildung (bpb) (2015): Genfer Protokoll zum Verbot chemischer und biologischer Waffen. <https://www.bpb.de/kurz-knapp/hintergrund-aktuell/208302/genfer-protokoll-zum-verbot-chemischer-und-biologischer-waffen/>, Stand: 01.11.2024.
- Bundeszentrale für politische Bildung (bpb) (2022a): Glossar Kriege und Konflikte. Hybride Kriegsführung. <https://www.bpb.de/themen/kriege-konflikte/dossier-kriege-konflikte/504273/hybride-kriegsfuehrung/>, Stand: 14.11.2023.
- Bundeszentrale für politische Bildung (bpb) (2022b): Krieg in Europa. *Aus Politik und Zeitgeschichte (APuZ)*. Band 28-29.
- Damen, M. (2023): EU-Ukraine 2035. Strategic Foresight Analysis on the Future of the EU and Ukraine.
- Europäische Kommission (EK) (2020b): Grüner Deal: Nachhaltige Batterien für eine kreislauforientierte und klimaneutrale Wirtschaft. Europäische Kommission (EK). [https://www.batteriesgesetz.de/wp-content/uploads/DE\\_Gr\\_ener\\_Deal\\_\\_Nachhaltige\\_Batterien\\_f\\_r\\_eine\\_kreislauforientierte\\_und\\_klimaneutrale\\_Wirtschaft.pdf](https://www.batteriesgesetz.de/wp-content/uploads/DE_Gr_ener_Deal__Nachhaltige_Batterien_f_r_eine_kreislauforientierte_und_klimaneutrale_Wirtschaft.pdf), Stand: 01.11.2024.
- European Commission (2024): GHG emissions of all world countries. 2024 report. EDGAR - The Emissions Database for Global Atmospheric Research. [https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report\\_2024](https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2024), Stand: 01.11.2024.
- FFG Flensburger Fahrzeugbau GmbH: Genesis. Hybrid Technology Demonstrator. [https://www.ffg-flensburg.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/broschueren/de/Genesis.pdf](https://www.ffg-flensburg.de/fileadmin/user_upload/downloads/broschueren/de/Genesis.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Friedrich-Ebert-Stiftung (2023a): Glossar zu Themen der Zeitenwende: Neue Weltordnung - Entwicklung & aktueller Stand. <https://www.fes.de/wissen/neue-weltordnung>, Stand: 01.11.2024.
- Friedrich-Ebert-Stiftung (2023b): Glossar zu Themen der Zeitenwende. Aufrüstung - Geschichte & aktueller Stand. <https://www.fes.de/wissen/aufrustung>, Stand: 01.11.2024.
- Ghaedi, M. (2022): Russische Laserwaffen - gibt es sie wirklich? <https://www.dw.com/de/russische-laserwaffen-gibt-es-sie-wirklich/a-61918202>, Stand: 01.11.2024.
- Hermann, H.-J.; Rosenbaum, A. (2022): Eckpunkte für ein nachhaltiges Wiederaufbauprogramm für die Ukraine. Diskussionspapier. Texte. Band 114/2022. Umweltbundesamt (UBA). [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-10-26\\_texte\\_114-2022\\_eckpunkte-wiederaufbauprogramm-ukraine.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-10-26_texte_114-2022_eckpunkte-wiederaufbauprogramm-ukraine.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Hohmann, L.; Hugo, M. (2023): Krieg gegen die Umwelt. Umweltschäden in der Ukraine. *ZDFheute*. <https://www.zdf.de/nachrichten/panorama/umwelt-auswirkung-ukraine-krieg-russland-100.html>, Stand: 01.11.2024.
- Just, V.; Damm, P. (2021): Gefahren und Rebound Effekte. <https://ki-verband.de/wp-content/uploads/2021/02/KIBV-Klima-Positionspapier.pdf>, Stand: 01.11.2024.

- Klerk, L. de; Shlapak, M.; Shmurak, A.; Gassan-zade, O.; Mykhalenko, O.; Korthuis, A.; Zasiadko, Y.; Andrushevych, A.; Horodyskyi, I. (2023): Climate Damage Caused By Russia's War In Ukraine. 24 February 2022 - 1 September 2023. Initiative on GHG accounting of war. [https://climatefocus.com/wp-content/uploads/2023/12/20231201\\_ClimateDamageWarUkraine-18monthsEN.pdf](https://climatefocus.com/wp-content/uploads/2023/12/20231201_ClimateDamageWarUkraine-18monthsEN.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Kolvenbach, M. (2022): Nach Cyberangriff auf Ukraine: Deutsche IT-Sicherheit gefährdet? tagesschau.de. <https://www.tagesschau.de/investigativ/swr/cyberkrieg-ukraine-101.html>, Stand: 01.11.2024.
- Kreye, A.; Mascolo, G.; Dimitrov, S. (o.J.): Wie verändert künstliche Intelligenz den Krieg? <https://www.sueddeutsche.de/projekte/artikel/kultur/ki-und-krieg-palantir-ukraine-e666421/>, Stand: 01.11.2024.
- Le Billon, P. (2001): The political ecology of war: natural resources and armed conflicts. *Political Geography* 20 (5), S. 561–584. doi:10.1016/S0962-6298(01)00015-4.
- Lin, H. C.; Buxton, N.; Akkerman, M.; Burton, D.; Vries, W. de (2023): Climate Crossfire. How NATO's 2% military spending targets contribute to climate breakdown. *Transnational Institute*. [https://www.ippnw.de/commonFiles/pdfs/Frieden/NATOs\\_Climate\\_Crossfire.pdf](https://www.ippnw.de/commonFiles/pdfs/Frieden/NATOs_Climate_Crossfire.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Lohbeck, W. (2004): Umwelt und bewaffneter Konflikt: Dilemma ohne Ausweg? *Hamburger Beiträge zur Friedensforschung und Sicherheitspolitik* (137). <https://edoc.vifapol.de/opus/volltexte/2008/545/pdf/hb137.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Martin Auer (2020): Zum Einfluss von Militär, Rüstung und Krieg auf den Klimawandel. [https://www.researchgate.net/publication/344308830\\_Zum\\_Einfluss\\_von\\_Militar\\_Rustung\\_und\\_Krieg\\_auf\\_den\\_Klimawandel?channel=doi&linkId=5f65b57e299b-f1b53ee113b0&showFulltext=true](https://www.researchgate.net/publication/344308830_Zum_Einfluss_von_Militar_Rustung_und_Krieg_auf_den_Klimawandel?channel=doi&linkId=5f65b57e299b-f1b53ee113b0&showFulltext=true), Stand: 29.02.2024. doi:10.13140/RG.2.2.25623.39844.
- Michaelowa, A. (2023): Militär und Treibhausgasemissionen in Krieg und Frieden. Wie das Militär Verantwortung für seine Emissionen übernehmen kann. *stratos* (Nr. 1), S. 52–57.
- Mrozik, W.; Rajaeifar, M. A.; Heidrich, O.; Christensen, P. (2021): Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science* 14 (12), S. 6099–6121. doi:10.1039/D1EE00691F.
- Muller, N.; King, N. (2023): Wie Künstliche Intelligenz der Umwelt schadet. *Deutsche Welle*. <https://www.dw.com/de/wie-k%C3%BCnstliche-intelligenz-der-umwelt-schadet/a-66305844>, Stand: 01.11.2024.
- Muth, M. (2020): 10 Jahre Stuxnet: Der Hack, der die Welt aufschreckte. *Süddeutsche.de*. <https://www.sueddeutsche.de/digital/stuxnet-iran-atomanalage-natans-1.4960114>, Stand: 01.11.2024.
- Nielsen, O.; Hodgkin, D. (2022): Rebuilding Ukraine: The imminent risks from asbestos. *PreventionWeb*. <https://www.prevention-web.net/blog/rebuilding-ukraine-imminent-risks-asbestos>, Stand: 01.11.2024.
- North Atlantic Treaty Organization (NATO) (2021): NATO Climate Change and Security Action Plan. [https://www.nato.int/cps/en/natohq/official\\_texts\\_185174.htm](https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_185174.htm), Stand: 27.10.2023.
- North Atlantic Treaty Organization (NATO) (2023): Allies Command Transformation Strategic Foresight Analysis 2023. *North Atlantic Treaty Organization (NATO)*. [https://www.act.nato.int/wp-content/uploads/2024/05/SFA2023\\_rev2.pdf](https://www.act.nato.int/wp-content/uploads/2024/05/SFA2023_rev2.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Oberschmidleitner, R. (2013): *Militärökologie - Die Ökologisierung des militärischen Denkens*. Institut für Religion und Frieden.
- Parkinson, S.; Cottrell, L. (2022): Estimating the Military's Global Greenhouse Gas Emissions. *Scientists for Global Responsibility; Conflict and Environment Observatory*. [https://www.sgr.org.uk/sites/default/files/2022-11/SGR%2BCEOBS-Estimating\\_Global\\_Military\\_GHG\\_Emissions\\_Nov22\\_rev.pdf](https://www.sgr.org.uk/sites/default/files/2022-11/SGR%2BCEOBS-Estimating_Global_Military_GHG_Emissions_Nov22_rev.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Peil, K.-H. (2021): Militär, Umwelt und Klima. *Welt Trends, das außenpolitische Journal* 29. Jahrgang (Nr. 174), S. 34–39. <https://shop.welttrends.de/sites/default/files/MYPkjlIPO9/WeltTrends-174-Aufruestung-und-die-Folgen.pdf>, Stand: 31.10.2023.
- Pragma Consulting Group (2023): Amendments to the Law of Ukraine "On Environmental Impact Assessment" were adopted. *Jurydytschna Gaseta*. <https://yur-gazeta.com/legal-business/articles-in-english/amendments-to-the-law-of-ukraine-on-environmental-impact-assessment-were-adopted.html>, Stand: 01.11.2024.
- Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2022): *Reden zur Zeitenwende*. Bundeskanzler Olaf Scholz. Bundesregierung.
- Redaktionsnetzwerk Deutschland (2022): *Kriege in Europa: Übersicht über die größten Konflikte seit 1945*. <https://www.rnd.de/politik/kriege-in-europa-uebersicht-ueber-die-groessten-konflikte-seit-1945-CKRBJWH2ETGAV4KA3LUZKZZVD4.html>, Stand: 01.11.2024.
- Repez, F.; Atanasiu, M. (2019): The Environment - a "Silent Victim" of Armed Conflicts. *Acta Universitatis Danubius: Relationes Internationales* (Vol. 12 Nr. 2), S. 123–133.
- Reuß, M.; Schäfer, A. (2012): Aktueller Begriff: Internationaler Tag für die Verhütung der Ausbeutung der Umwelt in Kriegen und bewaffneten Konflikten. *Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages*. [https://www.bundestag.de/resource/blob/192694/225b2c91d1dfe9ad505d5dd796c2ad29/ausbeutung\\_der\\_umwelt-data.pdf](https://www.bundestag.de/resource/blob/192694/225b2c91d1dfe9ad505d5dd796c2ad29/ausbeutung_der_umwelt-data.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Riedel, A. (2022): Künstliche Intelligenz in der Militärtechnik - Krieg der Killerroboter. <https://www.deutschlandfunkkultur.de/krieg-der-algorithmen-100.html>, Stand: 01.11.2024.
- Rudolph, F. (2019): Der Beitrag von synthetischen Kraftstoffen zur Verkehrswende: Optionen und Prioritäten. *Kurzstudie im Auftrag von Greenpeace Deutschland*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. [https://www.greenpeace.de/publikationen/kurzstudie\\_kraftstoffe\\_verkehrswende.pdf](https://www.greenpeace.de/publikationen/kurzstudie_kraftstoffe_verkehrswende.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Rüffer, J. (2022): Der Vietnamkrieg und seine Folgen für die Umwelt. *Geschichte eines Ökozids*. Unabhängiges Institut für Umweltfragen. <https://www.ufu.de/ufu-informationen/folgen-vietnamkrieg/>, Stand: 01.11.2024.
- Saha, D.; Bilek, P.; Stubbe, R.; Ackermann, A.; Oliinyk, V.-A. (2022): Putting the green reconstruction of Ukraine into action: Requirements for programme design and policy. *Policy Paper Series*. Band 02/2022. *German Economic Team*. [https://www.lowcarbonukraine.com/wp-content/uploads/PP\\_02\\_2022\\_Putting\\_the\\_green\\_reconstruction\\_of\\_Ukraine\\_into\\_action.pdf](https://www.lowcarbonukraine.com/wp-content/uploads/PP_02_2022_Putting_the_green_reconstruction_of_Ukraine_into_action.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Scheffran, J. (2019): *Formen hybrider Kriege – Wissenschaft & Frieden*. <https://wissenschaft-und-frieden.de/artikel/formen-hybrider-kriege/>, Stand: 01.11.2024.

- Scheffran, J. (2020): Militärische Umweltzerstörung, Klimakrise und sozial-ökologische Transformation: Frieden und Nachhaltigkeit gehören zusammen. In: Konfliktanalysen und Ansätze aus der Friedensbewegung. – Kassler Schriften zur Friedenspolitik. S. 43–60. [https://www.researchgate.net/profile/Juergen-Scheffran/publication/347472364\\_Militarische\\_Umweltzerstörung\\_Klimakrise\\_und\\_sozial-okologische\\_Transformation\\_Frieden\\_und\\_Nachhaltigkeit\\_gehoren\\_zusammen/links/5feb0a0c299bf1408856ba78/Militaerische-Umweltzerstoerung-Klimakrise-und-sozial-oekologische-Transformation-Frieden-und-Nachhaltigkeit-gehoeeren-zusammen.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Juergen-Scheffran/publication/347472364_Militarische_Umweltzerstörung_Klimakrise_und_sozial-okologische_Transformation_Frieden_und_Nachhaltigkeit_gehoren_zusammen/links/5feb0a0c299bf1408856ba78/Militaerische-Umweltzerstoerung-Klimakrise-und-sozial-oekologische-Transformation-Frieden-und-Nachhaltigkeit-gehoeeren-zusammen.pdf), Stand: 08.08.2023.
- Schiefer, L. (2022): Krieg und Umweltzerstörung - Die Auswirkungen von Krieg auf die Klima- und Umweltpolitik in Syrien und Afghanistan. Bachelorarbeit. München.
- Schmid, K. (2022): Klimawandel und Cybersicherheit. Verbindungen, Governance Modelle sowie der Beitrag der Cybersicherheit zu einer nachhaltigeren Zukunft. Diplomarbeit. St. Pölten.
- Schreiber, W. (2021): Innerstaatliche Kriege seit 1945. Bundeszentrale für politische Bildung (bpb). <https://www.bpb.de/themen/kriege-konflikte/dossier-kriege-konflikte/54508/innerstaatliche-kriege-seit-1945/>, Stand: 01.11.2024.
- Statista GmbH (2023b): Kriege und Konflikte. Statistik-Report zu Kriegen und Konflikten. Statista GmbH. <https://de.statista.com/statistik/studie/id/44470/dokument/kriege-und-konflikte/>, Stand: 01.11.2024.
- Statista GmbH (2024b): Durchschnittlicher CO<sub>2</sub>-Fußabdruck in Deutschland. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1275275/umfrage/treibhausgasbilanz-pro-person/>, Stand: 02.11.2023.
- Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI) (2023): SIPRI Yearbook 2023. Armaments, Disarmament and International Security. Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI). [https://www.sipri.org/sites/default/files/2023-06/yb23\\_summary\\_en\\_1.pdf](https://www.sipri.org/sites/default/files/2023-06/yb23_summary_en_1.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Strubell, E.; Ganesh, A.; McCallum, A. (2019): Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP. <https://arxiv.org/pdf/1906.02243.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Struck, S. (2023): Energieautonome Streitkräfte. Wasserstoff als Fuel für die militärische Mobilität? Zusammenfassung einer Studie. #GIDSstatement. Band 7/2023. German Institute for Defence and Strategic Studies. [https://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2023/155963/pdf/GIDSstatement2023\\_07\\_Struck\\_20230426\\_1.pdf](https://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2023/155963/pdf/GIDSstatement2023_07_Struck_20230426_1.pdf), Stand: 01.11.2024.
- tagesschau.de (2023a): Zerstörer Kachowka-Staudamm: IAEA sieht keine Gefahr für AKW Saporischschja. <https://www.tagesschau.de/ausland/europa/akw-saporischschja-kuehlung-100.html>, Stand: 01.11.2024.
- Tsiptsira, M. (2022): Diese Auswirkungen hat der Ukraine-Krieg auf das Klima. sh:z Schleswig-Holsteinischer Zeitungsverlag GmbH & Co. KG. <https://www.shz.de/deutschland-welt/schleswig-holstein/klima/artikel/kriegsfolgen-in-der-ukraine-fuer-das-klima-43557456>, Stand: 01.11.2024.
- U.S. Department of Defense (2023): Saildrone Explorer. [www.defense.gov/Multimedia/Photos/igphoto/2003014806/](http://www.defense.gov/Multimedia/Photos/igphoto/2003014806/), Stand: 01.11.2024.
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2024): UNECE, UNEP, and OECD announce Platform for Action on the Green Recovery of Ukraine. <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/unece-unep-and-oecd-announce-platform-action-green-recovery-ukraine>, Stand: 01.11.2024.
- Universität Hamburg (2016): Kriegsdefinition und Kriegstypologie. <https://www.wiso.uni-hamburg.de/fachbereich-sowi/professuren/jakobeit/forschung/akuf/kriegsdefinition.html>, Stand: 01.11.2024.
- Urmersbach, B. (2023): Malta: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1960 bis 2021. Statista GmbH. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1381862/umfrage/entwicklung-der-co2-emissionen-in-malta/>, Stand: 01.11.2024.
- Weinzierl, R.; DuBois, R.; Brauner, C.; Nitsch Daniel (2021): Positionspapier zur Notwendigkeit der Nutzung von synthetischen Kraftstoffen. Bundesministerium der Verteidigung (BMVG); Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat. <https://www.bmvg.de/resource/blob/5038116/dc0eadb-13d5c57fd63b918243de07ee5/20210324-dl-positionspapier-synthetische-kraftstoffe-data.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Welzer, H. (2010): Ökologie des Krieges. Anmerkungen zu einem unterbelichteten Zusammenhang. In: Sozialtheorie. S. 107–126. Bielefeld, Germany. doi:10.14361/9783839412282-005.
- Wilson, S. (2023): Umweltzerstörung im Krieg. Die Rolle des Umweltkriegsverbrechens in Art. 8 Abs. 2 lit. b (iv) IStGH-Statut am Beispiel der Angriffe auf Atomkraftwerke in der Ukraine. In: Frankfurt Law Review : Rechtswissenschaftliche Zeitschrift von Studierenden der Goethe-Universität Frankfurt am Main. 1. Jahrgang. 02/2023. S. 114–122. doi:10.21248/gups.74691.
- Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2020): Einzelfragen zu synthetischen Kraftstoffen (E-Fuels). Herstellungskosten und Anrechnung auf den CO<sub>2</sub>-Flottenverbrauch. <https://www.bundestag.de/resource/blob/818128/29f9702acd2ddf53b9816470949cb/WD-8-079-20-pdf-data.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- World Economic Forum (WEF) (2024): The Global Risks Report 2024. 19th Edition. <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2024/>, Stand: 29.10.2024.
- Zeit Online (2023): Staudamm-Katastrophe: Was wir wissen - und was nicht. <https://www.zeit.de/news/2023-06/07/staudamm-katastrophe-was-wir-wissen-und-was-nicht>, Stand: 01.11.2024.

## 2.6 Die Krisengesellschaft

Arnhold, M. (2024): Soziologe über die Letzte Generation: „Neue konfrontative Aktionen“. taz. <https://taz.de/Soziologe-ueber-die-Letzte-Generation/!6029180/>, Stand: 01.11.2024.

Badura, B.; Ducki, A.; Baumgardt, J.; Meyer, M.; Schröder, H. (Hrsg.) (2023): Fehlzeiten-Report 2023. Zeitenwende – Arbeit gesund gestalten. doi:10.1007/978-3-662-67514-4.

Bauer, A.; Gartner, H.; Hellwagner, T.; Hummel, M.; Hutter, C.; Wanger, S.; Weber, E.; Zika, G. (2023): IAB-Prognose 2023: Rekord-Arbeitskräftebedarf in schwierigen Zeiten. IAB-Kurzbericht. Band 5/2023. Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB). <https://doi.org/10.48720/IAB.KB.2305>, Stand: 01.11.2024. doi:10.48720/IAB.KB.2305.

- Bengel, J.; Lyssenko, L. (2012): Resilienz und psychologische Schutzfaktoren im Erwachsenenalter. Stand der Forschung zu psychologischen Schutzfaktoren von Gesundheit im Erwachsenenalter. Forschung und Praxis der Gesundheitsförderung. Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung (BZgA).
- Boysen-Hogrefe, J.; Groll, D.; Hoffmann, T.; Jannsen, N.; Kooths, S.; Sonnenberg, N.; Stamer, V. (2023): Deutsche Wirtschaft im Frühjahr 2023: Konjunktur fängt sich, Auftriebskräfte eher gering. Kieler Konjunkturberichte. Band 101. Kiel Institut für Weltwirtschaft (IfW Kiel). <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/271150/1/1840440430.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Brehm, J.; Gruhl, H. (2024): Increase in concerns about climate change following climate strikes and civil disobedience in Germany. *Nat Commun* 15 (1), S. 2916. doi:10.1038/s41467-024-46477-4.
- Bültena, L. (2022): Klimawandel: Wie Resignation zu Hoffnung wird. *Zeit Online*. <https://www.zeit.de/wissen/2022-12/klimawandel-klima-resignation-psyche-hoffnung-kommunikationsforschung>, Stand: 01.11.2024.
- Bundesfinanzministerium (BMF) (2019): Zehn Jahre nach der Finanzkrise: Haben die Reformen der Finanzmarktregulierung den Finanzsektor krisenfester gemacht? Bundesfinanzministerium (BMF).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2016): Den ökologischen Wandel gestalten - Integriertes Umweltprogramm 2030. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). [https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/integriertes\\_umweltprogramm\\_2030\\_bf.pdf](https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/integriertes_umweltprogramm_2030_bf.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV); Umweltbundesamt (UBA) (2023): Umweltbewusstsein in Deutschland 2022 - Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/publikationen/umweltbewusstsein\\_2022\\_bf-2023\\_09\\_04.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/publikationen/umweltbewusstsein_2022_bf-2023_09_04.pdf), Stand: 24.09.2024.
- Bundesregierung (2023c): 28. Weltklimakonferenz. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/cop-28-2243142>, Stand: 05.12.2023.
- Bundesregierung (2023d): „Gesundheitliche Auswirkungen auf Kinder und Jugendliche durch Corona“. Abschlussbericht. Bundesregierung. <https://www.bmfsfj.de/resource/blob/214866/fbb00bcf0395b4450d1037616450cfb5/ima-abschlussbericht-gesundheitliche-auswirkungen-auf-kinder-und-jugendliche-durch-corona-data.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Bundesregierung (2023e): Wir entlasten Deutschland. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/bundesregierung/2161804-2161804>, Stand: 01.11.2024.
- Chudzicka-Czupała, A.; Pywiótek-Szeja, M.; Paliga, M.; Grabowski, D.; Krauze, N. (2023): Remote and on-site work stress severity during the COVID-19 pandemic: comparison and selected conditions. *Int J Occup Med Environ Health*. 36 (1), S. 96–111. doi:10.13075/ijomh.1896.02001.
- Civey (2022): Schaden oder nutzen die aktuellen Proteste von Gruppen wie „Letzte Generation“ (z.B. Straßenblockaden) Ihrer Meinung nach ihrem Anliegen des Klimaschutzes eher? <https://civey.com/umfragen/27113/schaden-oder-nutzen-die-aktuellen-proteste-von-gruppen-wie-letzte-generation-z-b-strassenblockaden-ihrer-meinung-nach-ihrem-anliegen-des-klimaschutzes-eher>, Stand: 01.11.2024.
- Council of the European Union: General Secretariat of the Council (2024): Forward look 2024 – Managing uncertainty. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2860/021759>, Stand: 01.11.2024. doi:10.2860/340994.
- Dehl, T.; Hildebrandt, S.; Zich, K.; Nolting, H.-D. (2024): Gesundheitsreport 2024. Arbeitswelt im Klimawandel. Beiträge zur Gesundheitsökonomie und Versorgungsforschung. Band 48. DAK-Gesundheit. [https://www.dak.de/dak/unternehmen/reporte-forschung/gesundheitsreport-2024\\_66150](https://www.dak.de/dak/unternehmen/reporte-forschung/gesundheitsreport-2024_66150), Stand: 01.11.2024.
- Deutsches Ärzteblatt (2022): Homeoffice steigert häufig den Stress. <https://www.aerzteblatt.de/nachrichten/135646/homeoffice-steigert-haeufig-den-stress>, Stand: 01.11.2024.
- Deutsches Ärzteblatt (2023): Arbeitsausfälle: Massive Zunahme wegen psychischer Erkrankungen. <https://www.aerzteblatt.de/archiv/229187/Arbeitsausfaelle-Massive-Zunahme-wegen-psychischer-Erkrankungen>, Stand: 01.11.2024.
- ERGO (o. J.): Folgen bei dauerhaftem Stress: Erkrankungen & Symptome. <https://www.ergo.de/de/Ratgeber/gesundheit/stress/auswirkungen>, Stand: 01.11.2024.
- Frick, V.; Holzhauer, B.; Gossen, M. (2022): Junge Menschen in der Klimakrise. Eine Untersuchung zu emotionaler Belastung, Bewältigungsstrategien und Unterstützungsangeboten im Kontext von Klimawandel und Umweltproblemen in der Studie „Zukunft? Jugend fragen! 2021“. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/junge-menschen-in-der-klimakrise>, Stand: 01.11.2024.
- GEO Wissen (2022): Wie sich Dauerstress auf unseren Körper auswirkt. <https://www.geo.de/wissen/gesundheit/20925-rtkl-permanente-anspannung-wie-sich-dauerstress-auf-unseren-koerper-auswirkt>, Stand: 01.11.2024.
- Haarbusch, N.; Wendt, B. (Hrsg.) (2023): Vorbilder der Klimabewegung. Akteure – Deutungen – Praktiken. In: Wem folgen? Kindheit – Bildung – Erziehung. Philosophische Perspektiven. doi:10.1007/978-3-662-66838-2\_11.
- Hellert, U.; Stix, K. (Hrsg.) (2023): Kreative Stresskompetenz für die Arbeitswelt. Stress proaktiv mit Strategien, Potenzialen und Ressourcen bewältigen. Freiburg, München, Stuttgart.
- Helmcke, S.; Heuss, R.; Hieronimus, S.; Engel, H. (2021): Net-Zero Deutschland. Chancen und Herausforderungen auf dem Weg zur Klimaneutralität bis 2045. McKinsey&Company. [https://www.mckinsey.com/de/~media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/deutschland/news/presse/2021/21-09-10%20net%20zero%20deutschland/mckinsey%20net-zero%20deutschland\\_oktober%202021.pdf](https://www.mckinsey.com/de/~media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/deutschland/news/presse/2021/21-09-10%20net%20zero%20deutschland/mckinsey%20net-zero%20deutschland_oktober%202021.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Hildebrandt, S.; Dehl, T.; Zich, K.; Nolting, H.-D. (2023): Gesundheitsreport 2023. Analyse der Arbeitsunfähigkeiten Gesundheitsrisiko Personalmangel: Arbeitswelt unter Druck. Beiträge zur Gesundheitsökonomie und Versorgungsforschung. Band 44. DAK-Gesundheit. <https://www.dak.de/dak/download/dak-gesundheitsreport-2023-ebook-pdf-2615822.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Homer-Dixon, T.; Renn, O.; Rockstrom, J.; Donges, J. F.; Janzwood, S. (2022): A Call for An International Research Program on the Risk of a Global Polycrisis. Version 2.0. Cascade Institute. <https://cascadeinstitute.org/technical-paper/a-call-for-an-international-research-program-on-the-risk-of-a->, Stand: 01.11.2024. doi:10.2139/ssrn.4058592.

- Jetzke, T.; Abel, S.; Meißner, L.; Richter, S.; Michelmann, J.; Ziegler, O.; Domröse, L.; Knörzer, U.; Olliges, J.; Keppner, B. (2023): Von Quantencomputing über die Zukunft der Innenstädte bis zu einer neuen Weltordnung. Ergebnisse des zweiten Horizon Scanning-Zyklus für das Umweltressort. Umweltbundesamt (UBA). [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb\\_umweltrelevante\\_zukunftsthemen\\_von\\_quantencomputing\\_ueber\\_die\\_zukunft\\_der\\_innenstaedte\\_bis\\_zu\\_einer\\_neuen\\_weltordnung.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb_umweltrelevante_zukunftsthemen_von_quantencomputing_ueber_die_zukunft_der_innenstaedte_bis_zu_einer_neuen_weltordnung.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Junqueira, S. T.; Prates, R. C. (2023): Environmental conservation and psychoanalytic defense mechanisms. The case of the Cachoeira River Watershed, Joinville – SC- Brazil. *Fórum Ambiental da Alta Paulista* (19). [https://www.researchgate.net/publication/371755975\\_Environmental\\_conservation\\_and\\_psychoanalytic\\_defense\\_mechanisms\\_The\\_case\\_of\\_the\\_Cachoeira\\_River\\_Watershed\\_Joinville\\_-\\_SC-Brazil](https://www.researchgate.net/publication/371755975_Environmental_conservation_and_psychoanalytic_defense_mechanisms_The_case_of_the_Cachoeira_River_Watershed_Joinville_-_SC-Brazil), Stand: 12.03.2024.
- Kiesewetter, B. (2022): Klimaaktivismus als ziviler Ungehorsam. *Zeitschrift für Praktische Philosophie* 9 (1), S. 77–114. doi:10.22613/zfpp/9.1.3.
- Krol, B. (2024): Wie wir Krisen bewältigen – Resilienz und ihre Grenzen. SWR2. <https://www.swr.de/swr2/wissen/resilienz-und-ihre-grenzen-wie-wir-krisen-bewaeltigen-100.html>, Stand: 01.11.2024.
- Kumkar, N. C. (2022): Die Radikalisierung der Radikalisierungsbehauptung: Zum Diskurs über die letzte Generation. *Soziopolis*. [https://www.ssoar.info/ssoar/bitstream/handle/document/83240/ssoar-sopolis-2022-kumkar-Die\\_Radikalisierung\\_der\\_Radikalisierungsbehauptung\\_Zum.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.ssoar.info/ssoar/bitstream/handle/document/83240/ssoar-sopolis-2022-kumkar-Die_Radikalisierung_der_Radikalisierungsbehauptung_Zum.pdf?sequence=1&isAllowed=y), Stand: 02.08.2023.
- Loschert, F.; Kolb, H.; Schork, F. (2023): Prekäre Beschäftigung – prekäre Teilhabe. Ausländische Arbeitskräfte im deutschen Niedriglohnssektor. [https://www.svr-migration.de/wp-content/uploads/2023/06/SVR-Studie\\_Prekaere-Beschaeftigung\\_Prekaere-Teilhabe.pdf](https://www.svr-migration.de/wp-content/uploads/2023/06/SVR-Studie_Prekaere-Beschaeftigung_Prekaere-Teilhabe.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Nadjivan, S.; Sustala, L. (2023): Angstfrei aus der Krise. *Policy Brief*. [https://www.neos.eu/\\_Resources/Persistent/c0c5daa-423c2c43d55b2035c9ec6b6f64d692208/PB-Angstfrei-aus-der-Krise-DU-Korr.pdf](https://www.neos.eu/_Resources/Persistent/c0c5daa-423c2c43d55b2035c9ec6b6f64d692208/PB-Angstfrei-aus-der-Krise-DU-Korr.pdf), Stand: 01.11.2024.
- North Atlantic Treaty Organization (NATO) (2023): *Allies Command Transformation Strategic Foresight Analysis 2023*. North Atlantic Treaty Organization (NATO). [https://www.act.nato.int/wp-content/uploads/2024/05/SFA2023\\_rev2.pdf](https://www.act.nato.int/wp-content/uploads/2024/05/SFA2023_rev2.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Novalia, W.; Malekpour, S. (2020): Theorising the role of crisis for transformative adaptation. *Environmental Science and Policy* (112), S. 361–370. doi:10.1016/j.envsci.2020.07.009.
- Pariser, E. (2011): *The Filter Bubble: What the Internet Is Hiding from You*.
- Poulakos, I. (2023): Deutschland auf der Flucht vor der Wirklichkeit. <https://www.rheingold-marktforschung.de/gesellschaft/deutschland-auf-der-flucht-vor-der-wirklichkeit/>, Stand: 01.11.2024.
- Röhrlich, D. (2019): Vor 30 Jahren - Aus für die Wiederaufbereitungsanlage Wackersdorf. *Deutschlandfunk.de*. <https://www.deutschlandfunk.de/vor-30-jahren-aus-fuer-die-wiederaufbereitungsanlage-100.html>, Stand: 01.11.2024.
- Rucht, D. (2023a): Die Letzte Generation. Beschreibung und Kritik. *ipb working paper*. Band 1/2023. [https://protestinstitut.eu/wp-content/uploads/2023/04/WP\\_1.2023.pdf](https://protestinstitut.eu/wp-content/uploads/2023/04/WP_1.2023.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Rucht, D. (2023b): Die Letzte Generation: Eine kritische Zwischenbilanz. *Forschungsjournal Soziale Bewegungen* 36 (2), S. 186–204. doi:10.1515/fjsb-2023-0018.
- Rudnicka, J. (2024): Inflationsrate in Deutschland bis 2023 | Statista. Statista GmbH. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1046/umfrage/inflationsrate-veraenderung-des-verbraucherpreisindexes-zum-vorjahr/>, Stand: 01.11.2024.
- Schipperges, M.; Denk, A.; Jacob, K.; Ivleva, D. (2024): *Umweltpolitik im Dialog – Umwelt / Populismus / Demokratie*. *Texte* 45/2024. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/45\\_2024\\_texte\\_umweltpolitik\\_im\\_dialog\\_v2.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/45_2024_texte_umweltpolitik_im_dialog_v2.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Schnetzer, S. (2023): Veröffentlichung: Trendstudie „Jugend in Deutschland 2023“. <https://simon-schnetzer.com/blog/veroeffentlichung-trendstudie-jugend-in-deutschland-2023/>, Stand: 01.11.2024.
- Schubert, K.; Klein, M. (2021): *Das Politiklexikon. Begriffe, Fakten, Zusammenhänge*. Bonn.
- Spiegel Job & Karriere (2024): Umfrage. Beschäftigte fühlen sich durch Krisen zunehmend ausgelaugt. <https://www.spiegel.de/karriere/belastung-bei-arbeitnehmern-beschaeftigte-fuehlen-sich-durch-krisen-zunehmend-ausgelaugt-a-a193054e-ad62-4fed-a8a0-82cb404a093c>, Stand: 01.11.2024.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2023a): *Krankenstand. Qualität der Arbeit*. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Qualitaet-Arbeit/Dimension-2/krankenstand.html>, Stand: 01.11.2024.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2024): *Energie - Ukraine*. [https://www.destatis.de/DE/Im-Fokus/Ukraine/Energie/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Im-Fokus/Ukraine/Energie/_inhalt.html), Stand: 15.07.2024.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (o.J.): *Preismonitor*. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Konjunkturindikatoren/Preismonitor/Preismonitor.html#246992>, Stand: 15.07.2024.
- Steg, J. (2020): Was heißt eigentlich Krise? *Soziologie* 49 (4), S. 423–435. <https://publikationen.sozioologie.de/index.php/soziologie/article/view/1484/1513>, Stand: 01.11.2024.
- Suckert, L. (2021): Die Zukunft in der Krise. *Max-Planck-Gesellschaft*. <https://www.mpg.de/16623464/die-zukunft-in-der-krise>, Stand: 01.11.2024.
- Theurer, J. (Hrsg.) (2022): *Klimaschutz und Gewalt. Wann sich Aktivisten strafbar machen und wie wir die Welt wirklich retten*. Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-39354-0\_4.
- Unzicker, K. (2022): *Erschöpfte Gesellschaft. Auswirkungen von 24 Monaten Pandemie auf den gesellschaftlichen Zusammenhalt*. Bertelsmann Stiftung. [https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/Umfraege\\_Erschoepfte\\_Gesellschaft\\_Feb2022.pdf](https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/Umfraege_Erschoepfte_Gesellschaft_Feb2022.pdf), Stand: 01.11.2024. doi:10.11586/2022051.
- Verivox (2024): *Verivox-Verbraucherpreisindex: Strompreis für Privathaushalte in Deutschland bei einem Stromverbrauch von 4.000 kWh in den Jahren 2014 bis 2024 (in Euro) [Graph]*. Statista GmbH. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/914784/umfrage/entwicklung-der-strompreise-in-deutschland-verivox-verbraucherpreisindex/>, Stand: 01.11.2024.

- Voermans, S.; Meyer, B.; Zill, A.; Dilba, D. (2021): Entspann dich, Deutschland! TK-Stressstudie 2021. Techniker Krankenkasse (TK). <https://www.tk.de/resource/blob/2116464/d16a9c0de0dc83509e9cf12a503609c0/2021-stressstudie-data.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- World Economic Forum (WEF) (2024): The Global Risks Report 2024. 19th Edition. <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2024/>, Stand: 29.10.2024.
- ZDFheute (2023): Wird Lützerath zum Hambacher Forst 2.0? <https://www.zdf.de/nachrichten/politik/klima-aktivisten-protest-luetzerath-kohle-hambacher-forst-100.html>, Stand: 24.11.2023.
- ### 2.7 Transformation in wirtschaftlich unsicheren Zeiten
- Ariadne Projekt (2023): Industriegewende. Wettbewerbsfähige und klimafreundliche Industriegewende. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK). <https://ariadneprojekt.de/themen/industriegewende/>, Stand: 01.11.2024.
- Baur, A.; Fuest, C.; Gstrein, D.; Heil, P.; Potrafke, N.; Rochell, A. (2023): Die Betroffenheit der deutschen Wirtschaft durch den US-Inflation Reduction Act (IRA). Studie im Rahmen des BMF-Forschungsauftrags fe 3/19: Rahmenvertrag Wissenschaftliche (Kurz-) Expertisen zu Grundsatzfragen der Finanz-, Steuer- und Wirtschaftspolitik. ifo Kurzexpertise. Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e.V. (ifo Institut). <https://www.ifo.de/DocDL/ifo-kurzexpertise-bmf-ira-2023.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Beznoska, M.; Hentze, T.; Hüther, M. (2021): Zum Umgang mit den Corona-Schulden: Simulationsrechnungen zur Schuldenstandquote. IW-policy paper. Band 7/2021. Institut der deutschen Wirtschaft Köln e. V. (IW). <https://www.econstor.eu/handle/10419/233075>, Stand: 01.11.2024.
- Bundesfinanzministerium (BMF) (2021): Jahreswirtschaftsbericht 2021 im Zeichen der Corona-Krise - Bundesfinanzministerium - BMF-Monatsbericht Februar 2021. Bundesfinanzministerium (BMF), Stand: 11.03.2024.
- Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) (2022): „Mit Klimageld sozialen Ausgleich schaffen“. Interview von Hubertus Heil, Bundesminister für Arbeit und Soziales, mit der Berliner Morgenpost. <https://www.bmas.de/DE/Service/Presse/Interviews/2022/2022-05-28-berliner-morgenpost.html>, Stand: 01.11.2024.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (o. J.a): Fachkräfte für Deutschland. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/fachkraeftesicherung.html>, Stand: 01.11.2024.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (o. J.b): Wohlstand und Klimaschutz: Die sozial-ökologische Marktwirtschaft ist das Konzept für die Transformation hin zur Klimaneutralität. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/soziale-marktwirtschaft.html>, Stand: 13.03.2024.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2024): Jahreswirtschaftsbericht 2024. Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig stärken. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/jahreswirtschaftsbericht-2024.html>, Stand: 01.11.2024.
- Bundeszentrale für politische Bildung (bpb) (2021): soziale Marktwirtschaft. <https://www.bpb.de/kurz-knapp/lexika/lexikon-der-wirtschaft/20642/soziale-marktwirtschaft/>, Stand: 01.11.2024.
- Burret, H.; Kirchner, A.; Kreidelmeyer, S.; Spillmann, T.; Ambros, J.; Limbers, J.; Granzow, M.; Häßler, R. D. (2021): Beitrag von Green Finance zum Erreichen von Klimaneutralität in Deutschland. Prognos AG; Nextra Consulting; NKI-Institut für nachhaltige Kapitalanlagen. <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Studien-und-Materialien/Green-Finance-und-Klimaneutralitaet.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- CAM (2023): Marktpositionierung der deutschen Automobilhersteller in China - CAM. <https://auto-institut.de/automotiveperformance/marktpositionierung-der-deutschen-automobilhersteller-in-china/>, Stand: 01.11.2024.
- Clemens, M.; Goerge, M.; Michelsen, C. (2019): Öffentliche Investitionen sind wichtige Voraussetzung für privatwirtschaftliche Aktivität. doi:10.18723/DIW\_WB:2019-31-3.
- Council of the European Union: General Secretariat of the Council (2024): Forward look 2024 – Managing uncertainty. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2860/021759>, Stand: 01.11.2024. doi:10.2860/340994.
- Crawford, N. (2023): Europe's Measured Response to the US Inflation Reduction Act. <https://www.iiss.org/online-analysis/survival-online/2023/04/europes-measured-response-to-the-us-inflation-reduction-act/>, Stand: 01.11.2024.
- Deutsche Bundesbank (2024): Destatis: Deutsches Bruttoinlandsprodukt sinkt 2023 um 0,3 Prozent. <https://www.bundesbank.de/de/aufgaben/themen/destatis-deutsches-bruttoinlandsprodukt-sinkt-2023-um-0-3-prozent-921680>, Stand: 01.11.2024.
- Deutsche Industrie- und Handelskammer (DIHK) (2023): Wie sollte die EU auf den „Inflation Reduction Act“ reagieren? <https://www.dihk.de/de/aktuelles-und-presse/aktuelle-informationen/wie-sollte-die-eu-auf-den-inflation-reduction-act-reagieren--93460>, Stand: 01.11.2024.
- Deutsche Industrie- und Handelskammer (DIHK) (2024): Bundeskabinett beschließt Viertes Bürokratienteilungsgesetz (BEG IV). <https://www.dihk.de/de/themen-und-positionen/bundeskabinett-beschliesst-viertes-buerokratienteilungsgesetz-beg-iv-115100>, Stand: 01.11.2024.
- Diefenbacher, H.; Zieschank, R. (2010): Wohlfahrtsmessung in Deutschland. Ein Vorschlag für einen nationalen Wohlfahrtsindex. Texte. Band 02/2010. Umweltbundesamt (UBA). <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3902.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- DIW Berlin (2023): DIW Berlin: US-Investitionspaket Inflation Reduction Act erfordert schnelles strategisches Handeln der EU. [https://www.diw.de/de/diw\\_01.c.864937.de/publikationen/wochenberichte/2023\\_06\\_1/us-investitionspaket\\_inflation\\_reduktion\\_act\\_erfordert\\_schnelles\\_strategisches\\_handeln\\_der\\_eu.html](https://www.diw.de/de/diw_01.c.864937.de/publikationen/wochenberichte/2023_06_1/us-investitionspaket_inflation_reduktion_act_erfordert_schnelles_strategisches_handeln_der_eu.html), Stand: 01.11.2024.
- Dohse, D.; Bickenback, Frank, Bode, Eckhardt; Gold, R.; Hanley, A.; Liu, Wan-Hsin, Semrau, Finn Ole; Stolzenburg, U.; Vehrke, J. (2020): Analyse der industrierelevanten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Deutschland im internationalen Vergleich. Endbericht Projekt 24/19. Kiel Institut für Weltwirtschaft. [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/industriestudie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/industriestudie.pdf?__blob=publicationFile&v=4), Stand: 01.11.2024.

- Dullien, S.; Rietzler, K.; Tober, S. (2021): Öffentliche Investitionen im Konjunkturprogramm als Einstieg in die sozial-ökologische Transformation. Band 3. ZBW – Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10273-021-2869-6.pdf>, Stand: 01.11.2024. doi:10.1007/s10273-021-2869-6.
- Expertenrat für Klimafragen (2023): Stellungnahme zum Entwurf des Klimaschutzprogramms 2023. Gemäß § 12 Abs. 3 Nr. 3 Bundes-Klimaschutzgesetz. Geschäftsstelle Expertenrat für Klimafragen (ERK). [https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2023/09/ERK2023\\_Stellungnahme-zum-Entwurf-des-Klimaschutzprogramms-2023.pdf](https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2023/09/ERK2023_Stellungnahme-zum-Entwurf-des-Klimaschutzprogramms-2023.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Fleiter, T.; Rehfeldt, M. (2023): Klimaneutrale Industrie: Ohne ambitionierten CO<sub>2</sub>-Preis nicht zu machen. <https://ariadneprojekt.de/news-de/klimaneutrale-industrie-ohne-ambitionierten-co2-preis-nicht-zu-machen/>, Stand: 01.11.2024.
- Grömling, M.; Hentze, T.; Schäfer, H. (2022): Wirtschaftliche Auswirkungen der Corona-Pandemie in Deutschland. IW-Trends. Band 49. Jg. Nr. 1. <https://www.iwkoeln.de/studien/michael-groemling-tobias-hentze-holger-schaefer-eine-ökonomische-bilanz-nach-zwei-jahren.html>, Stand: 01.11.2024. doi:10.2373/1864-810X.22-01-03.
- Helmcke, S.; Heuss, R.; Hieronimus, S.; Engel, H. (2021): Net-Zero Deutschland. Chancen und Herausforderungen auf dem Weg zur Klimaneutralität bis 2045. McKinsey&Company. [https://www.mckinsey.com/de/~ /media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/deutschland/news/presse/2021/21-09-10%20net%20zero%20deutschland/mckinsey%20net-zero%20deutschland\\_oktober%202021.pdf](https://www.mckinsey.com/de/~ /media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/deutschland/news/presse/2021/21-09-10%20net%20zero%20deutschland/mckinsey%20net-zero%20deutschland_oktober%202021.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Hickel, J.; Brockway, P.; Kallis, G. (2021): Urgent need for post-growth climate mitigation scenarios. *Nature Energy* (6), S. 766–768. doi:10.1038/s41560-021-00884-9.
- Jacob, K.; Graaf, L.; Wolff, F.; Heyen, D. A.; Brohmann, B.; Griebhammer, R. (2019): Transformative Umweltpolitik: Ansätze zur Förderung gesellschaftlichen Wandels. Texte. Band 07/2020. Umweltbundesamt (UBA). [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-01-15\\_texte\\_07-2020\\_transformative-umweltpolitik.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-01-15_texte_07-2020_transformative-umweltpolitik.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Jakob Dirksen (2024): Concepts and measures of development : Beyond GDP. In: *The Companion to Development Studies*. S. 113–118. doi:10.4324/9780429282348-24.
- Janson, M. (o.J.): EU-Infrastruktur-Ausgaben – Deutschland fast Schlusslicht. <https://de.statista.com/infografik/29928/staatliche-investitionen-in-oeffentliche-infrastruktur-in-der-eu/>, Stand: 01.11.2024.
- KfW Research (2023): KfW-Klimabarometer 2023. Trotz Energiekrise: Anstieg der Klimaschutzinvestitionen deutscher Unternehmen im Jahr 2022 um real 18 %. <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-KfW-Klimabarometer/KfW-Klimabarometer-2023.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Khalfan, A.; Lewis, A. N.; Aguilar, C.; Persson, J.; Lawson, M.; Dabi, N.; Jayoussi, S.; Acharya, S. (2023): Climate Equality: A Planet for the 99%. Executive Summary. Oxfam International. <https://oi-files-d8-prod.s3.eu-west-2.amazonaws.com/s3fs-public/2023-11/Climate%20equality%20report%20executive%20summary.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Klingbeil-Döring, W. (2023): Die Auswirkungen von Künstlicher Intelligenz auf den Arbeitsmarkt. Bundeszentrale für politische Bildung (bpb). <https://www.bpb.de/themen/arbeitsmarkt/politik/522513/die-auswirkungen-von-kuenstlicher-intelligenz-auf-den-arbeitsmarkt/>, Stand: 01.11.2024.
- Klinger, S.; Fuchs, J. (2020): Wie sich der demografische Wandel auf den deutschen Arbeitsmarkt auswirkt - IAB-Forum. <https://www.iab-forum.de/wie-sich-der-demografische-wandel-auf-den-deutschen-arbeitsmarkt-auswirkt/>, Stand: 13.03.2024.
- KOFA (2023): Fachkräftemangel im Überblick. <https://www.kofa.de/daten-und-fakten/ueberblick-fachkraeftemangel/>, Stand: 01.11.2024.
- Lauterjung, A. (o.J.): Wachstumschancengesetz: Mit diesen zehn Punkten will die Bundesregierung die Wirtschaft retten. <https://www.wiwo.de/politik/deutschland/standort-deutschland-mit-diesen-zehn-punkten-will-die-bundesregierung-die-wirtschaft-retten/29360906.html>, Stand: 01.11.2024.
- Luderer, G.; Kost, C.; Sörgel, D. (2021): Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich. [https://www.fona.de/medien/pdf/2021\\_10\\_Szenariereport\\_Oktober2021.pdf](https://www.fona.de/medien/pdf/2021_10_Szenariereport_Oktober2021.pdf), Stand: 01.11.2024. doi:10.48485/PIK.2021.006.
- Lutter, S.; Kreimel, J.; Giljum, S.; Dittrich, M.; Limberger, S.; Ewers, B.; Schoer, K.; Manstein, C. (2022): Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Bericht für Deutschland 2022. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb\\_die\\_nutzung\\_natuerlicher\\_ressourcen\\_2022\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb_die_nutzung_natuerlicher_ressourcen_2022_0.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Meyer, T. (2023): Innovations- und Wirtschaftsstandort Deutschland: Neue Wege gehen. Argumente zu Marktwirtschaft und Politik (168). <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/271057/1/184369316X.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- North Atlantic Treaty Organization (NATO) (2023): Allies Command Transformation Strategic Foresight Analysis 2023. North Atlantic Treaty Organization (NATO). [https://www.act.nato.int/wp-content/uploads/2024/05/SFA2023\\_rev2.pdf](https://www.act.nato.int/wp-content/uploads/2024/05/SFA2023_rev2.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Oehlmann, M.; Linsenmeier, M.; Kahlenborn, W.; Götting, K.; Klaas, K.; Roszbach, M.; Circoth, A.; Bunsen, J. (2021): Wirkung veränderter Einkommen auf den Ressourcenverbrauch. Texte. Band 04/2021. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021\\_12\\_08\\_texte\\_04-2021\\_einkommen\\_ressourcenverbrauch.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021_12_08_texte_04-2021_einkommen_ressourcenverbrauch.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Olk, J. (2024): OECD senkt Wachstumsprognose für Deutschland drastisch. *Handelsblatt*. <https://www.handelsblatt.com/politik/konjunktur/konjunktur-oecd-senkt-wachstumsprognose-fuer-deutschland-drastisch/100012858.html>, Stand: 01.11.2024.
- Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) (2023a): A return to strong, resilient and sustainable growth for Germany requires future focused investment and reform - OECD. <https://www.oecd.org/newsroom/a-return-to-strong-resilient-and-sustainable-growth-for-germany-requires-future-focused-investment-and-reform.htm>, Stand: 01.11.2024.
- Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) (2023b): OECD Economic Outlook, Volume 2023 Issue 2. Band 114. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/7a5f73ceen>, Stand: 25.10.2024. doi:10.1787/16097408.

- Orth, M. (2023): 70 Jahre Soziale Marktwirtschaft. <https://www.deutschland.de/de/topic/wirtschaft/soziale-marktwirtschaft-in-deutschland-wachstum-und-wohlstand>, Stand: 13.03.2024.
- Otto, I. M.; Kim, K. M.; Dubrovsky, N. (2019): Shift the focus from the super-poor to the super-rich. *Nature Clim Change* (9), S. 82–84. doi:10.1038/s41558-019-0402-3.
- Petschow, U.; aus dem Moore, N.; Hofmann, D.; Pissarskoi, E.; Lange, S. (2020a): Eckpunkte und Positionen einer Vorsorgeorientierten Postwachstumsökonomie. Vom Ende des wachsenden Wohlstandsmodells. In: *Postwachstumsgeographien. Raumbezüge diverser und alternativer Ökonomien. – Sozial- und Kulturgeographie* Band 38. Bielefeld. [https://www.researchgate.net/publication/343982204\\_Eckpunkte\\_und\\_Positionen\\_einer\\_Vorsorgeorientierten\\_Postwachstumsokonomie/fulltext/6057ff3d-458515e8345ff581/Eckpunkte-und-Positionen-einer-Vorsorgeorientierten-Postwachstumsokonomie.pdf#](https://www.researchgate.net/publication/343982204_Eckpunkte_und_Positionen_einer_Vorsorgeorientierten_Postwachstumsokonomie/fulltext/6057ff3d-458515e8345ff581/Eckpunkte-und-Positionen-einer-Vorsorgeorientierten-Postwachstumsokonomie.pdf#), Stand: 28.11.2023.
- Petschow, U.; aus dem Moore, N.; Pissarskoi, E.; Bahn-Walkowiak, B.; Ott, H.; Hofmann, D.; Lange, S.; Korfhage, T.; Schoffs, A.; Wilts, H.; Best, B.; Benke, J.; Buhl, J.; Galinski, L.; Lucas, R.; Koop, C.; Werland, S.; Berg, H. (2020b): Ansätze zur Ressourcenschonung im Kontext von Postwachstumskonzepten. *Texte. Band 98/2020. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW); RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.* [https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7533/file/7533\\_Ressourcenschonung.pdf](https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7533/file/7533_Ressourcenschonung.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Pokraka, D. (2023): Wo bleibt das Klimageld? Entlastung für CO<sub>2</sub>-Preis. *tagesschau.de.* <https://www.tagesschau.de/inland/innenpolitik/klimageld-100.html>, Stand: 01.11.2024.
- Ragnitz, J. (2022): Lieferengpässe in der deutschen Industrie – Eine Einordnung. *ifo Dresden berichtet. Band 5/2022. Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e.V. (ifo Institut).* [https://www.ifo.de/DocDL/ifoDD\\_22-05\\_03-08\\_Ragnitz.pdf](https://www.ifo.de/DocDL/ifoDD_22-05_03-08_Ragnitz.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Roland Berger GmbH; Handelsblatt Research Institute (2023): Erfolgsfaktor Transformation. Deutschland in der Zeitenwende. Roland Berger GmbH; Handelsblatt Research Institute. [https://content.rolandberger.com/hubfs/State\\_of\\_the\\_Nation\\_Transformation\\_DS\\_\(3\)-1.pdf?utm\\_campaign=22-0023\\_European-pe-outlook&utm\\_medium=email&\\_hsmi=266032602&\\_hsenc=p2ANqtz-9pSxmDyh-Qk99\\_5HXqRtx7KeffOPaf\\_C0gF4tVrFI-h00oU6bhoarQ83zniW5xmfv9fsi4338bbh06hf9vqyo0EABKUKdM3CpWRUeFdwlt0I1R\\_RZE&utm\\_content=266032602&utm\\_source=hs\\_automation](https://content.rolandberger.com/hubfs/State_of_the_Nation_Transformation_DS_(3)-1.pdf?utm_campaign=22-0023_European-pe-outlook&utm_medium=email&_hsmi=266032602&_hsenc=p2ANqtz-9pSxmDyh-Qk99_5HXqRtx7KeffOPaf_C0gF4tVrFI-h00oU6bhoarQ83zniW5xmfv9fsi4338bbh06hf9vqyo0EABKUKdM3CpWRUeFdwlt0I1R_RZE&utm_content=266032602&utm_source=hs_automation), Stand: 01.11.2024.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2024): Suffizienz als „Strategie des Genug“: Eine Einladung zur Diskussion. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU).
- Sachverständigenrat für Wirtschaft (2023): Wie Europa auf den Inflation Reduction Act reagieren sollte. <https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/start/aktuelles/the-inflation-reduction-act-how-should-the-eu-react.html>, Stand: 01.11.2024.
- Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung (2019): Aufbruch zu einer neuen Klimapolitik. Sondergutachten. Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung. [https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/gutachten/sg2019/sg\\_2019.pdf](https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/gutachten/sg2019/sg_2019.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Schulz, F.; Trappmann, V. (2023): Erwartungen von Beschäftigten an die sozial-ökologische Transformation. Ergebnisse einer repräsentativen Umfrage zu Klimawandel und Arbeitswelt. Working Paper Forschungsförderung. Band 308. Hans-Böckler-Stiftung. [https://www.boeckler.de/fpdf/HBS-008723/p\\_fofoe\\_WP\\_308\\_2023.pdf](https://www.boeckler.de/fpdf/HBS-008723/p_fofoe_WP_308_2023.pdf), Stand: 12.02.2024.
- Sievert, E. (2023): Germany: strict debt-brake application fosters discipline but EUR 300bn investment lag remains. *Scope Ratings.* <https://www.scooperatings.com/ratings-and-research/research/EN/175748>, Stand: 01.11.2024.
- Statista GmbH (2024c): Geschäftsrisiken für die deutsche Industrie 2023. Statista Research Department. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1290347/umfrage/geschaeftsrisiken-fuer-die-deutsche-industrie/>, Stand: 14.03.2024.
- Statista GmbH (2024d): Nettozuwanderung in Deutschland bis 2022 | Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/150438/umfrage/saldo-der-zuzuege-und-fortzuege-in-deutschland/>, Stand: 13.03.2024.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2023b): Bruttoinlandsprodukt (BIP). <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Tabellen/bip-bubbles.html>, Stand: 01.11.2024.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2023c): Langfristige Wirtschaftsentwicklung in Deutschland. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/BIP-Langfristig.html>, Stand: 06.12.2023.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2023d): Verbraucherpreisindex für Deutschland. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Konjunkturindikatoren/Basisdaten/vpi001j.html>, Stand: 04.10.2023.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2023e): Energieprodukte größtenteils deutlich teurer als vor Angriff Russlands auf die Ukraine. [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/02/PD23\\_N011\\_61.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/02/PD23_N011_61.html), Stand: 11.03.2024.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2023f): Bruttoinlandsprodukt stagniert im 2. Quartal 2023. [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/07/PD23\\_299\\_811.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/07/PD23_299_811.html), Stand: 30.08.2023.
- tagesschau.de (2024a): Exporte im vergangenen Jahr gesunken. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/konjunktur/konjunktur-wirtschaft-ifo-exporte-deutschland-100.html>, Stand: 11.03.2024.
- tagesschau.de (2024b): Exporte in die USA und nach China brechen im Dezember ein. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/weltwirtschaft/deutsche-exporte-ex-eu-100.html>, Stand: 11.03.2024.
- Thie, J.-E.; Teitge, J.; Trauboth, A.; Jaeger, C. (2022): Wie viel Wachstum - welches Wachstum? *IMK Study. Band 82. Hans-Böckler-Stiftung, Institut für Makroökonomie und Konjunkturforschung (IMK).* [https://www.econstor.eu/bitstream/10419/270342/1/p\\_imk\\_study\\_82\\_2022.pdf](https://www.econstor.eu/bitstream/10419/270342/1/p_imk_study_82_2022.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Tran, M. T. (2022): Fachkräfte-Einwanderung: Wer will schon nach Deutschland? *Westdeutscher Rundfunk (WDR).* <https://www1.wdr.de/nachrichten/impuls-debatte-um-fachkraefte-einwanderung-in-deutschland-100.html>, Stand: 01.11.2024.
- Umweltbundesamt (UBA) (2021): Umweltschädliche Subventionen in Deutschland. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/umweltschaedliche-subventionen-in-deutschland#umweltschaedliche-subventionen>, Stand: 01.11.2024.

- ver.di (2023): Fachkräftemangel in Deutschland: Herausforderung und Wege in die Zukunft. <https://www.verdi.de/themen/arbeit/%2B%2Bco%2B%2B74debf86-472f-11ee-894c-001a4a160129>, Stand: 01.11.2024.
- Viklenko, K. (o.J.): Deutsche Unternehmen haben es in China zunehmend schwer. <https://www.gtai.de/de/trade/china/wirtschaftsumfeld/deutsche-unternehmen-haben-es-in-china-zunehmend-schwer-799828>, Stand: 01.11.2024.
- Wehrle, C. (2023): Deutschland verliert an Wettbewerbsfähigkeit. [tagesschau.de. https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/standort-deutschland-wettbewerbsfaehigkeit-zew-familienunternehmen-regulierung-steuern-101.html](https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/standort-deutschland-wettbewerbsfaehigkeit-zew-familienunternehmen-regulierung-steuern-101.html), Stand: 01.11.2024.
- Wirtschaftswoche (2023): Klatsche für die Ampel – so reagiert die Bundesregierung. <https://www.wiwo.de/politik/deutschland/klima-und-transformationsfonds-schrumpft-klatsche-fuer-die-ampel-so-reagiert-die-bundesregierung/29501946.html>, Stand: 01.11.2024.
- Wolf, I. (2020): Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energiewende 2019. Kernaussagen und Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse. [https://www.rifs-potsdam.de/sites/default/files/2020-04/Online\\_IASS\\_N-barometer\\_21x21cm\\_200415.pdf](https://www.rifs-potsdam.de/sites/default/files/2020-04/Online_IASS_N-barometer_21x21cm_200415.pdf), Stand: 01.11.2024. doi:10.2312/IASS.2020.010.
- Wolf, I.; Ebersbach, B.; Huttarsch, J.-H. (2023): Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energie- und Verkehrswende 2023. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK). [https://ariadne-projekt.de/media/2023/07/Soziales\\_Nachhaltigkeitsbarometer\\_2023\\_KopernikusProjektAriadne.pdf](https://ariadne-projekt.de/media/2023/07/Soziales_Nachhaltigkeitsbarometer_2023_KopernikusProjektAriadne.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Wolff, S. (2023): OECD warnt vor Abschwung wegen Haushaltskrise. [tagesschau.de. https://www.tagesschau.de/wirtschaft/konjunktur/investitionen-106.html](https://www.tagesschau.de/wirtschaft/konjunktur/investitionen-106.html), Stand: 01.11.2024.
- Wollmershäuser, T. (2023): ifo Konjunkturprognose Frühjahr 2023: Deutsche Wirtschaft stagniert. Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e.V. (ifo Institut). <https://www.ifo.de/fakten/2023-03-15/ifo-konjunkturprognose-fruehjahr-2023-deutsche-wirtschaft-stagniert>, Stand: 30.08.2023.
- World Economic Forum (WEF) (2024): The Global Risks Report 2024. 19th Edition. <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2024/>, Stand: 29.10.2024.
- ## 2.8 Internet der Zukunft
- Adhanom, I. B.; MacNeilage, P.; Folmer, E. (2023): Eye Tracking in Virtual Reality: a Broad Review of Applications and Challenges. *Virtual Reality* 27 (2), S. 1481–1505. doi:10.1007/s10055-022-00738-z.
- Albrecht, S. (2023b): ChatGPT und andere Computermodelle zur Sprachverarbeitung – Grundlagen, Anwendungspotenziale und mögliche Auswirkungen. TAB-Hintergrundpapier. Band 26. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000158070/150614893>, Stand: 01.11.2024.
- Anderson, J.; Rainie, L. (2022): The Metaverse in 2040. <https://www.pewresearch.org/internet/2022/06/30/the-metaverse-in-2040/>, Stand: 01.11.2024.
- Andrae, A. S. G. (2017): Life Cycle Assessment of a Virtual Reality Device. *Challenges* 8 (2), S. 15. doi:10.3390/challe8020015.
- Arora, K. (o.J.): A New Era: The Impact Of 5G On Digital Marketing. <https://www.forbes.com/sites/forbesagencycouncil/2023/07/28/a-new-era-the-impact-of-5g-on-digital-marketing/?sh=3af74346264e>, Stand: 12.12.2023.
- Autodesk (2022): AutoCAD: 2D- und 3D-CAD-Software, auf die Millionen vertrauen, um überall und jederzeit Entwürfe zu erstellen, zu konstruieren und zu automatisieren. <https://www.autodesk.de/products/autocad/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>.
- Barbara, J. (2022): Re-Live History: An immersive virtual reality learning experience of prehistoric intangible cultural heritage. *Front. Educ.* 7. doi:10.3389/educ.2022.1032108.
- Caballero, D. (2023): AI and Sustainability in Web Design: How To Use AI for Sustainable Digital Products. <https://dodonut.com/blog/ai-and-sustainability-in-web-design/>, Stand: 01.11.2024.
- Cherukuri, N. (o.J.): The Future Of 5G: Benefits And Challenges. <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2022/12/20/the-future-of-5g-benefits-and-challenges/?sh=4364d0124eaa>, Stand: 12.12.2023.
- Cho, R. (o.J.): AI's Growing Carbon Footprint. <https://news.climete.columbia.edu/2023/06/09/ais-growing-carbon-footprint/>, Stand: 01.11.2024.
- Constantin, M.; Genovese, G.; Munawar, K.; Stone, R. (2023): Tourism in the metaverse: Can travel go virtual? <https://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-infrastructure/our-insights/tourism-in-the-metaverse-can-travel-go-virtual>, Stand: 01.11.2024.
- Cordella, M.; Alfieri, F.; Sanfelix, J. (2021): Reducing the carbon footprint of ICT products through material efficiency strategies: A life cycle analysis of smartphones. *J of Industrial Ecology* 25 (2), S. 448–464. doi:10.1111/jiec.13119.
- Degenhard, J. (2024): Global: Number of smartphone users worldwide from 2014 to 2029. Statista GmbH. <https://www.statista.com/forecasts/1143723/smartphone-users-in-the-world>, Stand: 01.11.2024.
- Delcker, J. (2023): Wie verändert künstliche Intelligenz die Gesellschaft? <https://www.dw.com/de/k%C3%BCnstliche-intelligenz-wie-revolutioniert-ki-die-gesellschaft/a-65192292>, Stand: 01.11.2024.
- Downey, S. (2014): History of the (Virtual) Worlds. *The Journal of Technology Studies* 40 (2), S. 54–66. <http://www.jstor.org/stable/43604309>.
- Elmasry, T.; Hazan, E.; Khan, H.; Kelly, G.; Srivastava, S.; Yee, L.; Zimmel, R. W. (2022): Value creation in the metaverse. The real business of the virtual world. McKinsey&Company. <https://www.mckinsey.com/-/media/mckinsey/business%20functions/marketing%20and%20sales/our%20insights/value%20creation%20in%20the%20metaverse/Value-creation-in-the-metaverse.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Engler, M.; Dhamani, N. (o.J.): Confronting the Threat of Deepfakes in Politics. <https://www.techpolicy.press/confronting-the-threat-of-deepfakes-in-politics/>, Stand: 01.11.2024.
- Ericsson (2023): Mobile data traffic forecast. Ericsson Mobility Report November 2023. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/dataforecasts/mobile-traffic-forecast>, Stand: 13.12.2023.

- Europäische Kommission (EK) (2024): Ökodesign-Verordnung: Neue Regeln für nachhaltige Produkte in Kraft. Vertretung in Deutschland. [https://germany.representation.ec.europa.eu/news/okodesign-verordnung-neue-regeln-fur-nachhaltige-produkte-kraft-2024-07-19\\_de](https://germany.representation.ec.europa.eu/news/okodesign-verordnung-neue-regeln-fur-nachhaltige-produkte-kraft-2024-07-19_de), Stand: 01.11.2024.
- Evans, R.; Gao, J. (2016): DeepMind AI reduces energy used for cooling Google data centers by 40%. <https://blog.google/outreach-initiatives/environment/deepmind-ai-reduces-energy-used-for/>, Stand: 01.11.2024.
- Fink, C. (o.J.): Virtuix Raises \$5 Million For Home VR Treadmill. <https://www.forbes.com/sites/charliefink/2023/08/07/virtuix-raises-5-million-for-home-vr-treadmill/?sh=14647f1f34dd>, Stand: 01.11.2024.
- Frąckiewicz, M. (o.J.): The Environmental Impact of Cloud-to-Edge Computing: A Closer Look. <https://ts2.space/en/the-environmental-impact-of-cloud-to-edge-computing-a-closer-look/#gsc.tab=0>, Stand: 12.12.2023.
- Glencross, S.; Mason, J.; Katsikitis, M.; Greenwood, K. M. (2021): Internet Use by People with Intellectual Disability: Exploring Digital Inequality-A Systematic Review. *Cyberpsychology, behavior and social networking* 24 (8), S. 503–520. doi:10.1089/cyber.2020.0499.
- Hallmann, C. A.; Sorg, M.; Jongejans, E.; Siepel, H.; Hofland, N.; Schwan, H.; Stenmans, W.; Müller, A.; Sumser, H.; Hörrn, T.; Goulson, D.; Kroon, H. de (2017): More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLOS ONE* 12 (10), e0185809. doi:10.1371/journal.pone.0185809.
- Hangebruch, N. (2023): Mehr als Shopping - Von der Transformation unserer Innenstädte. Norddeutscher Rundfunk (NDR). <https://www.ndr.de/kultur/buch/Mehr-als-Shopping-Von-der-Transformation-unserer-Innenstaedte,innenstaedte142.html>, Stand: 01.11.2024.
- Hassa, I. (2023): SMARTWEB Mobilfunk Report 2023. <https://www.smartweb.de/mobilfunk-report-deutschland-2023>, Stand: 01.11.2024.
- Hermann, I. (2022): Demokratische Werte nach europäischem Verständnis im Metaverse.
- Hurtz, S. (o.J.): Metaverse: Wenn Zuckerberg diese Wette verliert, ist Meta am Ende. <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/meta-metaverse-mark-zuckerberg-apple-facebook-1.5674433?reduced=true>, Stand: 01.11.2024.
- Kanana, B. (o.J.): One Year Later: Assessing ChatGPT's Influence on AI and Society. <https://www.cryptopolitan.com/de/ein-jahr-spater-wurde-der-einfluss-von-chatgpts-beurteilt/>, Stand: 12.12.2023.
- Lacey, N. (2023): Are immersive experiences creating a new digital divide? World Economic Forum (WEF). <https://www.weforum.org/agenda/2023/01/davos23-immersive-experiences-close-digital-divide/>, Stand: 07.03.2024.
- Lee, P.; Arkenberg, C.; Stanton, B.; Cook, A. (2022): Will VR go from niche to mainstream? It all depends on compelling VR content. Deloitte. [https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/pt/Documents/technology-media-telecommunications/TMTPredictions/tmt-predictions-2023/DI\\_TMTP23-VR-hardware.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/pt/Documents/technology-media-telecommunications/TMTPredictions/tmt-predictions-2023/DI_TMTP23-VR-hardware.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Lee, P.; Calugar-pop, C.; Bucaille, A.; Raviprakash, S. (2021): Making smartphones sustainable: Live long and greener. *Deloitte Insights Magazine* (30). <https://www2.deloitte.com/xe/en/insights/industry/technology/technology-media-and-telecom-predictions/2022/environmental-impact-smartphones.html>, Stand: 01.11.2024.
- Lv, Z. (2023): Generative artificial intelligence in the metaverse era. *Cognitive Robotics* 3, S. 208–217. doi:10.1016/j.cogr.2023.06.001.
- Majkowska, I. (o.J.): Why is virtual reality bad for the environment? <https://ts2.space/en/why-is-virtual-reality-bad-for-the-environment/#gsc.tab=0>, Stand: 12.12.2023.
- Meijers, M. H. C.; Torfadóttir, R. “.; Wonneberger, A.; Maslowska, E. (2023): Experiencing Climate Change Virtually: The Effects of Virtual Reality on Climate Change Related Cognitions, Emotions, and Behavior. *Environmental Communication* 17 (6), S. 581–601. doi:10.1080/17524032.2023.2229043.
- meta (o. J.): Meta Horizon Workrooms. <https://www.meta.com/de/work/workrooms/>, Stand: 01.11.2024.
- meta (2023): 2023 Sustainability Report. <https://sustainability.fb.com/wp-content/uploads/2023/07/Meta-2023-Sustainability-Report-1.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Min, R. (o.J.): These Swiss engineers have built a VR suit that could help you ‘feel’ things in the metaverse. <https://www.euronews.com/next/2023/06/23/these-swiss-engineers-have-built-a-vr-suit-that-could-help-you-feel-things-in-the-metavers>, Stand: 01.11.2024.
- Mubarak, F.; Suomi, R. (2022): Elderly Forgotten? Digital Exclusion in the Information Age and the Rising Grey Digital Divide. *Inquiry : a journal of medical care organization, provision and financing* 59, 469580221096272. doi:10.1177/00469580221096272.
- Newton, M. H.; Annetta, L. A.; Bressler, D. M. (2023): Using Extended Reality Technology in Traditional and Place-Based Environments to Study Climate Change. *Journal of Science Education and Technology* 33, S. 208–227. doi:10.1007/s10956-023-10057-w.
- Nokia (2020): Nokia confirms 5G as 90 percent more energy efficient. <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/12/02/2138047/0/en/Nokia-confirms-5G-as-90-percent-more-energy-efficient.html>, Stand: 01.11.2024.
- Peters, R. (2023): Metaverse – immersive, cyberphysische Welten. Themenkurzprofil. Band 63. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000156306>, Stand: 01.11.2024. doi:10.5445/IR/1000156306.
- Peters, R.; Schmietow, B.; Krieger, B. (2022): Zwischen Hype und Zukunftsthema: Auf dem Weg ins Metaverse? Bestandsaufnahme und Handlungsperspektiven für die Gestaltung des Metaverse. *iit-perspektive*. Band 62. [https://www.iit-berlin.de/wp-content/uploads/2022/11/V2\\_2022\\_12\\_06\\_iit-perspektive\\_Nr-62.pdf](https://www.iit-berlin.de/wp-content/uploads/2022/11/V2_2022_12_06_iit-perspektive_Nr-62.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Precedence Research (2023): Haptic Technology Market is Expanding at 11.14% Growth by 2030. <https://www.precedence-research.com/press-release/haptic-technology-market>, Stand: 01.11.2024.
- Rapoza, K. (o.J.): The Metaverse Is Failing, But This Is One Investment That Will Not Die. <https://www.forbes.com/sites/kenrapoza/2022/10/21/the-metaverse-is-failing-but-this-is-one-investment-that-will-not-die/?sh=58d990a01834>, Stand: 23.02.2024.

- Resnick, D. (o.J.): Teilt euren Standort und Reiseverlauf in Echtzeit über Google Maps. <https://blog.google/intl/de-de/produkte/suchen-entdecken/teilt-euren-standort-und-reiseverlauf-google-maps/>, Stand: 01.11.2024.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2021): Politik in der Pflicht: Umweltfreundliches Verhalten erleichtern. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU). [www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02\\_Sondergutachten/2020\\_2024/2023\\_05\\_SG\\_Umweltfreundliches\\_Verhalten.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=11](http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2020_2024/2023_05_SG_Umweltfreundliches_Verhalten.pdf?__blob=publicationFile&v=11), Stand: 01.11.2024.
- Schelisch, L.; Spellerberg, A. (2021): Digital Divide. Soziale Aspekte der Digitalisierung. In: Digitalisierung in ländlichen und verdichteten Räumen. – Arbeitsberichte der ARL 31. S. 53–62. Hannover. [https://www.arl-net.de/system/files/media-shop/pdf/ab/ab\\_031/05\\_schelisch-spellerberg.pdf](https://www.arl-net.de/system/files/media-shop/pdf/ab/ab_031/05_schelisch-spellerberg.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Seemann, M. (2023): Künstliche Intelligenz, Large Language Models, ChatGPT und die Arbeitswelt der Zukunft. Working Paper Forschungsförderung. Band 304. Hans-Böckler-Stiftung. [https://www.boeckler.de/de/faust-detail.htm?sync\\_id=HBS-008697](https://www.boeckler.de/de/faust-detail.htm?sync_id=HBS-008697), Stand: 01.11.2024.
- Soga, M.; Gaston, K. J. (2018): Shifting baseline syndrome: causes, consequences, and implications. *Frontiers in Ecol & Environ* 16 (4), S. 222–230. doi:10.1002/fee.1794.
- Spangenberg, P.; Geiger, S. M.; Freytag, S.-C. (2022): Becoming nature: effects of embodying a tree in immersive virtual reality on nature relatedness. *Scientific Reports* 12 (1). doi:10.1038/s41598-022-05184-0.
- SPIEGEL Online (2020): Rapper Travis Scott sorgt für “Fortnite”-Rekord. <https://www.spiegel.de/netzwelt/web/fortnite-konzert-von-rapper-travis-scott-sorgt-fuer-nutzerrekord-a-b377df69-74d2-4103-bbaa-98b40392afaf>, Stand: 01.11.2024.
- Statista GmbH (2023c): U.S.: smartphones replacement cycle 2013-2027. <https://www.statista.com/statistics/619788/average-smartphone-life/>, Stand: 01.11.2024.
- Statista GmbH (2024e): Absatz von Virtual-Reality- und Augmented-Reality-Brillen weltweit von 2020 bis 2022 und Prognose für 2023 und 2027. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/539653/umfrage/prognose-zum-absatz-von-virtual-reality-hardware/>, Stand: 01.11.2024.
- tagesschau.de (2023b): Wie stark der Stromverbrauch durch Künstliche Intelligenz steigt. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/digitales/ki-energie-strom-verbrauch-klimaschutz-100.html>, Stand: 01.11.2024.
- Tenzer, F. (2024): Anzahl der Spieler-Accounts von Fortnite von 2017 bis 2023. Statista GmbH. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1449389/umfrage/anzahl-der-spieler-accounts-von-fortnite/>, Stand: 01.11.2024.
- Thieme, T. (2022): „Das Metaverse kann zum verbindenden Element werden“. <https://www.absatzwirtschaft.de/die-welten-verschmelzen-234652/>, Stand: 01.11.2024.
- Thoma, S. P.; Hartmann, M.; Christen, J.; Mayer, B.; Mast, F. W.; Weibel, D. (2023): Increasing awareness of climate change with immersive virtual reality. *Frontiers in Virtual Reality* 4. doi:10.3389/frvir.2023.897034.
- Thormundsson, B. (2022): AI impact on greenhouse gas emission worldwide 2030. Statista GmbH. <https://www.statista.com/statistics/1022326/worldwide-ai-impact-ghg/>, Stand: 01.11.2024.
- Thormundsson, B. (2023): Artificial Intelligence market size 2030. Statista GmbH. <https://www.statista.com/statistics/1365145/artificial-intelligence-market-size/>, Stand: 01.11.2024.
- Tsolakis, N.; Zissis, D.; Papaefthimiou, S.; Korfiatis, N. (2022): Towards AI driven environmental sustainability: an application of automated logistics in container port terminals. *International Journal of Production Research* 60 (14), S. 4508–4528. doi:10.1080/00207543.2021.1914355.
- VIAMI Solutions (2023): What is 5G Energy Consumption? <https://www.viavisolutions.com/de-de/node/80967>, Stand: 01.11.2024.
- WBS TRAINING (o.J.): Schweißen lernen: Kurse für virtuelles Schweißen. <https://www.wbstraining.de/weiterbildungen/handwerk-technik/schweisser/>, Stand: 01.11.2024.
- Werrlich, S.; Eichstetter, E.; Nitsche, K.; Notni, G. (2017): An Overview Of Evaluations Using Augmented Reality For Assembly Training Tasks. doi:10.5281/zenodo.1132315.
- Yavo-Ayalon, S.; Joshi, S.; Zhang, Y.; Han, R.; Mahyar, N.; Ju, W. (2023): Building Community Resiliency through Immersive Communal Extended Reality (CXR). *Multimodal Technologies and Interaction* 7 (5), S. 43. doi:10.3390/mti7050043.
- Zeit Online (2022): Im Metaversum am Strand liegen: Virtual Reality im Tourismus. *Zeit Online*. <https://www.zeit.de/news/2022-07/11/virtual-reality-im-tourismus>, Stand: 01.11.2024.

## 2.9 Cybersicherheit und Umweltschutz

- Ardagna, C.; Corbiaux, S.; van Impe, K.; Sfakianakis, A. (2022): ENISA THREAT LANDSCAPE 2022. European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). <https://www.enisa.europa.eu/publications/enisa-threat-landscape-2022/@@download/fullReport>, Stand: 30.10.2024.
- Arntz, P. (2020): The effects of climate change on cybersecurity. Malwarebytes Ltd. <https://www.malwarebytes.com/blog/news/2020/03/the-effects-of-climate-change-on-cybersecurity>, Stand: 01.11.2024.
- Bart, S. (2023): Faktencheck: Deepfake-Video von Greta Thunberg und „veganen Granaten“? mimikama. <https://www.mimikama.org/deepfake-video-greta-thunberg-veganen-granaten/>, Stand: 04.04.2024.
- Berger, C. (2022): We “Pledge” action: The delay and diffuse tactics of climate misinformation. Observer Research Foundation. <https://www.orfonline.org/hindi/expert-speak/we-pledge-action-not-%E2%80%98resolve%E2%80%99-but-action-it-is-important-to-stop-the-spread-of-climate-related-misinformation>, Stand: 30.10.2024.
- Berger, C.; Freihse, C.; Hofmann, V.; Kettemann, M. C.; Mosene, K. (2023): Bedrohungen für die Demokratie: Klima-Fehlinformationen und geschlechtsspezifische Desinformation. *Impuls*. Band 4. [https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/user\\_upload/UpDem-HiIG-04-Fehlinformationen-und-geschlechtsspezifische-Desinformation.pdf](https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/user_upload/UpDem-HiIG-04-Fehlinformationen-und-geschlechtsspezifische-Desinformation.pdf), Stand: 01.11.2024. doi:10.11586/2023081.
- Bertelsmann Stiftung (2024): Forum gegen Fakes. Bertelsmann Stiftung startet großes Beteiligungs-Projekt zum Umgang mit Desinformation. <https://www.bertelsmann-stiftung.de/de/themen/aktuelle-meldungen/2024/januar/bertelsmann-stiftung-startet-grosses-beteiligungs-projekt-zum-umgang-mit-desinformation>, Stand: 01.11.2024.

- Bitkom e.V. (2022): 203 Milliarden Euro Schaden pro Jahr durch Angriffe auf deutsche Unternehmen. <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Wirtschaftsschutz-2022>, Stand: 01.11.2024.
- Bitkom e.V. (2024): Angriffe auf die deutsche Wirtschaft nehmen zu. <https://www.bitkom.org/print/pdf/node/22079>, Stand: 01.11.2024.
- BMI (o.J.): Gemeinsam den Wirtschaftsstandort Deutschland schützen. <https://www.bmi.bund.de/DE/themen/sicherheit/spionageabwehr-wirtschafts-und-geheimsschutz/wirtschaftsschutz/wirtschaftsschutz-node.html>, Stand: 01.11.2024.
- Brühl, J. (2022): Angriff auf „Ka-Sat 9A“. Hack gegen Satellitenetzwerk. <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/hack-gegen-satellitennetzwerk-angriff-auf-ka-sat-9a-1.5560370>, Stand: 01.11.2024.
- Bundeministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2022): Fake News erkennen, verstehen, bekämpfen. <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/2022/02/fake-news-be-kaempfen.html>, Stand: 01.11.2024.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (2022a): Cybersicherheit für Weltrauminfrastrukturen. Positionierung des Bundesamts für Sicherheit in der Informationstechnik. [https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Weltrauminfrastrukturen/Cyber-Sicherheit\\_Weltrauminfrastrukturen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Weltrauminfrastrukturen/Cyber-Sicherheit_Weltrauminfrastrukturen.pdf?__blob=publicationFile&v=3), Stand: 01.11.2024.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (2022b): Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2022. [https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Lageberichte/Lagebericht2022.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Lageberichte/Lagebericht2022.pdf?__blob=publicationFile&v=8), Stand: 01.11.2024.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (2023a): Botnetze – Auswirkungen und Schutzmaßnahmen. [https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Verbraucherinnen-und-Verbraucher/Cyber-Sicherheitslage/Methoden-der-Cyber-Kriminalitaet/Botnetze/botnetze\\_node.html](https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Verbraucherinnen-und-Verbraucher/Cyber-Sicherheitslage/Methoden-der-Cyber-Kriminalitaet/Botnetze/botnetze_node.html), Stand: 01.12.2023.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (2023b): Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2023. [https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/2023/bsi-lagebericht2023.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/2023/bsi-lagebericht2023.pdf?__blob=publicationFile&v=1), Stand: 01.11.2024.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (2023c): Digitalbarometer. Bürgerbefragung zur Cybersicherheit 2022. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI). [https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Digitalbarometer/Digitalbarometer-ProPK-BSI\\_2022.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Digitalbarometer/Digitalbarometer-ProPK-BSI_2022.pdf?__blob=publicationFile&v=3), Stand: 01.11.2024.
- Bundeskriminalamt (2024): Bundeslagebild Cybercrime 2023. <https://www.bka.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/JahresberichteUndLagebilder/Cybercrime/cybercrimeBundeslagebild2023.html?nn=28110>, Stand: 01.11.2024.
- Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat (2021): Cybersicherheitsstrategie für Deutschland 2021. Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat. [https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/2021/09/cybersicherheitsstrategie-2021.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/2021/09/cybersicherheitsstrategie-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=2), Stand: 01.11.2024.
- Bundesregierung (2023f): Nationale Sicherheitsstrategie. Wehrhaft. Resilient. Nachhaltig. Integrierte Sicherheit für Deutschland. <https://www.nationalesicherheitsstrategie.de/Sicherheitsstrategie-Zusammenfassung-DE.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Calliess, C. (2021): Aktionsplan Resilienz und Demokratie: Wie Deutschland Angriffe auf Demokratie und Gesellschaft abwehren kann. In: Smarte Souveränität: 10 Aktionspläne für die neue Bundesregierung. S. 67–73. Berlin.
- Caradot, N.; Schäfer, de Macedo, Nikolaus; Henning, E. (2023): Cybersicherheit im Wassersektor. Analyse der zukünftigen Entwicklung der Wasser- und Abwasserinfrastruktur. Stadtentwässerungsbetriebe Köln, Berliner Wasserbetriebe, Stadtentwässerung Braunschweig; TU Delft; SINTEF; Kompetenzzentrum Digitale Wasserwirtschaft; MSF Partners Innovation AG. <https://kompetenz-wasser.de/media/pages/forschung/projekte/cybersecurity/a1d3bdce70-1655889266/cybersicherheit-im-wassersektor.pdf>, Stand: 11.12.2023.
- Center for Strategic & International Studies (2023): Significant Cyber Incidents. <https://www.csis.org/programs/strategic-technologies-program/significant-cyber-incidents>, Stand: 01.11.2024.
- Couce-Vieira, A.; Insua, D. R.; Kosgodagan, A. (2020): Assessing and Forecasting Cybersecurity Impacts. *Decision Analysis* 17 (4), S. 356–374. doi:10.1287/deca.2020.0418.
- Demary, V. (2022): Wie der russische Cyberkrieg deutsche Unternehmen bedroht. IW-Kurzbericht. Band 15/2022. Institut der deutschen Wirtschaft Köln e. V. (IW). [https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user\\_upload/Studien/Kurzberichte/PDF/2022/IW-Kurzbericht\\_2022-Cyberwarfare-deutsch.pdf](https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Kurzberichte/PDF/2022/IW-Kurzbericht_2022-Cyberwarfare-deutsch.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Demmig, R. (2020): Resilienz kritischer Infrastrukturen in Smart Cities. In: Smart City – Made in Germany. Die Smart-City-Bewegung als Treiber einer gesellschaftlichen Transformation. S. 709–715. Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-27232-6\_72.
- Deutsche Bahn (2022): Nach Sabotage: Bahnverkehr im Raum Norddeutschland normalisiert sich weiter. [https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart\\_zentrales\\_uebersicht/Nach-Sabotage-Bahnverkehr-im-Raum-Norddeutschland-normalisiert-sich-weiter-8960922?](https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Nach-Sabotage-Bahnverkehr-im-Raum-Norddeutschland-normalisiert-sich-weiter-8960922?), Stand: 11.12.2023.
- Deutsche Windtechnik AG (2022): Cyber-Angriff auf Deutsche Windtechnik. <https://www.deutsche-windtechnik.com/news/aktuelles/detail/cyber-angriff-auf-deutsche-windtechnik>, Stand: 01.11.2024.
- Deutscher Bundestag (2009): Gesetz über das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. BSIG. Deutscher Bundestag. [https://www.gesetze-im-internet.de/bsig\\_2009/BJNR282110009.html](https://www.gesetze-im-internet.de/bsig_2009/BJNR282110009.html), Stand: 01.11.2024.
- Doss, C.; Mondschein, J.; Shu, D.; Wolfson, T.; Kopecky, D.; Fitton-Kane, V. A.; Bush, L.; Tucker, C. (2023): Deepfakes and scientific knowledge dissemination. *Sci Rep* 13 (1), S. 13429. doi:10.1038/s41598-023-39944-3.
- Dreißigacker, A.; Skarczinski, B. von; Wollinger, G. R.: Cyberangriffe gegen Unternehmen in Deutschland. Ergebnisse einer Folgebefragung 2020. Forschungsbericht / KFN, Kriminologisches Forschungsinstitut Niedersachsen e.V. <https://www.pwc.de/de/im-fokus/cyber-security-privacy/cyberangriffe-gegen-unternehmen-in-deutschland-folgebefragung.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Dupree, S. (o.J.): Das Internet der Dinge. <https://reset.org/das-internet-der-dinge-11162015/>, Stand: 01.11.2024.





- Europäische Kommission (EK) (o.J.): Geförderte Projekte zur Bekämpfung von Desinformation. [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/coronavirus-response/fighting-disinformation/funded-projects-fight-against-disinformation\\_de](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/coronavirus-response/fighting-disinformation/funded-projects-fight-against-disinformation_de), Stand: 01.11.2024.
- Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2022): Richtlinie (EU) 2022/2557 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2022 über die Resilienz kritischer Einrichtungen und zur Aufhebung der Richtlinie 2008/114/EG des Rates. PE/51/2022/REV/1. Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2557/oj?uri=CELEX:32022L2557>, Stand: 19.09.2024.
- Freiling, I.; Matthes, J. (2023): Correcting climate change misinformation on social media: Reciprocal relationships between correcting others, anger, and environmental activism. *Computers in Human Behavior* 145. doi:10.1016/j.chb.2023.107769.
- Golden, D.; Johnson, T. (2017): *Augmented Security. How cognitive technologies can address the cyber workforce shortage*. Deloitte University Press. <https://www2.deloitte.com/de/de/pages/risk/articles/augmented-security-ki-optimiert.html>, Stand: 01.11.2024.
- Hate Aid (2022): Demokratie im Fadenkreuz: Desinformationskampagne #BaerbockRuecktritt. <https://hateaid.org/baerbock-ruecktritt-desinformation/>, Stand: 01.11.2024.
- Hauff, M. von; Reller, A. (Hrsg.) (2020): *Nachhaltige Digitalisierung - eine noch zu bewältigende Zukunftsaufgabe*. Wiesbaden.
- Heidtmann, J. (2021): Wie Hacker einen Landkreis erpressen. *Süddeutsche.de*. <https://www.sueddeutsche.de/politik/hacker-anhalt-bitterfeld-1.5353265>, Stand: 01.11.2024.
- Heinrich Böll Stiftung (2023): *Cyberangriff auf Landkreis Anhalt-Bitterfeld 2021*. Heinrich Böll Stiftung. [https://kommunalwiki.boell.de/index.php/Cyberangriff\\_auf\\_Landkreis\\_Anhalt-Bitterfeld\\_2021#Umweltdatenbank\\_verloren](https://kommunalwiki.boell.de/index.php/Cyberangriff_auf_Landkreis_Anhalt-Bitterfeld_2021#Umweltdatenbank_verloren), Stand: 01.11.2024.
- Herpig, S. (2023): Mehr Resilienz für Deutschlands IT-Systeme. *Tagesspiegel Background Cybersecurity*. <https://background.tagesspiegel.de/cybersecurity/mehr-resilienz-fuer-deutschlands-it-systeme>, Stand: 03.04.2024.
- Hirvonen, I.; Karisto, J. (2022): Demarcation without Dogmas. *Theoria* 88 (3), S. 701–720. doi:10.1111/theo.12395.
- Hoffmann, C. P. (2023): Fake News, Misinformation, Desinformation. *Bundeszentrale für politische Bildung (bpb)*. <https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/izpb/medienkompetenz-355/539986/fake-news-misinformation-desinformation/>, Stand: 01.11.2024.
- Iaiani, M.; Tugnolo, A.; Bonvincini, S.; Cozzani, V. (2021): Analysis of Cybersecurity-related Incidents in the Process Industry. *Reliability Engineering & System Safety* 209, S. 107485. doi:10.1016/j.res.2021.107485.
- Isaac, A.; Lawson, A. (2023): Sellafeld nuclear site hacked by groups linked to Russia and China. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/business/2023/dec/04/sellafeld-nuclear-site-hacked-groups-russia-china>, Stand: 01.11.2024.
- Kalinin, M.; Krundyshev, V.; Zegzhda, P. (2021): Cybersecurity Risk Assessment in Smart City Infrastructures. *Machines* 9 (4), S. 78. doi:10.3390/machines9040078.
- King, C. (o.J.): Serious incident involving CUT underwater cables in South of France affects internet worldwide. <https://euroweeklynews.com/2022/10/23/serious-incident-involving-cut-underwater-cables-in-south-of-france-affects-internet-worldwide/>, Stand: 11.12.2023.
- King, J.; Janulewicz, L.; Arcostanzo, F. (2022): Deny, Deceive, Delay: Documenting and Responding to Climate Disinformation at COP26 & Beyond - Summary. *ISD*. <https://www.isdglobal.org/isd-publications/deny-deceive-delay-documenting-and-responding-to-climate-disinformation-at-cop26-and-beyond/>, Stand: 01.11.2024.
- Kleine, S.; Barthel, U. (2023): Neues Gesetz soll Schutz der kritischen Infrastruktur regeln. *RBB*. <https://www.rbb24.de/politik/beitrag/2023/01/bahn-schutz-verbesserung-gesetz-kritische-infrastruktur.html>, Stand: 01.11.2024.
- Kolaric, D. (o. J.): Gartner über Cybersicherheit: Das sind die Top 8 Prognosen für 2022 und 2023. *All About Security*. <https://www.all-about-security.de/gartner-ueber-cybersicherheit-das-sind-die-top-8-prognosen-fuer-2022-und-2023/#:~:text=Bis%202025%20werden%2060%20Prozent,%2DGeldstrafen%20und%20%2DVerhandlungen%20regeln.,> Stand: 01.11.2024.
- Kolvenbach, M. (2024): Wie Ukraikner demoralisiert werden sollen. *tagesschau.de*. <https://www.tagesschau.de/investigativ/swr/russland-ukraine-cyber-krieg-100.html>, Stand: 01.11.2024.
- Krawczyk, F.; Kulczycki, E. (2021): How is open access accused of being predatory? The impact of Beall's lists of predatory journals on academic publishing. *The Journal of Academic Librarianship* 47 (2). doi:10.1016/j.acalib.2020.102271.
- Lamb, W. F.; Mattioli, G.; Levi, S.; Roberts, J. T.; Capstick, S.; Creutzig, F.; Minx, J. C.; Müller-Hansen, F.; Culhane, T.; Steinberger, J. K. (2020): Discourses of climate delay. *Global Sustainability* 3, e17. doi:10.1017/sus.2020.13.
- Leiserowitz, A. A.; Maibach, E. W.; Roser-Renouf, C.; Smith, N.; Dawson, E. (2013): Climategate, Public Opinion, and the Loss of Trust. *American Behavioral Scientist* 57 (6), S. 818–837. doi:10.1177/0002764212458272.
- Mair, K.; Schwondra, G.; Hofinger, C.; Laumer, D. (2023): *Deloitte Cybersecurity Report 2023. Wie die Unternehmenswelt auf die steigende Cyber-Bedrohungslage reagiert*. Deloitte Services Wirtschaftsprüfungs GmbH. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/at/Documents/presse/at-deloitte-cyber-security-report-2023.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- McKie, R. (o.J.): Climategate 10 years on: what lessons have we learned? <https://www.theguardian.com/theobserver/2019/nov/09/climategate-10-years-on-what-lessons-have-we-learned>, Stand: 11.12.2023.
- Möller, M.; Strüber, H. (2024): Ostsee: Rätselhafte GPS-Störungen behindern Schiffs- und Flugverkehr. *Norddeutscher Rundfunk (NDR)*. <https://www.ndr.de/nachrichten/mecklenburg-vorpommern/Ostsee-Raetselhafte-GPS-Stoerungen-behindern-Schiffs-und-Flugverkehr,balticjammer100.html>, Stand: 01.11.2024.
- Möller, T. A. (2023): Cybersicherheit für Staat, Wirtschaft und Gesellschaft. *Zeitschrift für Außen- und Sicherheitspolitik* 16 (1), S. 1–12. doi:10.1007/s12399-023-00936-w.

- Mühlichen, A. (2020): Von der Smart City zur gläsernen Stadt. In: Smart City – Made in Germany. Die Smart-City-Bewegung als Treiber einer gesellschaftlichen Transformation. S. 881–890. Wiesbaden. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-27232-6\\_88](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-27232-6_88), Stand: 12.03.2024.
- Müller, N. (2024): Sind Sie betroffen? Die 5 heftigsten Hackerangriffe in Deutschland 2023. Chip.de. [https://www.chip.de/news/Sind-Sie-betroffen-Die-5-heftigsten-Hackerangriffe-in-Deutschland-2023\\_185110063.html](https://www.chip.de/news/Sind-Sie-betroffen-Die-5-heftigsten-Hackerangriffe-in-Deutschland-2023_185110063.html), Stand: 01.11.2024.
- Pawlak, J. (2023): Der Schutz maritimer kritischer Infrastrukturen und das Konzept der Abschreckung. SIRIUS – Zeitschrift für Strategische Analysen 7 (2), S. 160–166. doi:10.1515/sirius-2023-2005.
- Petretto, K.; Heckler, S. (2021): Resilienz gegenüber Sicherheitsrisiken stärken. Wertschöpfungs- und Lieferketten im Analogen und Digitalen schützen. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI). <https://bdi.eu/publikation/news/resilienz-gegenueber-sicherheitsrisiken-staerken-wirtschaftsschutz-cybersicherheit-spionage>, Stand: 01.11.2024.
- Roth, M. (2023): Interner BSI-Bericht zu Hackerangriff: Kritik am Landkreis Anhalt-Bitterfeld. Mitteldeutscher Rundfunk (MDR). <https://www.mdr.de/nachrichten/sachsen-anhalt/dessau/podcast-cyberkatastrophe-bsi-kritik-landkreis-100.html>, Stand: 11.12.2023.
- Sabin, S. (2023): U.S. taps cyber pros to develop AI cybersecurity tools. <https://www.axios.com/2023/08/09/darpa-cybersecurity-challenge-ai-tools>, Stand: 01.12.2023.
- Sanderson, H.; Czub, M.; Koschinski, S.; Tougaard, J.; Sveegaard, S.; Jakacki, J.; Fauser, P.; Frey, T.; Bełdowski, J.; Beck, A.; Przyborska, A.; Szturomski, B.; Kiciński, R. (2023): Environmental impact of sabotage of the Nord Stream pipelines. <https://www.researchsquare.com/article/rs-2564820/v1>, Stand: 01.11.2024. doi:10.21203/rs.3.rs-2564820/v1.
- Sayfayn, N.; Madnick, S. (2017): Cybersafety Analysis of the Maroochy Shire Sewage Spill. Massachusetts Institute of Technology (MIT). <https://web.mit.edu/smadnick/www/wp/2017-09.pdf>, Stand: 01.11.2024.
- Schnabel, U. (2009): Flut der Gerüchte. Was „Climategate“ über die Klima-Berichterstattung lehrt. Zeit Online. <https://www.zeit.de/2009/52/Kommentar-1>, Stand: 01.11.2024.
- Shandler, R.; Gomez, M. A. (2023): The hidden threat of cyber-attacks – undermining public confidence in government. *Journal of Information Technology & Politics* 20 (4), S. 359–374. doi:10.1080/19331681.2022.2112796.
- Staalesen, A. (o.J.): ‘Human activity’ behind Svalbard cable disruption. <https://thebarentsobserver.com/en/security/2022/02/unknown-human-activity-behind-svalbard-cable-disruption>, Stand: 01.11.2024.
- Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI) (2023): SIPRI Yearbook 2023. Armaments, Disarmament and International Security. Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI). [https://www.sipri.org/sites/default/files/2023-06/yb23\\_summary\\_en\\_1.pdf](https://www.sipri.org/sites/default/files/2023-06/yb23_summary_en_1.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Sühlmann-Faul, F.; Rammler, S. (2022): Digitalisierung und Nachhaltigkeit. Nachhaltigkeitsdefizite der Digitalisierung auf ökologischer, ökonomischer, politischer und sozialer Ebene. Handlungsempfehlungen und Wege einer erhöhten Nachhaltigkeit durch Werkzeuge der Digitalisierung. World Wide Fund for Nature (WWF). [www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Deutschland/Studie-Digitalisierung-und-Nachhaltigkeit.pdf](http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Deutschland/Studie-Digitalisierung-und-Nachhaltigkeit.pdf), Stand: 01.11.2024.
- Wirnsperger, P.; von Spreti, M.; Klein, F. (2020): Future of Cyber Risk 2035. A Glimpse into the Future of the Cyber Risk. Deloitte. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/risk/Future-of-Cyber-Risk-2035.pdf>, Stand: 01.11.2024.



► **Unsere Broschüren als Download**

Kurzlink: [bit.ly/2dowYYI](https://bit.ly/2dowYYI)

-  [www.facebook.com/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)
-  [www.x.com/umweltbundesamt](https://www.x.com/umweltbundesamt)
-  [www.youtube.com/user/umweltbundesamt](https://www.youtube.com/user/umweltbundesamt)
-  [www.instagram.com/umweltbundesamt](https://www.instagram.com/umweltbundesamt)